

PM

# Linha de Comunicação de Suporte à Monitorização Ambiental

PROJETO DE MESTRADO

**Yasmina Chatterley de Matos Hafhouf**

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA - TELECOMUNICAÇÕES



UNIVERSIDADE da MADEIRA

*A Nossa Universidade*

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

setembro | 2016

# **Linha de Comunicação de Suporte à Monitorização Ambiental**

PROJETO DE MESTRADO

**Yasmina Chatterley de Matos Hafhouf**

MESTRADO EM ENGENHARIA ELETROTÉCNICA - TELECOMUNICAÇÕES

ORIENTADOR  
Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo



**Universidade da Madeira Centro de Competências de Ciências  
Exatas e da Engenharia**

# **Linha de comunicação de suporte à monitorização ambiental**

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

Orientador: Professor Doutor Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo

Yasmina Chatterley de Matos Hafhouf

2016



## Resumo

O objetivo deste trabalho foi projetar uma linha de comunicação de suporte à monitorização ambiental desde o Funchal até ao Pico do Arieiro fazendo uso das redes de sensores sem fios (RSSF).

Primeiramente efetuou-se um estudo dos principais sensores utilizados no âmbito da monitorização ambiental. Posteriormente averiguou-se o funcionamento das RSSF de modo a compreender o envio de dados dos nós sensores até à estação base.

A comunicação entre nós é realizada por radiofrequência. Tendo em conta que a propagação do sinal é afetada por diversos fatores, realizou-se um estudo relativamente à atenuação do sinal em diferentes meios.

A linha de comunicação faz uso de dois tipos de nós, o nó *router* e o nó terminal (*end-device*). Este último permite diminuir o consumo de energia, entrando no modo adormecido, aumentando, assim, o tempo de vida da rede sem a necessidade de recorrer a baterias com maior capacidade.

No que concerne à monitorização ambiental foi desenvolvida uma estação meteorológica (*end-device*) alimentada por painéis fotovoltaicos. A estação tem como função recolher periodicamente os parâmetros de temperatura do ar, humidade relativa, pluviosidade, velocidade e direção do vento, tensão nas baterias, produção de potência dos painéis fotovoltaicos e o nível de sinal de radiofrequência recebido (RSSI - *Received Signal Strength Indicator*). O protótipo foi instalado em ambiente exterior de forma a avaliar o seu desempenho e os efeitos do ambiente, especialmente em situações de ocorrência de intempéries. Os dados podem ser visualizados em tempo real através de uma aplicação *web*.

**Palavras-chave:** Redes de Sensores Sem Fios (RSSF), ZigBee, Monitorização ambiental, Linha de comunicação, Energia fotovoltaica.



## Abstract

The aim of this project work was to create a support communications line between Funchal and Pico do Arieiro using a wireless communication sensor system (RSSF).

Firstly a study of the main used sensors in the environmental monitoring was done. Then the functioning of the RSSF was evaluated in order to understand how data was being sent and processed from the sensor nodes to the base station.

The communication between nodes was performed via radiofrequency, bearing in mind that the propagation of the signal is affected by several elements. A study in many different environments has been carried out concerning the weakening of the signal.

The communication line includes two types of nodes, the router node and the end-device node. The last one allows to save energy as it goes into sleep mode. This way allows an increased life span is expected without the need to turn to larger batteries saving time and means.

Due to the environmental monitoring, it was created a meteorological station (end-device) fed by a photovoltaic panel. The station collects periodically the parameters of air temperature, relative humidity, precipitation, speed and wind direction, battery tension, the photovoltaic panels production and the radio frequency signal level (RSSI – Received Signal Strength indicator). A prototype was installed in an outdoor environment, in order to evaluate its performance exposed to the elements. The data can be visualized in real time in a *web* page.

**Keywords:** Wireless Sensor Networks (WSN), ZigBee, Environmental monitoring, Communication line, Photovoltaics energy.



## **Agradecimentos**

A realização deste projeto, bem como do meu percurso acadêmico não teria sido possível sem a cooperação de algumas pessoas. Pretendo aqui expressar o meu agradecimento.

Em primeiro lugar ao meu orientador, Professor Doutor Joaquim Amândio Rodrigues Azevedo pela atenção, interesse, críticas, paciência, sugestões e acima de tudo pela total dedicação no decorrer deste projeto.

À Universidade da Madeira, em particular ao Centro de Competência de Ciências Exatas e da Engenharia, e, a todos os professores que contribuíram para a minha formação.

À minha mãe pelo apoio incondicional, incentivo e, especialmente pelo carinho. À minha avó, irmãs, tia e pai, pela paciência e por estarem sempre presentes. Um agradecimento especial ao meu irmão, por toda a ajuda concedida na realização das medições, por se disponibilizar sempre que preciso e pela amizade.

Ao meu namorado Jonhy, pela cumplicidade, confiança, amizade, paciência e apoio nos momentos mais difíceis.

Ao Engenheiro Filipe Santos, por todo o apoio, disponibilidade, conhecimento e conselhos partilhados.

Aos meus colegas, em especial ao Juan Bort, Diogo Gouveia, Beto Silva e Jorge Lopes, por toda a ajuda, conhecimentos partilhados e pelos bons momentos passados juntos.

Agradeço também às minhas amigas pela sua amizade, boa energia, respeito, estímulo e entusiasmo, em todos os momentos.



# Índice

1	Prefácio .....	1
1.1	Introdução .....	1
1.2	Motivação.....	1
1.3	Objetivos .....	2
1.4	Estrutura da dissertação .....	2
2	Monitorização Ambiental.....	5
2.1	Redes de sensores sem fios.....	5
2.2	Sensores de interesse.....	8
2.2.1	Sensor de temperatura do ar e humidade relativa.....	8
2.2.2	Sensor de luminosidade .....	8
2.2.3	Sensor de pluviosidade (pluviómetro) .....	9
2.2.4	Sensores de Vento (anemómetro) .....	10
2.2.5	Sensor de radiação solar .....	12
2.3	Integração dos componentes de comunicação no meio ambiente.....	13
2.3.1	Antenas camufladas no meio urbano e suburbano .....	14
2.3.2	Antenas camufladas na vegetação.....	15
2.4	Modelos de propagação.....	17
2.4.1	Modelo de atenuação em espaço livre .....	17
2.4.2	Modelo log-normal.....	17
2.4.3	Modelos de propagação na vegetação .....	18
2.5	Sistemas de monitorização ambiental .....	20
2.5.1	Sistema “SISVIA Vigilancia y Seguimiento Ambiental” .....	20
2.5.2	Sistema MasliNET .....	22
2.5.3	Sistema QUIROTEC .....	23
2.5.4	Rede ARTICA e ICARO 1.....	24
2.5.5	Análise dos sistemas.....	26
3	Estudo da propagação.....	27
3.1	Dispositivos de comunicação e processamento .....	27
3.1.1	Arduíno FIO .....	27
3.1.2	XBee.....	27
3.1.3	Antenas utilizadas .....	29
3.2	Sistema de medição .....	30
3.3	Medições em diferentes meios de propagação .....	32

3.3.1	Meio sem obstáculos .....	32
3.3.2	Meio com obstáculos .....	35
3.3.3	Meio com vegetação .....	38
3.4	Alcance máximo .....	41
3.5	Antenas do sistema de comunicação.....	42
3.5.1	Antena omnidirecional.....	43
3.5.2	Antena diretiva.....	46
4	Desenvolvimento dos módulos e do <i>software</i> .....	49
4.1	Requisitos do sistema e esquema da rede.....	49
4.2	Nó terminal .....	52
4.2.1	Alimentação e consumo energético.....	52
4.2.2	Circuito e programação do nó.....	53
4.3	Nó <i>router</i> .....	55
4.3.1	Alimentação e consumo energético.....	55
4.3.2	Circuito e programação do nó.....	57
4.3.3	Protótipo final .....	59
4.3.4	Custo do protótipo final .....	61
4.4	Estação meteorológica.....	61
4.4.1	Sensores .....	61
4.4.2	Alimentação e consumo energético.....	65
4.4.3	Circuito e programação do nó.....	66
4.4.4	Custo da estação meteorológica.....	68
4.5	Aplicação de visualização na <i>web</i> .....	68
5	Testes e resultados.....	71
5.1	Linha de comunicação.....	71
5.2	Carregamento das baterias para o nó <i>router</i> .....	77
5.3	Estação meteorológica.....	78
6	Conclusões e trabalhos futuros.....	83
6.1	Conclusão .....	83
6.2	Trabalhos futuros .....	84
	Referências.....	87
	Anexos.....	91
	Anexo A .....	91
	Anexo B – Código implementado no Arduíno.....	95
	Anexo B1 – Código nó terminal.....	95
	Anexo B2 – Código nó <i>router</i> .....	99

Anexo B3 – Código estação meteorológica.....	102
Anexo C – Calibração do anemómetro .....	111
Anexo C1 – Calibração da velocidade do vento .....	111
Anexo C2 – Calibração da direção do vento.....	112
Anexo D .....	115



## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Sensor YL-83 e módulo LM393.....	9
Figura 2.2 - Pluviômetro de báscula.....	10
Figura 2.3 - Anemômetro de colheres. ....	11
Figura 2.4 - Anemômetro de hélices. ....	11
Figura 2.5 - Anemômetro de ultrassom. ....	12
Figura 2.6 - Sensor de radiação solar, piranômetro.....	12
Figura 2.7 – Sensor de radiação solar, saldo-radiômetro. ....	13
Figura 2.8 – Antena camuflada num poste de iluminação.....	14
Figura 2.9 – Antenas camufladas como placas de informação. ....	14
Figura 2.10 – Esquema de montagem da placa de informação como antena camuflada. ....	15
Figura 2.11 – a) antenas camufladas num candeeiro de rua; b) esquemático. ....	15
Figura 2.12 – Antena pintada de verde camuflada entre a folhagem. ....	16
Figura 2.13 – Antena pintada de castanho ocultada entre os ramos. ....	16
Figura 2.14 – Antena camuflada com folhas artificiais. ....	16
Figura 2.15 – Comparação do sinal recebido entre antenas de ganho elevado e baixo, para duas potências de transmissão. ....	19
Figura 2.16 – Arquitetura do sistema.....	21
Figura 2.17 - WASPMOTE. ....	21
Figura 2.18 - Aplicação <i>web</i> : a) Zonas de risco nas próximas 24h; b) Informação acerca dos sensores. ....	21
Figura 2.19 - Arquitetura do sistema MasliNET. ....	22
Figura 2.20 - a) coordenador/GPRS <i>gateway</i> , b) nó sensor, c) nó com câmara agregada, d) armadilha para insetos com câmara, e) nó sensor, f) o coordenador/ GPRS <i>gateway</i> com um painel solar. ....	22
Figura 2.21 - Protótipo do sistema.....	23
Figura 2.22 - Arquitetura do sistema. ....	23
Figura 2.23 - Ilustração dos nós sensores no terreno. ....	24
Figura 2.24 - Nó da rede ARTICA 1. ....	24
Figura 2.25 - Interface gráfica. ....	25
Figura 2.26 - Nó da rede ICARO 1.....	25
Figura 3.1 - Placa Arduino Fio: a) secção superior; b) secção inferior. ....	27
Figura 3.2 - XBee.....	28
Figura 3.3 – a) Antena monopolo; b) Diagrama de radiação. ....	29
Figura 3.4 – a) Agrupamento de antenas suspensas; b) Diagrama de radiação. ....	30
Figura 3.5 – a) Agrupamento de 8 elementos, antena biquad; b) Diagrama de radiação.....	30
Figura 3.6 - Ferramenta <i>Radio Range Test</i> , do <i>software X-CTU</i> .....	31
Figura 3.7 - Analisador de espectros, teste de potência.....	31
Figura 3.8 - Esquema de medição utilizado. ....	32
Figura 3.9 - Medição do RSSI e da qualidade das mensagens enviadas no terraço da universidade.....	33
Figura 3.10 - Princípio Huygens e zonas de Fresnel [38].....	33
Figura 3.11 - Comparação entre os valores de RSSI para o conjunto monopolo - monopolo....	34
Figura 3.12 - Comparação entre os valores de RSSI para o conjunto monopolo - biquad. ....	34
Figura 3.13 - Local das medições no parque de estacionamento. ....	35

Figura 3.14 - Medição do RSSI e da qualidade das mensagens enviadas no parque de estacionamento. ....	36
Figura 3.15 - Comparação entre os valores de RSSI para o conjunto monopolo - monopolo....	36
Figura 3.16 - Comparação entre os valores de RSSI para o conjunto suspensa – suspensa.....	37
Figura 3.17 - Local das medições na vegetação. ....	39
Figura 3.18 - Comparação da potência recebida para dois sistemas diferentes e para duas potências de transmissão.....	39
Figura 3.19 - Comparação da potência recebida após normalizada para dois sistemas diferentes e para as duas potências de transmissão.....	40
Figura 3.20 – Curvas correspondentes ao meio com obstáculos, com vegetação e espaço livre. ....	42
Figura 3.21 - Dimensões propostas para a antena omnidirecional [40]. ....	43
Figura 3.22 - Antena omnidirecional construída em laboratório.....	43
Figura 3.23 – a) SWR e impedância da antena construída; b) diagrama de radiação. ....	44
Figura 3.24 - Antena omnidirecional com refletor circular de alumínio.....	44
Figura 3.25 - SWR e impedância da antena com refletor circular de alumínio. ....	45
Figura 3.26 - Antena omnidirecional comercial. ....	45
Figura 3.27 - a) Antena omnidirecional comercial; b) Diagrama de radiação.....	45
Figura 3.28 - Dimensões do agrupamento de antenas suspensas proposto [42].....	46
Figura 3.29 - Agrupamento de antenas suspensas: a) vista frontal; b) vista posterior. ....	46
Figura 3.30 - Agrupamento de antenas suspensas: a) SWR e impedância da antena; b) Diagrama de radiação. ....	47
Figura 3.31 - <i>Radome</i> : a) interior; b) <i>radome</i> vedada.....	48
Figura 3.32 – a) SWR e impedância da antena; b) Diagrama de radiação. ....	48
Figura 4.1 - Esquema da rede, linha de comunicação.....	50
Figura 4.2 - Circuito do nó terminal. ....	54
Figura 4.3 - Fluxograma referente ao nó terminal: a) código principal; b) função ReadAndSend().....	55
Figura 4.4 – Omeron latching relay G6-JU-2FS-Y: a) relé; b) circuito interno do mesmo. ....	56
Figura 4.5 - Carregador solar MCP73871. ....	57
Figura 4.6 - Circuito do nó router.....	58
Figura 4.7 - Nó router: a) Painéis fotovoltaicos em paralelo; b) Caixa estanque com os respetivos componentes no interior.....	58
Figura 4.8- Nó router situado no terraço da Universidade. ....	59
Figura 4.9- Fluxograma referente ao nó router: a) código principal; b) função ReadAndSend(). ....	59
Figura 4.10- Circuito eletrónico do protótipo final do nó router.....	60
Figura 4.11 - Protótipo final: a) vista lateral; b) vista frontal. ....	60
Figura 4.12- Sensor SHT 11: a) anteparo contra radiação; b) localização do sensor; c) sensor de temperatura do ar e humidade relativa SHT11. ....	62
Figura 4.13 - Esquema de interligação entre o sensor e o microcontrolador.....	62
Figura 4.14 – Pluviómetro: a) secção interna; b) esquemático.....	63
Figura 4.15 - Circuito eletrónico do sensor MAX9929F. ....	64
Figura 4.16 - Circuito da estação meteorológica. ....	66
Figura 4.17 – Estação meteorológica: a) caixa estanque do nó sensor com os respetivos componentes no interior; b) estrutura final. ....	67
Figura 4.18 -Fluxograma referente à estação meteorológica: a) código principal; b) função ReadAndSend(); c) função CountRainmeter() e CountAnemometro(). ....	67

Figura 4.19 - Fluxograma da aplicação <i>web</i> .	69
Figura 4.20 - Interface gráfica da aplicação.	69
Figura 5.1 - Localização geográfica dos nós sensores.	71
Figura 5.2 - Nós sensores implementados: a) Nó 4; a) Nó 5; c) Nó_Terminal.	72
Figura 5.3 - Nível de sinal recebido (RSSI): a) Nó 3; b) Nó 4; c) Nó 5; d) Nó_Terminal.	73
Figura 5.4 - Tensão nas baterias: a) Nó 3; b) Nó 4; c) Nó 5; d) Nó_Terminal.	74
Figura 5.5 - Resultados do Nó_Terminal: a) temperatura do ar; b) humidade relativa.	74
Figura 5.6 - Resultados do nó 4: a) temperatura do ar; b) humidade relativa.	75
Figura 5.7 - Ligações testados.	76
Figura 5.8 - Local da medição entre o nó 13 e 14.	76
Figura 5.9 - Comportamento da bateria ao ser descarregada ao longo de 5 dias.	77
Figura 5.10 - Comportamento do painel solar ao carregar uma bateria descarregada.	78
Figura 5.11 - Valores da velocidade do vento ao longo de um mês.	78
Figura 5.12 - Comparação dos resultados da temperatura do ar.	79
Figura 5.13 - Comparação dos resultados da humidade relativa.	79
Figura 5.14 - Comparação dos resultados da velocidade do vento.	80
Figura 5.15 - Comportamento da bateria da estação ao longo de um dia.	80
Figura 5.16 - Comportamento do painel solar da estação ao longo de um dia.	81



## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Comparação entre os padrões de redes sem fios. ....	6
Tabela 2.2 – Parâmetros dos modelos COST 235, ITU-R e FITU-R. ....	18
Tabela 2.3 – Valores do expoente de perdas e da variância tendo em conta o terreno. ....	19
Tabela 3.1 - Principais características do XBee Series 2 e Pro. ....	28
Tabela 3.2 – Valores referentes à curva monopolo – monopolo do meio com obstáculos, utilizando o modelo log-normal. ....	37
Tabela 3.3 - Valores referentes à curva suspensa – suspensa do meio com obstáculos, utilizando o modelo log-normal. ....	38
Tabela 3.4 - Máxima variação da potência recebida em relação à curva de tendência no meio com vegetação. ....	41
Tabela 3.5 - Valores referentes ao meio com vegetação, utilizando o modelo log-normal. ....	41
Tabela 3.6 - Máximo alcance dos módulos XBee. ....	42
Tabela 3.7 - Distância ideal do acrílico à antena. ....	47
Tabela 4.1 - Dados acerca dos nós presentes na rede. ....	51
Tabela 4.2 – Ângulo entre as ligações. ....	51
Tabela 4.3 - RSSI esperado na linha de comunicação. ....	52
Tabela 4.4 - Consumo energético do nó terminal. ....	53
Tabela 4.5 - Características dos painéis fotovoltaicos. ....	57
Tabela 4.6 - Análise financeira do protótipo final do nó <i>router</i> . ....	61
Tabela 4.7 - Características do painel fotovoltaico M-05206. ....	65
Tabela 4.8 - Consumo energético da estação meteorológica. ....	65
Tabela 4.9 - Análise financeira da estação meteorológica. ....	68
Tabela 5.1 - Antenas e potência de transmissão utilizadas na linha de comunicação. ....	72
Tabela 5.2 - Valor de RSSI. ....	77



## Lista de Acrónimos

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
APS	<i>Application Support Sub-Layer</i>
AT	<i>Transparent Mode</i>
DATA	<i>Serial Data</i>
ED	<i>Event Detection</i>
CO	Monóxido de Carbono
CO2	Dióxido de Carbono
FTDI	<i>Future Technology Devices International</i>
EIRP	<i>Equivalent Isotropically Radiated Power</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IPMA	Instituto de Português do Mar e da Atmosfera
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
NWK	<i>Network Layer</i>
PAN ID	<i>Personal Area Network identifier</i>
PCI	<i>Peripheral Component Interconnect</i>
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
PHY	<i>Physical</i>
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SCK	<i>Serial Clock Input</i>
SM	<i>Sleep Mode</i>
SOM	<i>Self-Organizing Map</i>
SWR	<i>Standing Wave Ratio</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>



# 1 Prefácio

Este capítulo engloba uma pequena introdução ao trabalho seguida das principais motivações que moveram a concretização deste projeto, os objetivos propostos e, por fim, a estrutura deste relatório.

## 1.1 Introdução

As redes de sensores sem fios (RSSF) são uma tecnologia vocacionada para a recolha de informação do ambiente físico. Desta forma, está direcionada para monitorizar, estudar, instrumentar e potencialmente controlar as condições ambientais e físicas de modo a ser possível atuar sobre um determinado fenómeno ou acontecimento. Por sua vez, as informações recolhidas, após serem processadas, são encaminhadas por radiofrequência para um servidor, sendo na maioria das vezes disponibilizadas numa interface gráfica.

As RSSF consistem num determinado número de nós sensores distribuídos numa área de interesse. Cada nó regista os dados de uma determinada área e, posteriormente, um algoritmo de encaminhamento elege o trajeto mais adequado para levar esses mesmos dados ao servidor.

A inserção dos nós em ambientes reais tem por norma associado o problema da sua alimentação, visto que em muitos casos não é praticável a ligação à rede elétrica devido ao fato destes serem colocados em zonas de difícil acesso. Por esse mesmo motivo, torna-se necessário assegurar o funcionamento do nó pelo máximo tempo possível. Sendo fulcral a otimização do consumo de energia no processo de transmissão dos dados, sendo que esta é a atividade com maior consumo.

Graças à enorme variedade de sensores disponíveis, as RSSF podem ser utilizadas na medição de inúmeros fenómenos físicos, tais como: temperatura, humidade relativa, luminosidade, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, índice de radiação, entre outros. Relativamente às aplicações das RSSF, estas podem ser classificadas em cinco categorias: aplicações militares, aplicações na área da saúde, aplicações domésticas, aplicações industriais e monitorização ambiental. O presente trabalho insere-se na área da monitorização ambiental.

## 1.2 Motivação

Até à data, a ilha da Madeira dispõe de alguns sistemas de medição da temperatura do ar, humidade relativa e velocidade e direção do vento junto da costa e de alguns picos. Contudo, faltam sistemas de monitorização ao longo das encostas.

Com este projeto pretende-se estudar a instalação de uma linha de comunicação de suporte à monitorização ambiental nas encostas da Ilha da Madeira, nomeadamente entre o Funchal e o Pico do Arieiro.

Tendo em conta os acontecimentos dos últimos anos, a Ilha da Madeira tem sido afetada pelo flagelo dos fogos florestais, queimando uma imensa quantidade de área florestal, maioritariamente na época de Verão, devido às temperaturas elevadas e ventos fortes. Assim, a colocação destes sistemas de monitorização nas encostas é de enorme interesse no que diz respeito à prevenção de um possível incêndio, por exemplo.

Como tal, torna-se necessário estudar a propagação do sinal em meios com obstáculos e meios com vegetação, bem como estudar possíveis locais de implementação da rede. Por último, é necessário estudar qual a tecnologia mais apropriada a utilizar na linha de comunicação que vá de encontro aos requisitos da aplicação.

### **1.3 Objetivos**

O primeiro objetivo deste projeto foi o estudo da propagação do sinal de modo a tornar possível a implementação de uma rede de sensores sem fios, mais precisamente uma linha de comunicação de suporte à monitorização ambiental entre o Funchal e o Pico do Arieiro.

As redes de sensores sem fios permitem a monitorização em tempo real de eventos de interesse. Como tal foi necessário efetuar um estudo acerca de quais os sensores de interesse à monitorização de espaços ambientais.

Um outro objetivo a ser estudado está relacionado com a otimização do consumo energético dos nós sensores. Em ambientes florestais a alimentação destes sistemas provém de baterias. Assim, é importante a captação de energia do meio envolvente, com as principais fontes de energia a solar, a hídrica ou a eólica, de modo a assegurar uma maior durabilidade da rede de sensores a nível energético.

Por último, a visualização dos dados provenientes da linha de comunicação será disponibilizada numa aplicação *web*, com a possibilidade de acesso em tempo real por parte do utilizador.

### **1.4 Estrutura da dissertação**

O presente documento encontra-se dividido em 6 capítulos, estruturados da seguinte forma:

- **Capítulo 1 – Prefácio** – Este capítulo tem como intuito apresentar as motivações que levaram à realização do trabalho, assim como os objetivos a serem cumpridos.

- **Capítulo 2 – Monitorização ambiental** – Neste capítulo é efetuada uma introdução a alguns conceitos e sistemas importantes à monitorização ambiental necessários para compreender e fundamentar as decisões tomadas no decorrer da realização do trabalho.
- **Capítulo 3 – Estudo da propagação** – Neste capítulo apresentam-se os dispositivos de comunicação e de processamento utilizados, os sistemas de medição e, por último, os resultados referentes aos diferentes meios de propagação estudados.
- **Capítulo 4 – Desenvolvimento dos módulos e do *software*** – Neste capítulo apresentam-se os requisitos necessários para a implementação do sistema, qual o esquema da rede, bem como todo o processo de desenvolvimento dos nós sensores. Documenta-se, também, o funcionamento da aplicação para a visualização dos parâmetros recolhidos pela rede.
- **Capítulo 5 – Testes e resultados** – Este capítulo disponibiliza os testes e resultados alcançados no decorrer deste projeto.
- **Capítulos 6 – Conclusões e trabalhos futuros** – Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais do presente trabalho e são, ainda, expostas algumas propostas para trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos.



## 2 Monitorização Ambiental

No presente capítulo são apresentados alguns conceitos e sistemas importantes à monitorização ambiental. Inicialmente, salientam-se os componentes fundamentais de uma rede de sensores sem fios, os principais cenários onde estas são aplicadas no âmbito ambiental e alguns sensores de interesse ao projeto. De seguida é efetuado um pequeno estudo acerca da melhor forma de integrar os componentes de comunicação no meio e faz-se referência aos modelos de propagação mais comuns para ambientes com vegetação. Por fim, são mencionados alguns sistemas existentes no âmbito do tema do projeto.

### 2.1 Redes de sensores sem fios

Nos últimos anos, as redes de sensores sem fios têm sido alvo de inúmeros projetos de pesquisa e desenvolvimento, constituindo, assim, um novo domínio da monitorização remota. Esta evolução tem sido possível devido à veloz convergência de três tecnologias: microssistemas eletromecânicos, comunicação sem fios e microprocessadores [1]. Resumidamente as RSSF têm como objetivo a recolha, a coleção e a entrega, ou seja, encaminhar automaticamente pela rede os dados recolhidos pelos diversos sensores de modo que estes possam ser analisados e tratados pelos observadores.

As redes de sensores sem fios são consideradas como um caso particular de rede *Ad Hoc* (*MANET – Mobile Ad Hoc Network*). Os nós sensores comunicam diretamente entre si, permitindo a entrada na rede de novos elementos e a sua saída da rede sem que o funcionamento da mesma seja afetado [2].

As RSSF comportam os seguintes elementos:

- **Nó sensor** - É responsável pela monitorização de um determinado fenómeno e por transmitir essa informação a um observador [3]. É constituído por quatro componentes essenciais: fonte de energia (bateria), em que na escolha deve ser tido em conta a capacidade, o volume e as condições de temperatura; dispositivo de comunicação, que inclui o sistema de transmissão, receção, amplificação e antena, sendo este o responsável pela troca de informação entre os vários nós sensores da rede [4]; controlador, responsável pelas rotinas do funcionamento do nó sensor, ou seja, está encarregue não só pelo processamento de dados enviados pelos sensores, bem como pelo controlo dos períodos de amostragem e pela comunicação; memória, sendo responsável por guardar temporariamente as leituras efetuadas pelos sensores antes destas serem transmitidas, bem como o código dos programas que dirigem o funcionamento dos sensores.

- **Observador** - É o usuário final, aquele que estabelece consultas à rede de sensores com o intuito de estudar e obter informação relativamente aos fenômenos [3].
- **Fenómeno** - É definido como o objeto de estudo, ou seja, os parâmetros que estão a ser monitorizados pela rede de sensores [3].

Tendo em consideração o principal objetivo das RSSF, um aspeto que se torna relevante abordar é a comunicação entre nós sensores e qual o protocolo de rede a utilizar. A comunicação entre nós é realizada através de radiofrequência e baseada num padrão de redes sem fio. Existem diversos padrões, entre eles os que mais se destacam são: o padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi), o padrão IEEE 802.15.1 (Bluetooth) e o padrão IEEE 802.15.4 (ZigBee). Na tabela 2.1 é feita uma comparação entre as principais características dos três padrões mencionados.

**Tabela 2.1 - Comparação entre os padrões de redes sem fios.**

	Padrões		
	IEEE 802.11g	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4
<b>Alcance</b>	50 – 100 m	10 – 100 m	10 – 100 m
<b>Banda de Frequência</b>	2,4 – 5 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz
<b>Complexidade</b>	Elevada	Elevada	Baixa
<b>Consumo Energético</b>	Elevado	Médio	Baixo

Tendo em conta que as aplicações sem fios em causa necessitam de um baixo consumo de energia e não precisam de alta taxa de dados, o padrão ZigBee é considerado a melhor solução pois apresenta um baixo consumo de energia e baixa complexidade de implementação. Um dos principais propósitos do desenvolvimento do padrão ZigBee foi descrever um protocolo que tornasse possível os diferentes fabricantes produzirem dispositivos compatíveis entre si [5].

O padrão ZigBee é implementado sobre o padrão IEEE 802.15.4. O padrão IEEE 802.15.4 define as duas camadas mais baixas do nível: a camada física (PHY, *Physical*) e a camada de acesso ao meio (MAC, *Medium Access Control*). O padrão ZigBee implementa as camadas de mais alto nível: a camada de rede (NWK, *Network Layer*) e a camada de aplicação (APS, *Application Support Sub-Layer*) [7].

Este padrão apresenta três tipos de dispositivos lógicos [8]. O coordenador, que é o responsável pela inicialização da rede, pela associação à rede, pela manutenção da mesma, entre outras funções. O *router*, que é o responsável por encaminhar dados através da rede, ou seja, envia e recebe dados permitindo que seja possível expandir a rede e, desse modo, atingir um maior alcance. O *End Device*, que, ao contrário dos anteriores, não permite encaminhamento de dados, apenas comunica com um *router* ou coordenador, possibilitando um menor consumo de energia ao ser colocado no modo adormecido.

Relativamente às topologias, a rede suporta três tipos [8]:

- Estrela (*star*) – É a topologia menos complexa, pois é constituída por um coordenador e vários nós terminais, sendo as decisões apenas efetuadas pelo nó coordenador.
- Árvore (*tree*) - Existe somente uma rota entre um par de nós, o que torna o encaminhamento uma tarefa fácil, sendo a distribuição feita de forma hierárquica, onde na raiz está o coordenador, de seguida o nó *router* e por fim o nó terminal.
- Malha (*mesh*) – Neste caso existem vários percursos para o encaminhamento da informação, o que faz com que a falha de um nó sensor não inviabilize o envio dos dados por parte dos nós vizinhos.

A escolha da topologia depende da aplicação. Em aplicações ambientais, as redes de sensores sem fios podem ser utilizadas para monitorizar parâmetros de interesse em inúmeras situações. Permitem identificar mudanças em *habitats* e detetar microclimas através da recolha de parâmetros como a temperatura, humidade, vento, movimento, etc. Servem de auxílio a biólogos e ecologistas para uma melhor compreensão relativamente ao comportamento da fauna e da flora de determinada região através da monitorização de ecossistemas e *habitats* naturais [9].

As redes de sensores podem ser utilizadas na deteção e prevenção de incêndios, podendo-se recorrer, para tal, a um conjunto de nós sensores fixos, estações, de modo a monitorizar os parâmetros de temperatura, humidade relativa, velocidade do vento, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [9].

O aquecimento global tem vindo a provocar condições climatéricas adversas. Nomeadamente, o aumento da temperatura e a escassez de água provocam uma baixa produtividade na agricultura, devido aos solos pouco profundos e à baixa fertilidade, o que leva a que as redes de sensores sem fios sejam vistas como uma forma de rentabilizar, alertando o agricultor quais as parcelas com maior rentabilidade, qual o melhor método de irrigação, etc. Ainda, respetivamente à área da agricultura, são comumente monitorizadas condições atmosféricas, tais como a temperatura, a humidade do solo, a humidade relativa, a pressão atmosférica e a radiação solar de modo a prever e acompanhar as pragas nas plantações [9].

No que concerne ao controlo de parâmetros químicos, biológicos e hidrológicos uma vez mais as RSSF ganham destaque, pois podem ser empregues na deteção da contaminação das águas garantindo, assim, a qualidade das mesmas para consumo doméstico.

Como último exemplo tem-se a poluição atmosférica, nomeadamente a circulação automóvel, tornando-se fulcral a obtenção de informação acerca da qualidade do ar em espaços urbanos e suburbanos, sendo, para isso, útil a utilização de uma rede de sensores sem fios [9].

## 2.2 Sensores de interesse

Atualmente existem no mercado inúmeros tipos de sensores essencialmente vocacionados às seguintes áreas: ambiente, medicina, biologia, militar, segurança e controlo. A escolha adequada a utilizar passa pelo cenário de aplicação pretendido. Os sensores que se destacam no campo de ação das RSSF são os dotados de saídas elétricas, pois permitem a monitorização de modo automático e independente. Os sinais de saída podem ser na forma de corrente, tensão ou resistência, possibilitando assim a transmissão na forma analógica ou digital [10]. De seguida são apresentados alguns sensores de interesse no âmbito da monitorização ambiental, bem como o seu princípio de funcionamento.

### 2.2.1 Sensor de temperatura do ar e humidade relativa

Na medição da temperatura são utilizados dois tipos de sensores, o termopar e o termistor. No que concerne à medição da humidade relativa, os sensores baseiam-se num princípio capacitivo [11]. Tendo em conta que muitas marcas oferecem um único sensor que combina a medição de temperatura e humidade, esta torna-se a opção mais atrativa.

O princípio de funcionamento do sensor de temperatura consiste num detetor resistivo (de platina), que por sua vez apresenta uma variação direta da resistência com a temperatura. Deste modo, a medição da resistência obtida em tempo real por um circuito eletrónico permite a determinação da temperatura [11]. Na escolha do modelo, os principais focos a procurar é que apresentem um tempo de resposta rápido, uma excelente qualidade de sinal e que garantam um baixo consumo de energia.

### 2.2.2 Sensor de luminosidade

O princípio dos sensores de luminosidade, sensores fotoelétricos, baseia-se na conversão de um sinal luminoso num sinal elétrico. Por sua vez, a energia luminosa pode ser convertida em energia elétrica. Como exemplos tem-se as fotocélulas, os LDR (*Light Dependent Resistor*), os foto-díodos, etc. Na escolha de um sensor fotoelétrico as principais características que devem ser tidas em consideração são a sensibilidade, a resposta espectral e a velocidade [12].

Os LDR são sensores do tipo fotocondutivo. Quanto maior for o sensor maior é a capacidade de controlar correntes mais intensas. Os elétrodos formam uma estrutura em ziguezague, de forma a maximizar a superfície sensível, superfície esta à base de Sulfeto de Cádmio [12]. A medição da luminosidade é efetuada com base na quantidade de luz que incide na superfície em questão, o que faz variar o valor da resistência. Quando não há presença de luminosidade a resistência típica deste tipo de sensores pode atingir 1 M $\Omega$ , sob iluminação direta o valor da resistência baixa, podendo mesmo ser inferior a 100  $\Omega$ .

Relativamente às fotocélulas a superfície é formada por junções de silício e novamente a medição é realizada com base na quantidade de luz que incide na superfície [12]. Neste caso é gerada uma tensão elétrica em função da quantidade da luz. De acordo com o mesmo princípio de funcionamento que as fotocélulas tem-se os foto-díodos.

Os foto-díodos baseiam-se na libertação de portadores de carga nas junções quando há incidência de luz. Estes podem operar em dois modos diferentes, no modo fotocondutivo ou no modo fotovoltaico [12]. No modo fotocondutivo a resistência no sentido inverso da junção iluminada diminui, ou seja, aproveita a variação da resistência inversa com a luminosidade. No modo fotovoltaico, tal como no caso das fotocélulas, faz uso da tensão gerada em função da quantidade de luz. Os foto-díodos são comumente utilizados em aplicações cuja velocidade de resposta é importante, pois permitem detetar pulsos de luz ou sombra rapidamente.

### 2.2.3 Sensor de pluviosidade (pluviómetro)

Na medição da pluviosidade podem ser utilizados pluviómetros. Estes permitem medir a intensidade de precipitação [13].

Um sensor amplamente utilizado é o YL-83, sendo constituído por uma placa com vários trilhos em ambos os lados (resistentes à oxidação). Por sua vez a placa encontra-se ligada ao módulo principal, ou módulo de controlo. Este módulo contém um comparador LM393 que lê a informação recolhida pelo sensor e envia os dados pelos pinos, ou seja, trata da comunicação entre o sensor e o microcontrolador [14]. Na figura 2.1 encontra-se ilustrado o sensor e o módulo principal.



Figura 2.1 - Sensor YL-83 e módulo LM393.

Existem dois modos de funcionamento, em que num dos modos é utilizada a saída digital, enquanto o outro faz uso da saída analógica.

A saída digital permite detetar presença ou ausência de chuva/líquido através de um potenciómetro calibrado. A saída analógica, fazendo mais uma vez uso do potenciómetro, apresenta valores a variar entre 0 e 1023 de acordo com a quantidade

de precipitação que atinge a placa. Assim sendo, este modo de funcionamento supera o anterior pois permite não só averiguar se está a chover, bem como saber se a chuva é fraca, moderada ou forte [14]. Contudo, apesar da sua enorme simplicidade este sensor não oferece grande informação.

Um outro tipo de pluviómetro, bem mais preciso que o anterior, é o pluviómetro de báscula. Este é composto por um balde em forma de funil que recolhe a precipitação e por sua vez encaminha-a para um sistema de báscula composto por uma haste apoiada no centro [15], em forma de uma “gangorra”. O exemplo pode ser visto na figura 2.2.



**Figura 2.2 - Pluviómetro de báscula.**

Relativamente ao seu funcionamento é simples, a cada comutação da báscula, ou seja, a cada unidade de medida preenchida, é gerado um impulso elétrico que por sua vez é enviado para uma saída analógica do microcontrolador, registando e acumulando o número de comutações [13].

#### **2.2.4 Sensores de Vento (anemómetro)**

Existem várias soluções no que diz respeito à monitorização da velocidade do vento. Contudo, as que mais se destacam são os anemómetros de copos, hélice e ultrassom, sendo os dois primeiros os mais utilizados.

O anemómetro de copos é composto por um eixo vertical no qual está montado um conjunto de copos que se movimenta de acordo com o vento (figura 2.3). Quanto mais elevada a velocidade de vento mais rápido gira o eixo [16]. A principal vantagem deste género de anemómetro cai no facto de não ser necessário orientar os copos na direção do vento. Na medição da velocidade do vento o sensor utiliza um *reed switch*.



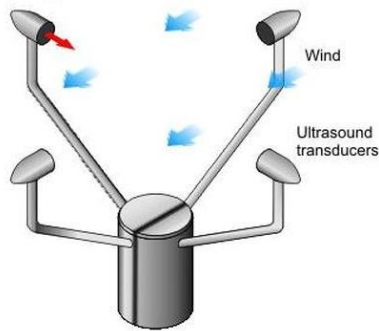
**Figura 2.3 - Anemômetro de colheres.**

O anemômetro de hélice, como mostra a figura 2.4, utiliza uma turbina de eixo horizontal. Ao contrário do anemômetro de copos, que não necessita de estar orientado na direção do vento, este necessita, de um sistema de direcionamento. Assim, de modo a que o eixo siga a mudança do vento o anemômetro combina uma hélice e uma cauda de barbatana no mesmo eixo [16].



**Figura 2.4 - Anemômetro de hélices.**

Por último tem-se o anemômetro ultrassônico, considerado o mais complexo entre os exemplos apresentados. Faz uso de ondas ultrassônicas para efetuar a medição da direção e da velocidade do vento. Como é possível visualizar pela figura 2.5, existem dois pares de dispositivos de ultrassom de frente um para o outro a uma distância compreendida entre 5 a 20 cm. Por sua vez estes dispositivos recebem e enviam ondas sonoras para a frente e para trás medindo, assim, a rapidez a que o vento viaja entre elas, bem como a sua direção [17].



**Figura 2.5 - Anemómetro de ultrassom.**

Estes anemómetros são extremamente precisos nas suas medições, mas são mais complexos e requerem um elevado consumo energético.

### **2.2.5 Sensor de radiação solar**

A medição da radiação solar baseia-se na convergência de raios solares, isto é, na soma das componentes de radiação direta e radiação difusa, sendo usualmente expressa em  $W/m^2$ . Os sensores podem ser divididos em dois grupos, piranómetros e saldo-radiómetros [18].

O princípio de funcionamento do piranómetro baseia-se na medição da quantidade de radiação solar, proveniente de todo o hemisfério, que atinge uma determinada superfície plana. O sensor é constituído por um disco de cerâmica composto por uma série de termopares dispostos radialmente criando uma termopilha. Os terminais “frios” dos termopares são revestidos com sulfato de bário e os terminais “quentes” são pintados com tinta negra [18]. Os terminais quentes estão situados no centro do disco de modo a que constituam um arranjo rotacional simétrico, sendo a periferia do disco constituída pelos terminais frios e por um dissipador de calor. Deste modo, a radiação absorvida pelo sensor origina um fluxo de calor radial na direção da periferia do disco, resultando no aumento da temperatura no centro do disco devido à sua resistência térmica [19]. Logo, a resposta do piranómetro depende diretamente da condutividade térmica do disco, bem como da potência termoelétrica do material dos termopares. Na figura 2.6 é possível observar um dos vários modelos de piranómetros existentes no mercado.



**Figura 2.6 - Sensor de radiação solar, piranómetro.**

Relativamente ao saldo-radiómetro, este é utilizado na medição do saldo de radiação, que por sua vez é a diferença entre os ganhos e as perdas. Os ganhos (fluxo ascendente) dizem respeito à radiação global e à radiação infravermelha emitida da atmosfera para a superfície terrestre. Relativamente às perdas (fluxo descendente), tem-se a radiação refletida e emitida pela própria superfície terrestre [20]. O sensor possui um elemento sensível que geralmente é constituído por duas placas retangulares de resina sintética, sendo que uma face é polida e a outra face é enegrecida [18]. As duas faces polidas são fixadas uma na outra, orientadas horizontalmente, de modo que as faces enegrecidas fiquem uma voltada para o céu e uma para o solo (Figura 2.7), absorvendo tanto os fluxos descendentes como os ascendentes da energia radiante. Por sua vez a radiação absorvida é proporcional à temperatura de cada placa. Deste modo, o circuito eletrónico é responsável pela medição do aquecimento diferencial, estando este diretamente relacionado com o saldo de radiação [18].



Figura 2.7 – Sensor de radiação solar, saldo-radiómetro.

### 2.3 Integração dos componentes de comunicação no meio ambiente

No desenvolvimento de sistemas para a monitorização ambiental é necessário ter em consideração o impacto ambiental criado pelos mesmos. Na última década um aspeto que foi frequentemente mencionado como barreira à implantação de novas antenas refere-se ao impacto urbanístico, paisagístico e ambiental, principalmente no que concerne a espaços de carácter predominantemente turístico [21]. Por esse motivo cada vez mais recorre-se a soluções dissimuladas, tais como: camuflagem, ocultação e integração, diminuindo assim o impacto visual [22]. É importante salientar que estas soluções não melhoram a qualidade do sinal, apenas são utilizadas de modo a não ferir a envolvente arquitetónica.

A solução a ser utilizada depende não só do projeto, como da paisagem em questão. Exemplos de sistemas camuflados são as antenas utilizadas em comunicações, estações base, que por norma têm a forma de chaminés, de anúncios publicitários e de árvores. Tendo em conta o tema do projeto, de seguida é possível visualizar algumas antenas de dimensões reduzidas.

### 2.3.1 Antenas camufladas no meio urbano e suburbano

É comum a camuflagem de antenas de pequena dimensão em zonas urbanas e suburbanas, tais como, zonas residenciais, parques, jardins, praças, etc. Os materiais maioritariamente utilizados na camuflagem são fibra de vidro, acrílico e PVC (*Polyvinyl chloride*). As formas de disfarce mais encontradas são postes de iluminação e placas de informação, entre outras [23].

Os postes de iluminação, com exterior artístico, têm um excelente disfarce. A antena diretiva ou omnidirecional é instalada num polo e num outro separado é instalada a lâmpada. Na figura 2.8 está ilustrada uma antena omnidirecional com 9 dBi de ganho e com polarização vertical. O material utilizado na camuflagem foi fibra de vidro [23].



Figura 2.8 – Antena camuflada num poste de iluminação.

Já as placas de informação não só satisfazem os requisitos de comunicação como ajudam na divulgação da informação presente na placa, como mostra a figura 2.9. A antena aqui demonstrada é uma antena direcional, com polarização vertical e um ganho de 8 dBi. Na figura 2.10 é possível visualizar o esquema de montagem da antena e da placa de informação.



Figura 2.9 – Antenas camufladas como placas de informação.

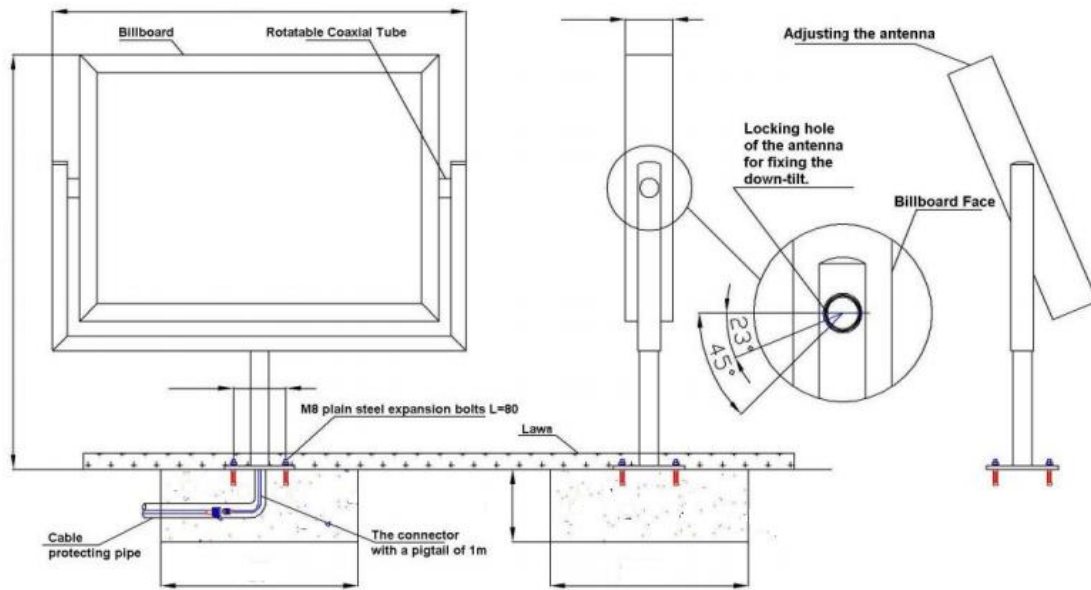


Figura 2.10 – Esquema de montagem da placa de informação como antena camuflada.

Quando são desejadas antenas de menor ganho é comum optar por candeeiros de rua pequenos. A antena tem um ganho de 4,5 dBi, polarização vertical e o material utilizado na sua camuflagem foi o acrílico [23]. Na figura 2.11 encontra-se ilustrada a antena camuflada bem como um esquemático para uma melhor compreensão.

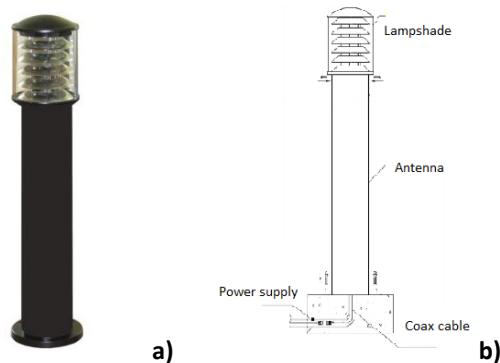


Figura 2.11 – a) antenas camufladas num candeeiro de rua; b) esquemático.

### 2.3.2 Antenas camufladas na vegetação

No que concerne a antenas camufladas no meio da vegetação uma das soluções mais fáceis e usuais passa por pintar a antena de modo que a mesma se misture com o ambiente onde será colocada. Normalmente as antenas são pintadas de verde e/ou castanho [24]. Há que ter especial atenção nas tintas ou *sprays* a utilizar. O ideal é evitar tintas que possuam propriedades metálicas, visto que estas podem introduzir reflexões no sinal, diminuindo a qualidade do mesmo [24]. Nas figuras 2.12 e 2.13 podem ser vistos exemplos de antenas camufladas no meio da vegetação.



**Figura 2.12 – Antena pintada de verde camuflada entre a folhagem.**



**Figura 2.13 – Antena pintada de castanho ocultada entre os ramos.**

Um outra solução de fácil implementação e com resultados atrativos passa por revestir a antena com folhas artificiais. Esta solução não tem impacto no desempenho da antena [25]. Um exemplo desta camuflagem está ilustrado na figura 2.14.



**Figura 2.14 – Antena camuflada com folhas artificiais.**

## 2.4 Modelos de propagação

Existem três tipos de modelos de propagação: empíricos; semi-empíricos; teóricos. Os modelos empíricos são baseados em medições práticas, permitindo calcular a atenuação média do sinal na área em questão, tendo em conta todos os fenómenos que atenuam o sinal. No que diz respeito aos modelos teóricos, são mais precisos, mas são computacionalmente intensivos e apresentam uma grande dependência de uma base de dados com as características ambientais [26]. Os semi-empíricos são uma combinação dos dois modelos anteriores.

Nesta secção serão descritos alguns dos modelos mais relevantes, por exemplo, o modelo do espaço livre, o modelo log-normal e alguns modelos característicos para meios com vegetação.

### 2.4.1 Modelo de atenuação em espaço livre

O modelo do espaço livre deve ser utilizado quando existe linha de vista entre o emissor e o recetor, ou seja, quando as antenas estão em espaço aberto. Este modelo é válido para situações em que o primeiro elipsoide de *Fresnel* encontra-se livre de obstáculos.

O modelo teórico válido para o cálculo das perdas de transmissão no espaço livre corresponde à perda de percurso descrita na fórmula de Friis, sendo normalmente descrito da seguinte forma:

$$PL_{FS}(dB) = 32,44 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d) \quad (2.1)$$

onde  $PL_{FS}$  corresponde à atenuação do espaço livre (dB),  $f$  é a frequência em GHz e  $d$  a distância entre a antena emissora e recetora em metros.

### 2.4.2 Modelo log-normal

O modelo da log-normal considera que a atenuação do sinal tem um decaimento logarítmico com a distância do emissor, sendo definido por,

$$P_{LN} = P_L(d_o) + 10n\log_{10}\left(\frac{d}{d_o}\right) + X_\sigma \quad (2.2)$$

onde  $P_L(d_o)$  corresponde à perda de percurso para uma distância de referência  $d_o$ , normalmente 1 metro,  $n$  é o expoente de perda de percurso,  $d$  é a distância em metros entre o recetor e o emissor,  $X_\sigma$  é uma variável aleatória gaussiana de média nula e  $\sigma$  é a variância.

A atenuação média introduzida por um determinado meio de propagação pode ser caracterizada pelos valores de  $P_L(d_o)$  e  $n$ .

### 2.4.3 Modelos de propagação na vegetação

A vegetação provoca a absorção da onda eletromagnética nela incidente, o que causa uma atenuação adicional em relação ao espaço livre [27]. Os modelos que se seguem apresentam uma estimativa da atenuação suplementar devido à vegetação que é encontrada no percurso em linha de vista.

Um dos primeiros modelos a surgir foi o modelo de Weissberger, também conhecido como o modelo de Decaimento Exponencial Modificado para a atenuação através das árvores. Este modelo é válido para a gama de frequência desde os 230 MHz até aos 96 MHz [28]. As expressões para o decaimento do sinal são:

$$L(dB) = \begin{cases} L = 0,45f^{0,284}d & 0 \leq d \leq 14m \\ L = 1,33f^{0,284}d^{0,588} & 14m \leq d \leq 400m \end{cases} \quad (2.3)$$

onde  $f$  é a frequência em GHz e  $d$  corresponde à profundidade nas árvores ao longo do percurso, em metros. A atenuação prevista por este modelo deve ser somada à atenuação do espaço livre e à atenuação devido a quaisquer outros obstáculos que não sejam vegetação [28].

Este modelo é adequado para situações onde a propagação é feita através da copa da árvore e não por difração. Para as frequências entre 450 MHz e 950 MHz a diferença de atenuação é cerca de 3 a 5 dB entre as árvores com e sem folhas [29].

Com base no modelo de Weissberger, surgiram outros modelos, tais como, o modelo COST 235, ITU-R e FITU-R [28]. A equação para a atenuação na vegetação é a mesma que para o modelo de referência, ou seja,

$$L(dB) = A \times f^B \times d^C \quad (2.5)$$

onde  $f$  é a frequência em GHz,  $d$  corresponde à profundidade nas árvores ao longo do percurso em metros e  $A$ ,  $B$  e  $C$  são os parâmetros para cada um dos modelos referidos. Na tabela 2.2 podem ser vistos os valores de cada um dos parâmetros para os diferentes modelos. Nos modelos COST 235 e no FITU-R existe a diferenciação de acordo com a sazonalidade, com ou sem folhas, pois no outono as árvores tendem a perder suas folhas.

**Tabela 2.2 – Parâmetros dos modelos COST 235, ITU-R e FITU-R.**

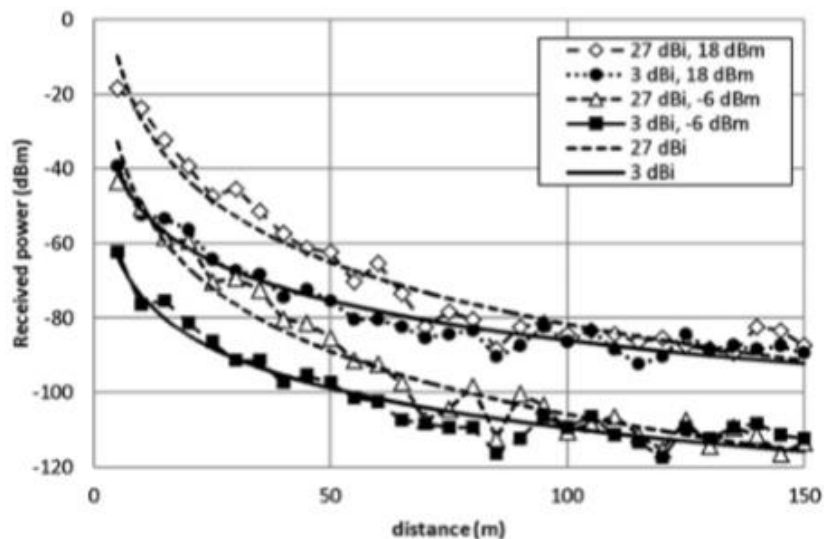
Modelo	Parâmetros		
	A	B	C
ITU-R	0,2	0,3	0,6
COST 235 (Com folhas)	15,6	-0,009	0,26
COST 235 (Sem folhas)	26,6	-0,2	0,5
FITU-R (Com folhas)	0,39	0,39	0,25
FITU-R (Sem folhas)	0,37	0,18	0,59

Fanimokun e Frolik [29] desenvolveram um modelo que se baseia nos parâmetros do modelo de propagação log-normal. As medições foram realizadas entre os 5 m e os 65 m, para a banda de frequência de 915 MHz e para três situações diferentes, sendo elas, em espaço aberto, na floresta e em floresta/outeiros. O emissor encontrava-se colocado 10 m acima do solo e como recetor foi utilizado um analisador de espectros [29]. Os parâmetros do modelo foram obtidos por regressão linear, sendo apresentados na tabela 2.3.

**Tabela 2.3 – Valores do expoente de perdas e da variância tendo em conta o terreno.**

Terreno	Parâmetros	
	$n$ (dB)	$\sigma$ (dB)
Aberto	3,41	4,7
Floresta	2,35	4,37
Floresta/Outeiros	2,9	4,17

Também com base no modelo log-normal, foi desenvolvido um estudo que avalia a influência das antenas na perda de percurso [30]. A figura 2.15 apresenta um exemplo dos resultados obtidos. A frequência utilizada foi de 2,4 GHz e faz-se a comparação entre a utilização de um par de monopolos com 3 dBi de ganho total, comparativamente com um par de matrizes biquad de 27 dBi de ganho total. A potência recebida foi obtida por duas potências de transmissão, de -6 dBm e 18 dBm [30].



**Figura 2.15 – Comparação do sinal recebido entre antenas de ganho elevado e baixo, para duas potências de transmissão.**

Concluiu-se que as antenas de maior ganho introduzem maior atenuação na potência recebida. As várias experiências realizadas apontam para que os sinais refratados e difratados que chegam à antena recetora podem chegar em diferentes ângulos de azimute.

A partir deste estudo foi desenvolvido um modelo que permite estimar a atenuação introduzida por um determinado meio para antenas com um determinado ganho tendo em consideração a atenuação introduzida nesse meio por uma antena de referência. É válido para distâncias até 400 m, sendo muito útil para projetos relacionados com redes de sensores sem fio em florestas ou cidades. A equação proposta é uma modificação da equação log-normal,

$$PL(dB) = P_L(d_0)_{ref} + 10(n_{ref} + n_A) \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (2.6)$$

com,

$$PL(d_0)_{ref} = 20 \log \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad \text{e} \quad n = n_{ref} + n_A \quad (2.7)$$

onde  $PL(d_0)_{ref}$  é o  $P_L(d_0)$  para o espaço livre,  $n_{ref}$  é o novo expoente da perda de percurso para uma antena de referência, normalmente um dipolo de meio comprimento de onda e  $n_A$  a contribuição para a perda de percurso, definida nesse trabalho por uma expressão em função do ganho das antenas, da distância e da frequência.

## 2.5 Sistemas de monitorização ambiental

Os sistemas de monitorização ambiental permitem medir vários parâmetros de interesse. Através destes pode-se identificar e reportar mudanças de *habitat*, riscos de incêndio, águas contaminadas, controlo de pragas em plantações, etc. De seguida serão apresentados alguns exemplos de sistemas de monitorização baseados em redes de sensores sem fios.

### 2.5.1 Sistema “SISVIA Vigilancia y Seguimiento Ambiental”

O SISVIA Vigilancia y Seguimiento Ambiental é um sistema de monitorização e deteção de incêndios florestais. Este proporciona a diferentes organizações uma infraestrutura de monitorização ambiental, com a capacidade de receber alertas e alarmes de modo a combater rapidamente os incêndios [31]. Este sistema apresenta três partes principais, a rede de sensores sem fios, a rede de comunicação e o centro de receção. Na figura 2.16, é possível visualizar um diagrama geral do sistema em questão.

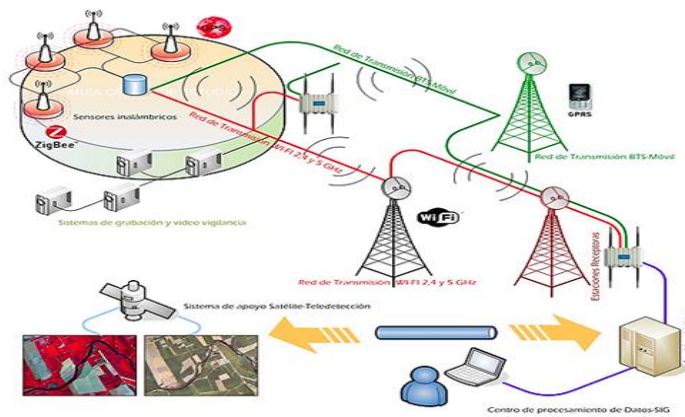


Figura 2.16 – Arquitetura do sistema.

Os nós sensores utilizados neste sistema são os WASPMOTE (figura 2.17), sendo utilizado o protocolo ZigBee. Os nós recolhem informações acerca da temperatura, da humidade relativa, do monóxido de carbono (CO) e do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O nó sensor está no modo adormecido a maior parte do tempo de modo a poupar a energia da bateria e a cada cinco minutos acorda, mede os valores e envia através de uma comunicação sem fios [31]. Cada dispositivo é alimentado por baterias e painéis solares.



Figura 2.17 - WASPMOTE.

Na figura 2.18 é possível visualizar a aplicação *web* responsável pelo acesso à informação e apoio à gestão do processo de monitorização e deteção de fogos.

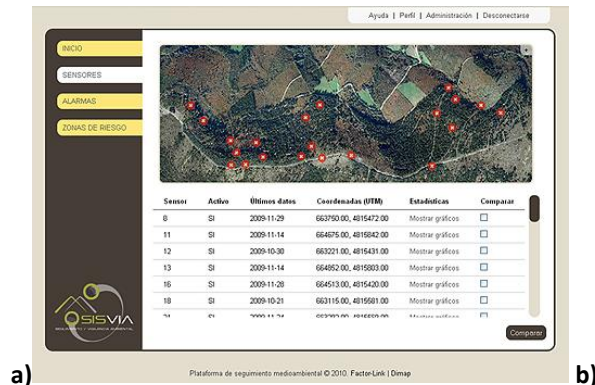
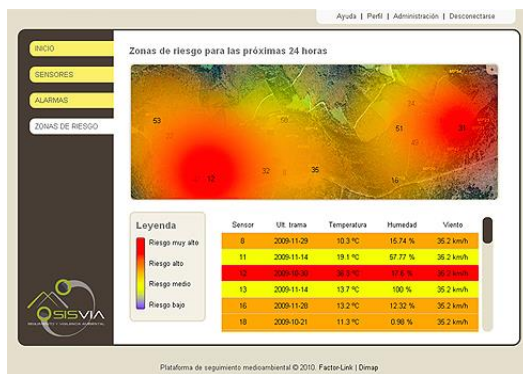


Figura 2.18 - Aplicação *web*: a) Zonas de risco nas próximas 24h; b) Informação acerca dos sensores.

## 2.5.2 Sistema MasliNET

O MasliNET foi desenvolvido em 2008 na Universidade de Zagreb (FER), na Croácia, para monitorizar as condições climáticas de modo a evitar o aparecimento de pragas em oliveiras. É um sistema baseado numa rede de sensores sem fio de baixa potência, uma camada de acesso à Internet e um servidor central [32]. Na figura 2.19 está ilustrada a arquitetura base do sistema MasliNET.

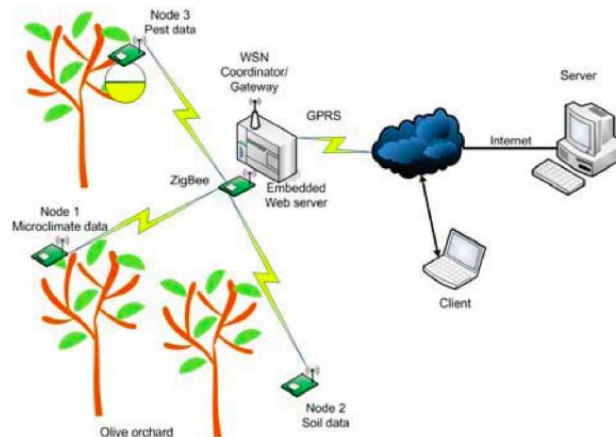


Figura 2.19 - Arquitetura do sistema MasliNET.

O nó sensor é baseado num microcontrolador Microchip PIC18LF6722 de 8 bits e num transceptor MRF24J40 de 2,4 GHz [32]. Este nó sensor suporta vários sensores, tais como: temperatura, humidade do ar e do solo, iluminação, pressão do ar e uma câmara com uma FPGA de baixo consumo.

A rede base é constituída por um nó no solo (responsável por medir a temperatura e a humidade do solo), um nó numa árvore (que mede a temperatura do ar, a humidade relativa, a pressão atmosférica e a radiação solar), um nó com uma câmara agregada e um coordenador/GPRS *gateway* [32]. Os nós são alimentados por baterias de lítio, enquanto o coordenador é alimentado por um painel solar.

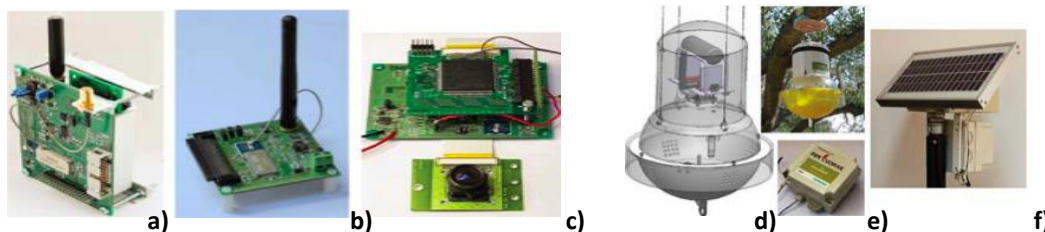


Figura 2.20 - a) coordenador/GPRS *gateway*, b) nó sensor, c) nó com câmara agregada, d) armadilha para insetos com câmara, e) nó sensor, f) o coordenador/ GPRS *gateway* com um painel solar.

O protocolo de comunicação é baseado no padrão IEEE 802.15.4, tendo-se realizado algumas modificações de forma a reduzir o consumo de energia na

transmissão de imagem, bem como na sincronização [32]. Na figura 2.21 é possível visualizar imagens do protótipo do sistema.

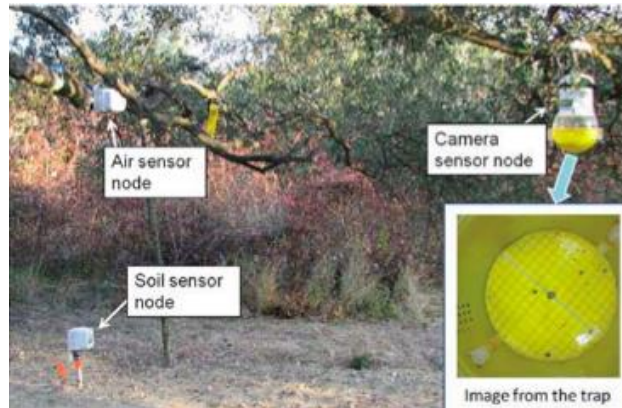


Figura 2.21 - Protótipo do sistema.

Este sistema foi testado em outubro de 2008 num pequeno olival perto de Zadar (região da Dalmácia), mas só começou a ser utilizado em meados de 2011.

### 2.5.3 Sistema QUIROTEC

O sistema QUIROTEC foi desenvolvido por uma empresa espanhola, a Wireless Galicia, que tem como foco sistemas de comunicação sem fios. Este projeto foi implementado no Parque Nacional de Ilhas Atlânticas da Galiza e visa monitorizar diversos parâmetros, tais como temperatura, luminosidade, humidade e ultrassons de modo a estudar e acompanhar o *habitat* de morcegos utilizando redes de sensores sem fios, sem ter que invadir o ambiente em que vivem [33]. Na figura 2.22 está ilustrado o esquema da rede.

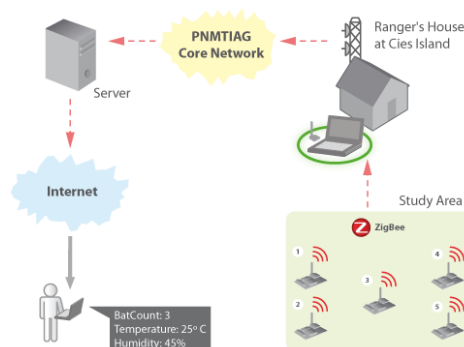


Figura 2.22 - Arquitetura do sistema.

O sistema baseia-se na utilização de sensores *wireless* WASPMOTE e fez uso do protocolo ZigBee. Os nós sensores e as baterias foram colocados dentro de uma caixa com um grau de proteção IP66, pois estes encontram-se no exterior, tal como pode ser visualizado na figura 2.23.



**Figura 2.23 - Ilustração dos nós sensores no terreno.**

De forma a consumir menos energia, os nós sensores durante o dia estão em modo adormecido, consumindo  $62 \mu\text{A}$  e apenas começam a monitorizar ao anoitecer. Estes são alimentados por uma bateria de lítio, recarregada através de um painel solar [33]. Os dados do sensor são enviados para um nó central, que por sua vez reúne todos os dados e armazena-os numa base de dados.

#### **2.5.4 Rede ARTICA e ICARO 1**

O sistema ARTICA foi projetado em 2008, entre a zona de "El Ojillo" e "El Zacallon", Espanha, e baseou-se numa plataforma TelosB. A rede inicial era composta por quatro nós que foram distribuídos com uma distância máxima entre eles de 200 m e posteriormente foram adicionados mais dois nós sensores. Os nós sensores, alimentados por pequenos painéis solares, foram projetados para obter os seguintes parâmetros: temperatura, humidade relativa e radiação solar [34]. A figura 2.24 mostra um nó da rede.



**Figura 2.24 - Nó da rede ARTICA 1.**

Esta rede funciona para a frequência de 2,4 GHz usando o protocolo IEEE 802.15.4. Os nós monitorizam e enviam a informação a cada minuto. A bateria dos nós foi concebida de modo a garantir a alimentação dos mesmos até uma semana sem sol. A figura 2.25 mostra a interface gráfica com a informação obtida através do servidor central.

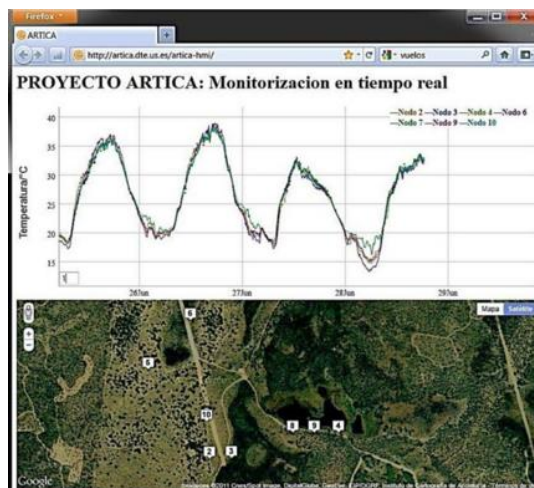


Figura 2.25 - Interface gráfica.

A rede ARTICA foi utilizada com a finalidade de demonstrar a fiabilidade das comunicações nos cenários de redes de sensores sem fios. Foram efetuados inúmeros testes de modo a medir o percentual de perdas de pacotes [34]. Obtiveram uma perda de 20% dos pacotes transmitidos devido à interferência introduzida pela vegetação [30].

Posteriormente, no ano 2010, o mesmo grupo de investigação criou no mesmo local uma nova rede, ICARO 1, com o intuito de monitorizar o nível de inundação em áreas pantanosas. A rede é composta por dez sensores sem fio e funciona na banda ISM de 2,4 GHz usando o protocolo IEEE 802.15.4.

Os nós são alimentados por pequenos painéis solares e são utilizados na medição dos seguintes parâmetros: temperatura, humidade relativa, radiação solar, nível de precipitação, direção do vento, e velocidade do vento. A figura 2.26 mostra o nó da rede.



Figura 2.26 - Nó da rede ICARO 1.

A estimativa do nível de inundação é conseguida através de um algoritmo computacional, que se baseia na utilização de mapas de SOM (*Self-Organizing Map*). O algoritmo está concebido de modo a otimizar o consumo de energia, bem como para obter a informação do nível de fluxo utilizando variáveis ambientais, tais como o nível de chuva ou a temperatura média [34]. As variáveis são monitorizadas a cada 5 minutos,

mas só é enviada uma mensagem quando existe uma variação significativa do nível de inundação.

### **2.5.5 Análise dos sistemas**

As aplicações apresentadas pertencem à categoria de Detecção de Evento (*ED-Event Detection*). São aplicações cujo objetivo da recolha de informação por parte dos sensores é comunicar acerca de um determinado evento, seja deteção ou previsão do mesmo. No caso da previsão o processo é simples, consistindo na comparação do valor medido pelos nós sensores com um determinado limiar. Sempre que algum dos parâmetros ultrapasse o limiar estabelecido o sistema analisa a informação e reage enviando um alarme. Nos sistemas ED, os principais requisitos são a possibilidade de monitorizar em tempo real, densidade suficiente de modo que a medição dos parâmetros seja efetuada com o mínimo erro possível, fiabilidade, tempo de vida útil dos sensores e autonomia dos mesmos.

Tendo em consideração os sistemas existentes e a importância dos mesmos, será desenvolvido um protótipo que realiza o suporte à monitorização ambiental, fornecendo uma linha de comunicação. O protótipo, para além de monitorizar parâmetros essenciais tais como temperatura, humidade, pluviosidade, velocidade e direção do vento, nível de sinal de radiofrequência recebido (RSSI – *Received Signal Strength Indicator*), facultará também o consumo total do sistema, bem como a produção dos painéis fotovoltaicos. Sendo possível a introdução de novos nós sensores na rede.

### 3 Estudo da propagação

Para que a criação da rede de sensores sem fios seja viável, nomeadamente no meio florestal, foi necessário fazer um estudo acerca da atenuação do sinal em diferentes meios. A propagação do sinal é afetada por diversos fatores, tais como, os obstáculos, a distância entre os nós sensores e a proximidade dos mesmos ao solo.

Neste capítulo, numa primeira fase, são apresentados quais os dispositivos de comunicação e de processamento utilizados. Numa segunda fase são apresentados os sistemas de medição e os resultados obtidos em diferentes meios de propagação.

#### 3.1 Dispositivos de comunicação e processamento

##### 3.1.1 Arduíno FIO

Neste projeto optou-se pela utilização da placa Arduíno FIO, pelo facto de ser de baixo consumo e incluir uma interface para o módulo XBee, sendo, assim, destinada para aplicações sem fio [35]. É uma plataforma de desenvolvimento *open source* baseada no microcontrolador ATmega328P. A figura 3.1 apresenta a placa utilizada.

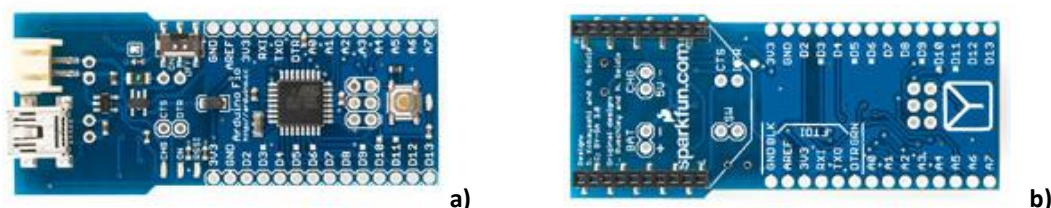


Figura 3.1 - Placa Arduíno Fio: a) secção superior; b) secção inferior.

O Arduíno FIO trabalha com uma tensão de 3,3 V. Este possui 8 pinos de entrada analógica e 14 pinos de entrada/saída digital, em que 6 dos pinos digitais podem ser usados como saídas PWM (*Pulse Width Modulation*). Cada pino de entrada/saída fornece uma corrente de 40 mA.

No que concerne à comunicação entre o computador e o Arduíno FIO é necessário recorrer a uma *shield* FTDI, pois a placa não possui entrada direta para a comunicação série.

Relativamente à alimentação, esta pode ser efetuada de dois modos, ou através do *shield* FTDI ou recorrendo a uma bateria de lítio, onde a tensão deverá estar compreendida entre os 3,35 V e os 12 V.

##### 3.1.2 XBee

O módulo de comunicação escolhido foi o *XBee*, fabricado pela empresa *Digi International* [36]. Estes rádios são comumente utilizados no contexto das redes de

sensores sem fios, pois, para além de suportarem o protocolo ZigBee, apresentam um baixo consumo energético e garantem uma entrega consistente da informação. Na figura 3.2 é possível visualizar o módulo XBee com conector para uma antena externa (RPSMA).



**Figura 3.2 - XBee.**

Os módulos são fabricados em duas versões, a versão XBee e a versão XBee Pro. A principal diferença consiste no facto do modelo PRO ter uma maior potência de transmissão, mas o seu consumo também é mais elevado. Assim sendo, neste projeto optou-se pela utilização da versão XBee Series 2, com antena externa (conector RPSMA). Contudo, utilizou-se o XBee Pro de forma pontual para efetuar algumas medições na vegetação. A utilização com o conector RPSMA deve-se ao facto de tornar possível a aplicação de inúmeras antenas com diferentes ganhos. Na tabela 3.1 é possível visualizar as especificações fornecidas pelo fabricante de maior interesse no âmbito deste estudo, relativamente ao módulo XBee Series 2 e ao XBee Pro.

**Tabela 3.1 - Principais características do XBee Series 2 e Pro.**

	<b>XBee Series 2</b>	<b>XBee Pro</b>
<b>Alcance RF interior/ Urbano</b>	Até 40 m	Até 90 m
<b>Alcance RF exterior/ Linha de vista</b>	Até 120 m	Até 3200 m
<b>Potência de transmissão</b>	2 mW (+3 dBm)	63 mW (+18 dBm)
<b>Sensibilidade de receção</b>	-98 dBm (1% PER)	-101 dBm
<b>Tensão de alimentação</b>	2,8 V – 3,6 V	2,7 V – 3,6 V
<b>Frequência de operação</b>	ISM 2,4 GHz	

Os módulos XBee apresentam dois modos de funcionamento, o modo AT (*Transparent Mode*) e o modo API (*Application Programming Interface*). Neste projeto utilizou-se o modo de funcionamento API, onde a informação é interpretada e verificada. Neste caso são utilizadas tramas na comunicação entre nós, sendo a informação enviada e recebida por tramas de modo a encapsular os dados, permitindo o acesso direto a certos parâmetros da rede e garantindo uma comunicação mais dinâmica comparativamente ao modo AT.

No que concerne à configuração dos módulos XBee é necessário instalar o *software* X-CTU disponibilizado pela empresa DIGI [37]. Já no X-CTU é possível configurar

o modo de funcionamento do rádio bem como se este vai operar como coordenador, *end device* ou *router*.

### 3.1.3 Antenas utilizadas

Neste estudo utilizaram-se três tipos de antenas: antena monopolo; suspensa; e biquad. A primeira é uma antena comercial e as restantes foram construídas.

Para cada antena utilizada mediu-se o ganho e desenhou-se o respetivo diagrama de radiação. Para tal, recorreu-se a uma câmara anecoica com o auxílio de um sistema compacto, existente nos laboratórios da universidade. No lado da emissão tem-se o sistema compacto, constituído por uma antena parabólica iluminada por uma antena corneta de modo a criar uma onda plana. No lado da receção fez-se uso de um sistema de medição de diagramas de radiação disponível em laboratório. Este sistema é composto por: motor, onde é colocada a antena, sendo responsável por fazê-la rodar; um controlador, que realiza a interface entre o motor e o computador; um analisador de espetros, responsável por medir o nível de sinal recebido pela antena em cada um dos 360°; e o computador portátil com uma aplicação desenvolvida em Matlab. No que concerne à medição do ganho, utilizou-se o método Ganho por Comparação. A potência de transmissão utilizada foi de 10 dBm para uma frequência de 2,42 GHz.

A antena monopolo utilizada, representada na figura 3.3, é uma antena omnidirecional com um ganho médio de 2 dBi. A antena apresenta um comprimento de 107 mm.

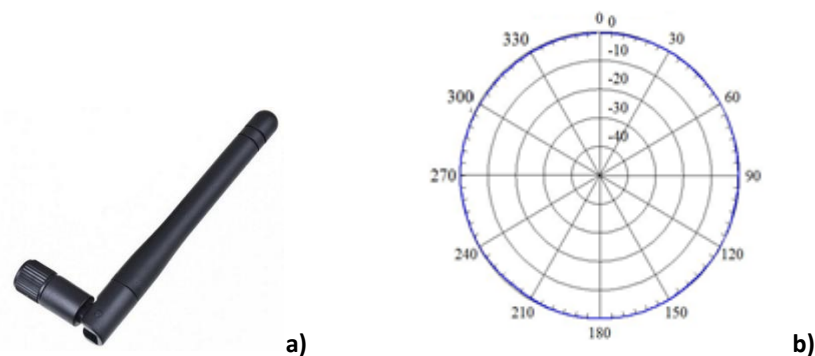


Figura 3.3 – a) Antena monopolo; b) Diagrama de radiação.

Como antena diretiva utilizou-se um agrupamento de duas antenas suspensas, como mostra a figura 3.4. O valor do ganho da antena é de 10,1 dBi.

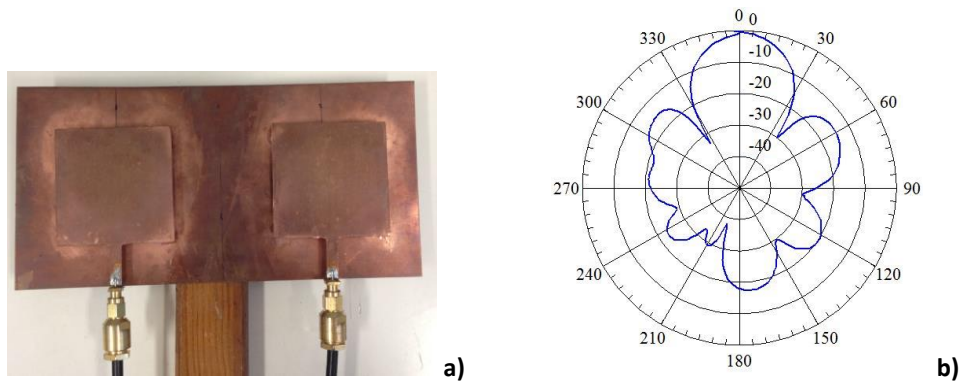


Figura 3.4 – a) Agrupamento de antenas suspensas; b) Diagrama de radiação.

Outra antena diretiva utilizada foi a biquad, um agrupamento de oito elementos dispostos como mostra a figura 3.5. O ganho da antena em questão é de 15,5 dBi.

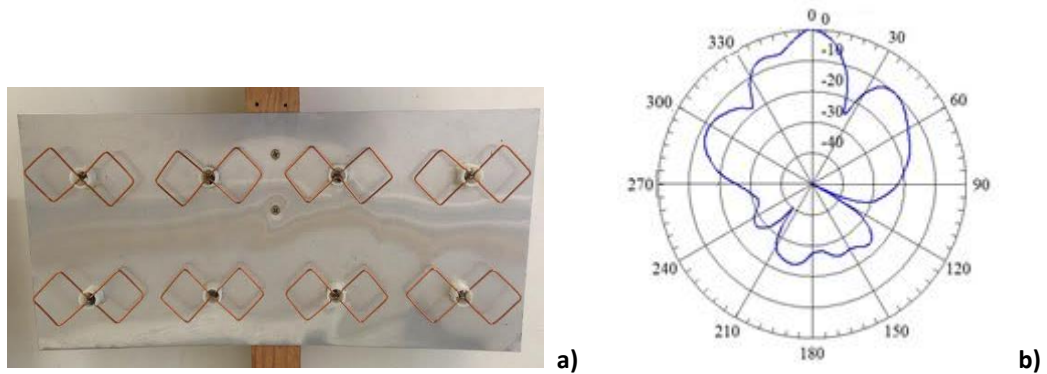


Figura 3.5 – a) Agrupamento de 8 elementos, antena biquad; b) Diagrama de radiação.

### 3.2 Sistema de medição

Neste estudo utilizou-se um conjunto de duas antenas, uma na emissão e uma na recepção, orientadas na direção de máxima radiação. Ligou-se a antena emissora ao módulo XBee (nó coordenador) que por sua vez estava conectado ao computador portátil onde estava instalado o *software* X-CTU. De modo a registar os dados fez-se uso da ferramenta *Radio Range Test*, do *software* X-CTU, ilustrada na figura 3.6. Esta, para além de apresentar o valor de RSSI, disponibiliza a opção de escolha do número de pacotes que é desejado enviar, sendo possível observar quantos pacotes foram enviados e quantos foram recebidos e perdidos.

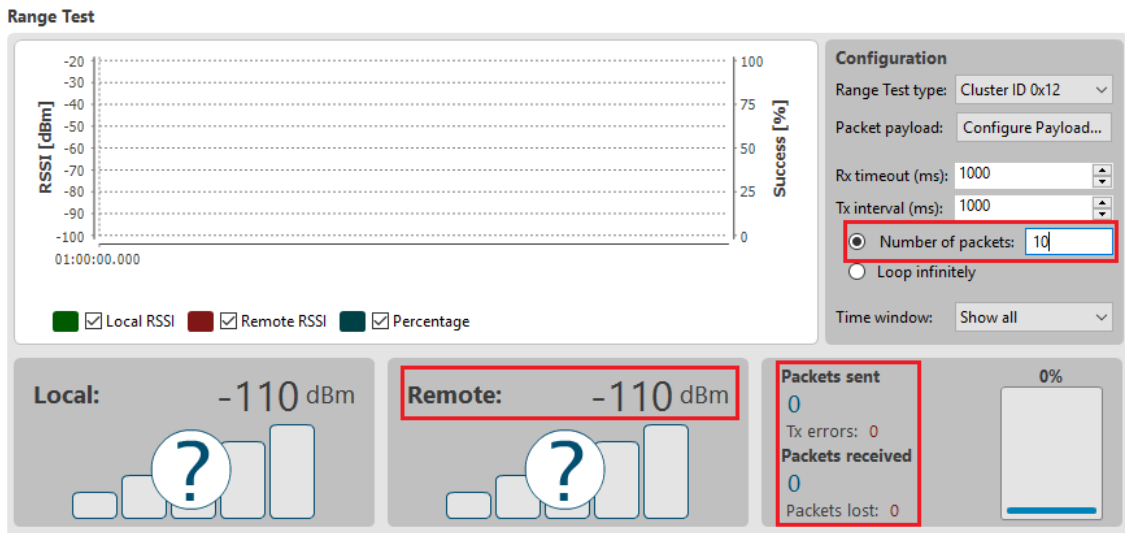


Figura 3.6 - Ferramenta *Radio Range Test*, do software X-CTU.

O recetor era constituído por um XBee (nó *router*) e um Arduíno FIO, sendo alimentados através de uma bateria de lítio.

Os módulos XBee disponibilizam cinco potências de transmissão. O analisador de espectros FSH8 da ROHDE & SCHWARZ foi utilizado para medição da potência, estando a interface gráfica representada na figura 3.7. Através de alguns testes constatou-se que existe alguma discrepância (até 3 dBm) entre as potências indicadas pelo fabricante e aquela que os rádios na realidade oferecem.

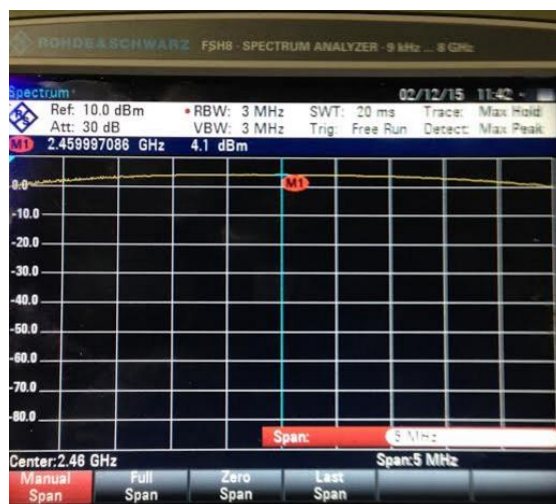
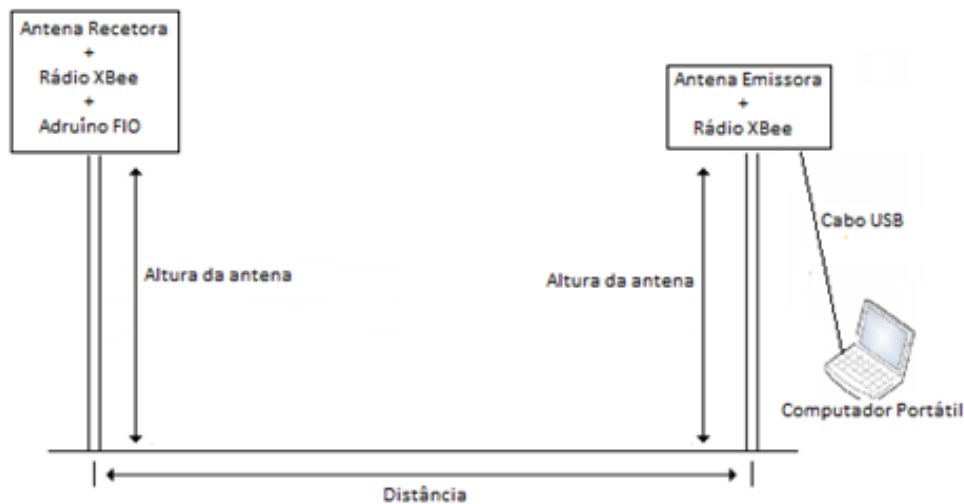


Figura 3.7 - Analisador de espectros, teste de potência.

O esquema de medição utilizado nas medições dos diferentes meios de propagação é apresentado na figura 3.8.



**Figura 3.8 - Esquema de medição utilizado.**

A antena recetora foi colocada numa posição fixa e as medições foram efetuadas com o afastamento da antena emissora, em intervalos de um metro. Optou-se por este esquema visto que os resultados são observados no nó coordenador o qual está conectado ao computador. No entanto, efetuou-se um pequeno teste de modo a avaliar se os resultados seriam análogos caso se movimentasse a antena recetora ou emissora.

### **3.3 Medições em diferentes meios de propagação**

Foram realizadas medições em diferentes ambientes e com diferentes conjuntos de antenas de modo a avaliar a variação da potência recebida pelo nó sensor, bem como o número de mensagens recebidas em função da distância. As medições foram efetuadas num meio sem obstáculos, num meio com obstáculos e num meio com vegetação.

#### **3.3.1 Meio sem obstáculos**

As medições realizadas num meio sem obstáculos permitiram avaliar o desempenho do indicador do nível de sinal do XBee (RSSI). Foram efetuados dois conjuntos de medições no terraço da Universidade da Madeira. Primeiramente utilizou-se um conjunto de duas antenas monopolo, uma na receção e uma outra na emissão e, posteriormente, o conjunto antena monopolo na emissão e na receção a antena biquad de 8 elementos. As antenas foram colocadas no topo de uma haste de 5 m de altura e as medições foram realizadas ao longo de 25 m. Utilizaram-se dois rádios XBee Series 2, em que a potência de transmissão do XBee foi de 2 dBm. A figura 3.9 mostra a medição com duas antenas monopolo.



Figura 3.9 - Medição do RSSI e da qualidade das mensagens enviadas no terraço da universidade.

As medições foram efetuadas a uma altura de 5 m com o intuito de simular o espaço livre, ou seja, de existir o mínimo de reflexões possíveis. Para tal, é necessário que toda a região abrangida pelo volume do primeiro elipsoide de Fresnel, entre o emissor e o recetor, esteja livre de obstáculos. A figura 3.10 ilustra o princípio de Huygens e de Fresnel, demonstrando como a amplitude de uma onda num ponto  $P$  é obtida, contendo, ainda, os dados necessários para o cálculo do primeiro elipsoide de Fresnel.

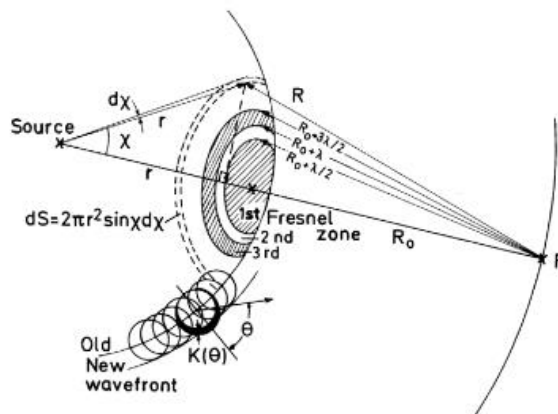


Figura 3.10 - Princípio Huygens e zonas de Fresnel [38].

De modo a garantir que as medições efetuadas foram em espaço livre, recorrendo ao Teorema de Pitágoras e com base na figura 3.10 tem-se,

$$\left(R_0 + \frac{\lambda}{2}\right)^2 = a^2 + R_0^2 \quad (3.1)$$

$$a^2 = \left(12,5 + \frac{0,125}{2}\right)^2 - (12,5)^2$$

$$a = 1,25 \text{ m}$$

onde que  $a$  corresponde ao raio do primeiro elipsoide de Fresnel.

Tendo as antenas sido colocadas a 5 m pode-se assegurar que as medições foram efetuadas segundo o modelo do espaço livre.

Nas figuras 3.11 e 3.12 estão apresentados os resultados normalizados obtidos relativamente aos dois conjuntos de medições. Para cada uma das 25 posições foram retiradas quatro amostras da potência do sinal recebido e foram enviadas 10 mensagens.

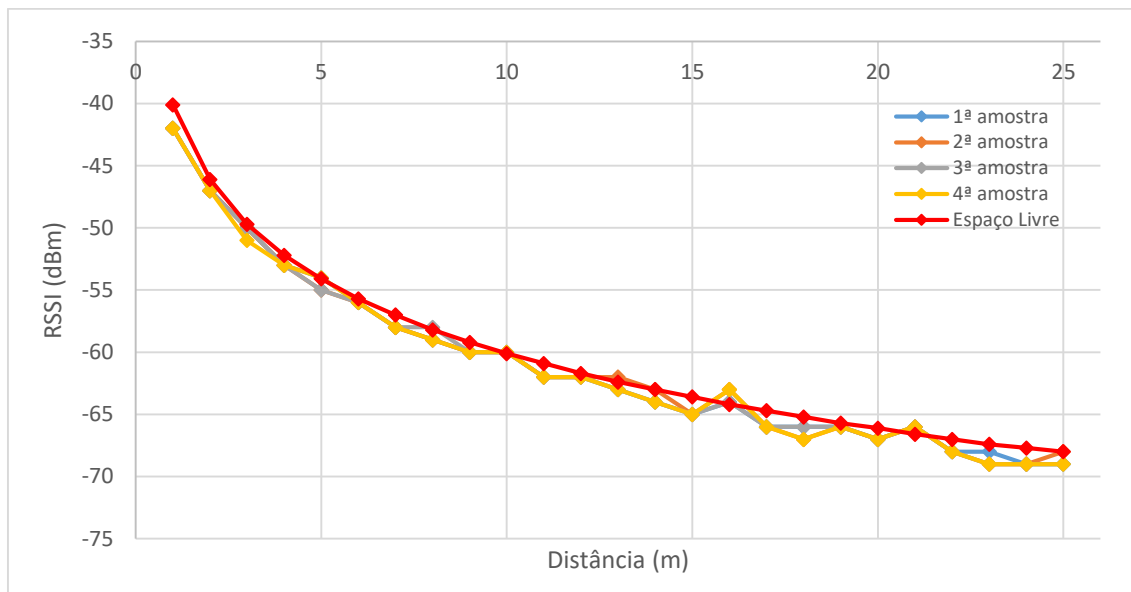


Figura 3.11 - Comparação entre os valores de RSSI para o conjunto monopolo - monopolo.

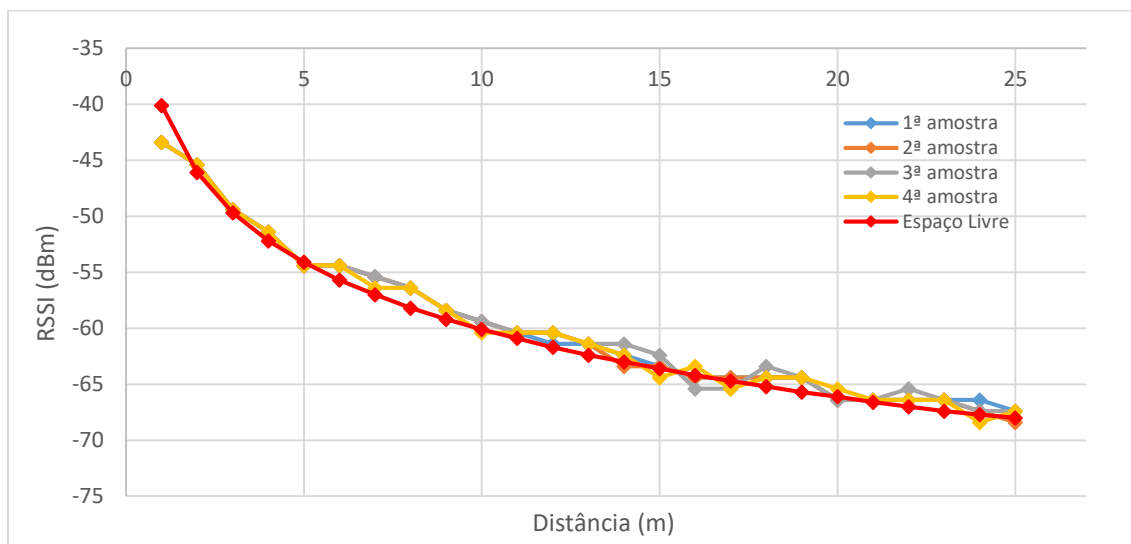


Figura 3.12 - Comparação entre os valores de RSSI para o conjunto monopolo - biquad.

Analisando a variação do sinal, o valor do sinal de RSSI obtido pelo nó sensor acompanha a curva característica do espaço livre, apresentando uma boa aproximação

ao nível de sinal esperado. No que concerne à qualidade da ligação, não houve perda de mensagens para os dois conjuntos de antenas.

### 3.3.2 Meio com obstáculos

Um outro teste foi realizado para avaliar o canal de transmissão num ambiente urbano, caracterizado por obstáculos, mas para uma ligação em linha de vista. Uma vez mais foram efetuados dois conjuntos de medições. Utilizou-se novamente um conjunto de duas antenas monopolo e um conjunto de um agrupamento com duas antenas suspensas, uma na receção e uma na emissão. Neste estudo as antenas foram colocadas no topo de uma haste com 3 m de altura e as medições foram realizadas ao longo dos 150 m do parque de estacionamento exterior, em frente à cantina da Universidade da Madeira. A figura 3.13 mostra o local das medições no *Google Earth*.

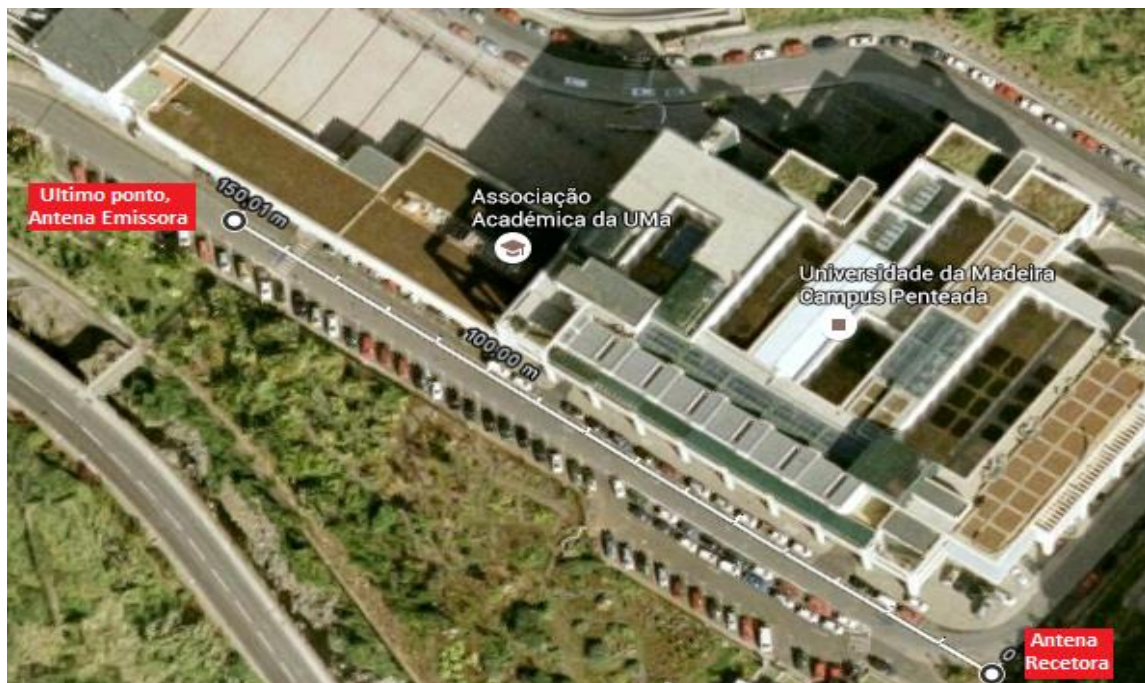


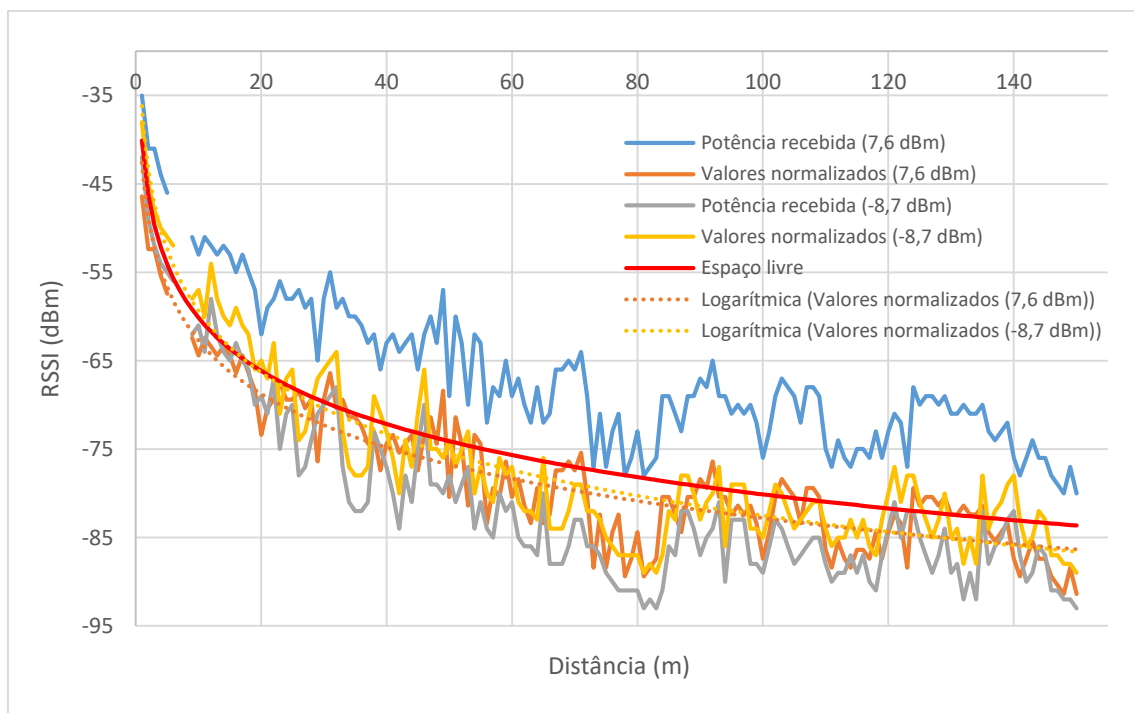
Figura 3.13 - Local das medições no parque de estacionamento.

As medições foram efetuadas para duas potências de transmissão do XBee, de 7,6 dBm e -8 dBm. Para a potência de transmissão de 7,6 dBm utilizou-se o XBee PROS28 e para a potência de -8 dBm utilizou-se o rádio XBee Series 2 (o XBee PRO não oferece potência de transmissão abaixo de 0 dBm). Relativamente à receção foi utilizado, para os dois casos, o XBee PRO de modo a garantir um maior alcance. A figura 3.14 ilustra uma das medições efetuadas.



**Figura 3.14 - Medição do RSSI e da qualidade das mensagens enviadas no parque de estacionamento.**

Para cada uma das posições, distanciadas de um metro, foram obtidas amostras da potência do sinal recebido e foram enviadas 10 mensagens. Há que salientar que para as distâncias 6, 7 e 8 m não foi possível efetuar a medição devido à presença de veículos no percurso de medição. A figura 3.15 mostra os resultados para o conjunto monopolo – monopolo, com duas curvas referentes aos valores medidos para as duas potências de transmissão e as outras duas após normalização dos valores recebidos, ou seja, retirada a potência de emissão e os ganhos das antenas.



**Figura 3.15 - Comparação entre os valores de RSSI para o conjunto monopolo - monopolo.**

Analisando o gráfico é possível observar que os resultados obtidos até aos 17 m acompanham a curva característica do espaço livre. A partir dessa distância nota-se uma maior oscilação no valor da potência recebida devido às reflexões no solo e à presença de obstáculos (viaturas, reflexão nos edifícios, etc.). As curvas de tendência são semelhantes para as duas potências de transmissão.

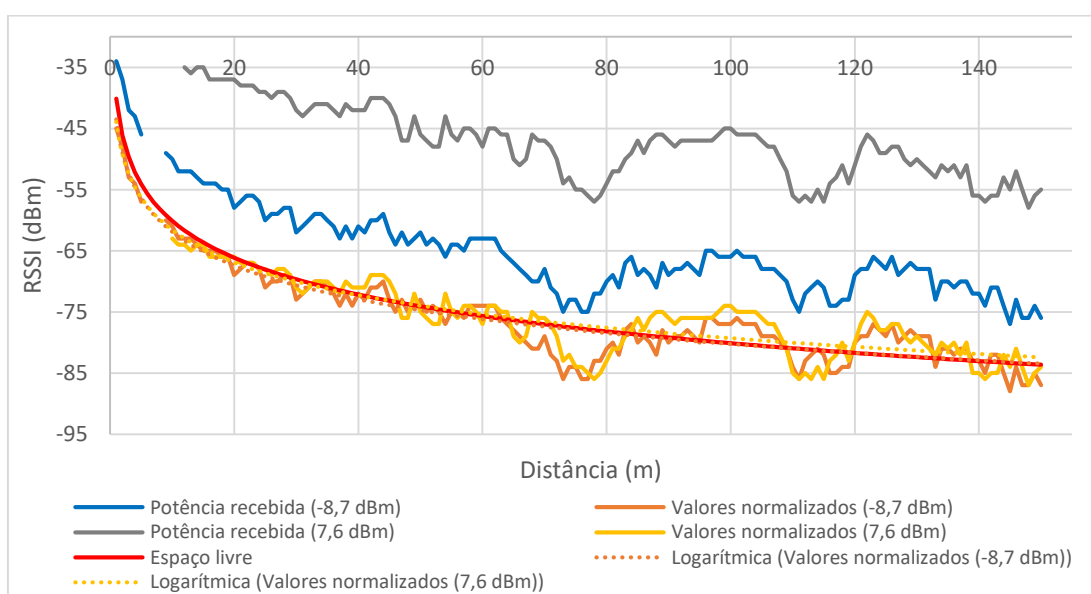
Tem-se que a variação máxima do sinal em relação à curva de tendência foi de 7,6 dB para as duas potências de transmissão. Utilizando o modelo log-normal, equação (2.2), obteve-se os resultados do expoente de perda de percurso, a perda de percurso para a distância de 1 m e o desvio da curva de tendência em relação ao espaço livre. Os mesmos são apresentados na tabela 3.2. Relativamente ao espaço livre o expoente de perda de percurso é 2 e a perda de percurso para a distância de referência é -40,1.

**Tabela 3.2 – Valores referentes à curva monopolo – monopolo do meio com obstáculos, utilizando o modelo log-normal.**

Potência de transmissão	Expoente de perda de percurso ( $n$ )	Perda de percurso para distância de referência ( $PL(d_0=1\text{ m})$ )	Desvio padrão
-8,7 dBm	2,0	-42,6	0,04
7,6 dBm	2,3	-36,2	1,29

No que concerne à qualidade das mensagens enviadas, houve algumas perdas para a potência de emissão de -8,7 dBm entre os 75 m e os 83 m. No entanto, das 10 mensagens enviadas em cada ponto houve sempre no mínimo 6 mensagens entregues. Foi observado que quando havia circulação de veículos a perda de mensagens aumentava.

Os resultados obtidos para o conjunto suspensão – suspensão estão ilustrados na figura 3.16.



**Figura 3.16 - Comparação entre os valores de RSSI para o conjunto suspensão – suspensão.**

Comparando com a combinação monopolo – monopolo, observa-se que existe menos variação do sinal uma vez que as antenas diretivas recebem menos reflexões que as antenas omnidirecionais.

A variação máxima do sinal em relação à curva de tendência foi de 8,6 dB para a potência de transmissão de 7,6 dBm e de 8,2 dB para a potência de transmissão de -8,7 dBm. Utilizando o modelo log-normal, equação (2.2), obtém-se os resultados representados na tabela 3.3.

**Tabela 3.3 - Valores referentes à curva suspensa – suspensa do meio com obstáculos, utilizando o modelo log-normal.**

Potência de transmissão	Expoente de perda de percurso ( $n$ )	Perda de percurso para distância de referência ( $PL(d_0=1\text{ m})$ )	Desvio padrão
-8,7 dBm	1,8	-43,9	0,7
7,6 dBm	1,8	-43,5	0,8

No que diz respeito à qualidade das mensagens enviadas constatou-se que foram todas entregues. É importante referir que os primeiros 10 m e para a potência de emissão de 7,6 dBm os valores devem ser ignorados, uma vez que os módulos têm uma gama de medição entre os -36 dBm e os -100 dBm [39].

Os resultados das medições vão ao encontro do esperado, em que, segundo a fórmula de Friis, quanto maior o ganho da antena recetor e emissora maior a potência recebida. Assim, é vantajoso no meio com obstáculos, mas em linha de vista, utilizar antenas de maior ganho (diretivas), o que permite um maior alcance.

### 3.3.3 Meio com vegetação

As medições no meio com vegetação permitiram testar a influência das antenas, de baixo ou elevado ganho, na perda de percurso. Os dois conjuntos de antenas utilizados foram os mesmos que no parque de estacionamento e novamente as antenas foram colocadas no topo de uma haste de 3 m de altura e as medições foram realizadas até à máxima sensibilidade do rádio. As medições foram realizadas na vegetação entre a Ribeira de São João e o estacionamento exterior da universidade. A figura 3.17 mostra o local das medições através do *Google Earth*.



Figura 3.17 - Local das medições na vegetação.

Efetuarão-se duas passagens para cada combinação de antenas, com o XBee a emitir a 18 dBm e a -0,9 dBm. Para cada uma das posições registou-se o valor da potência do sinal recebido (RSSI) e a qualidade das mensagens enviadas. Na figura 3.18 são apresentados os valores da potência recebida para os dois conjuntos de antenas e potências de transmissão.

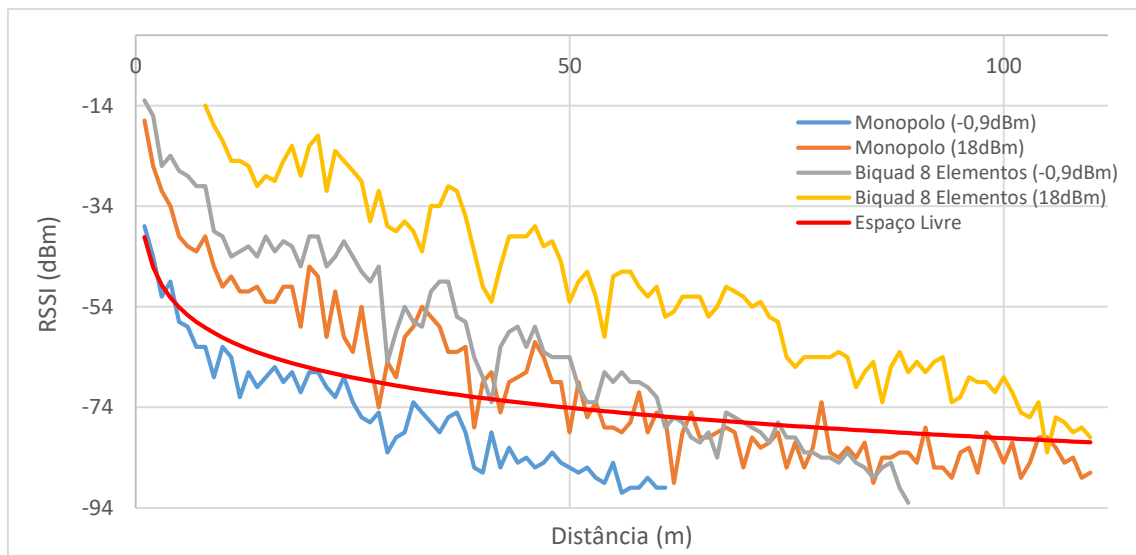
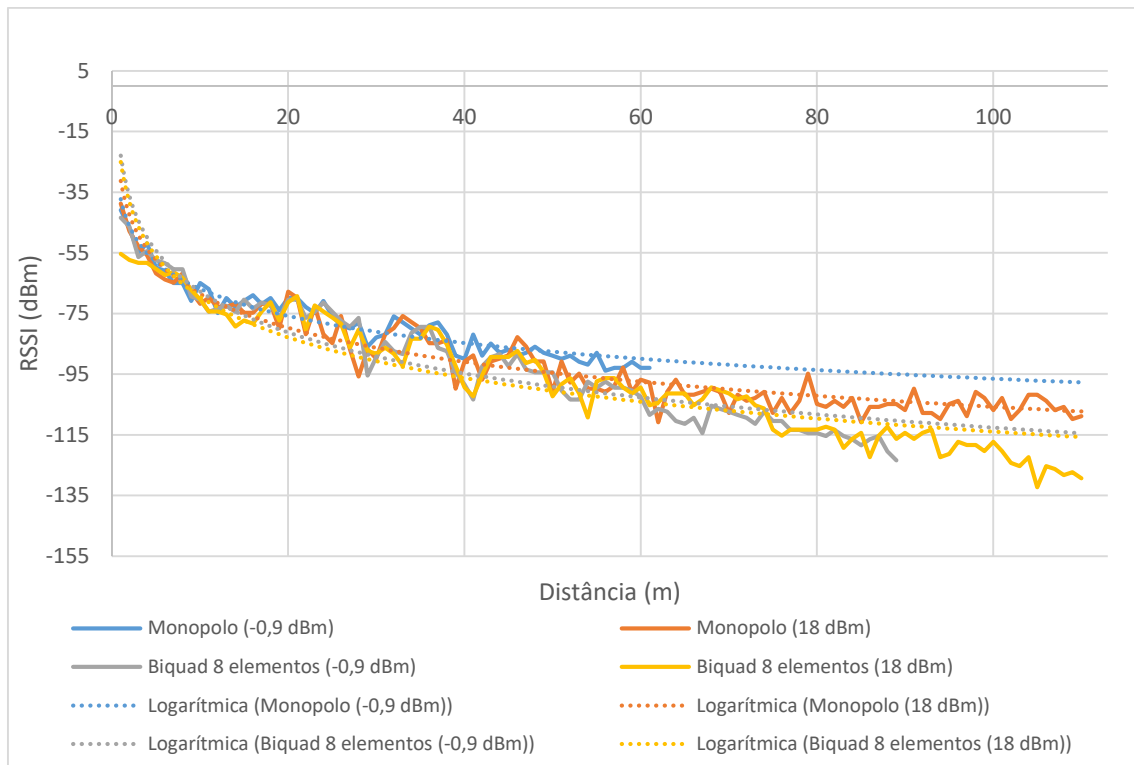


Figura 3.18 - Comparação da potência recebida para dois sistemas diferentes e para duas potências de transmissão.

Na figura 3.19 tem-se os valores após terem sido normalizados, com as respetivas linhas de tendência.



**Figura 3.19 - Comparação da potência recebida após normalizada para dois sistemas diferentes e para as duas potências de transmissão.**

É possível observar na figura 3.18 que a potência recebida para o conjunto de monopolos a 18 dBm, a 80 m, é idêntica à potência recebida para o conjunto de biquads a operar a -0,9 dBm. Também é possível visualizar que com o aumento da distância a atenuação aumenta para as antenas de maior ganho e que a partir dos 60 m há um aumento da potência recebida para as antenas de menor ganho. Este facto deve-se às reflexões que ocorrem nos obstáculos, com antenas de menor ganho a receberem mais reflexões por serem omnidirecionais. Estes resultados vão ao encontro de estudos anteriores relativamente à influência das antenas na perda de percurso. Desta forma, a escolha das antenas pode ser relevante para meios com vegetação uma vez que os sinais refletidos e difratados que chegam à antena recetora por diferentes ângulos são mais atenuados para as antenas de maior ganho. No entanto, há que ter em consideração que, embora as antenas omnidirecionais introduzam uma menor atenuação, a potência recebida poderá ser menor que a obtida com antenas diretivas devido ao seu baixo ganho. Pela análise da figura 3.19 é possível concluir que a atenuação é praticamente independente da potência de transmissão.

A variação máxima do sinal em relação à curva de tendência, para os dois conjuntos de antenas e de potências de transmissão, pode ser visualizada na tabela 3.4.

**Tabela 3.4 - Máxima variação da potência recebida em relação à curva de tendência no meio com vegetação.**

	Potência de transmissão (dBm)	Máxima variação (dB)
Monopolo	-0,9	7,2
	18	11,9
Biquad	-0,9	13,4
	18	14,5

Novamente utilizando o modelo log-normal, equação (2.2), obtém-se os resultados apresentados na tabela 3.5. Pelos valores do expoente da perda de percurso, pode-se verificar que as antenas diretivas introduzem uma maior atenuação e relativamente ao desvio padrão, com o aumento da potência este apresenta valores mais elevados.

**Tabela 3.5 - Valores referentes ao meio com vegetação, utilizando o modelo log-normal.**

	Potência de transmissão (dBm)	Expoente de perda de percurso ( $n$ )	Perda de percurso para distância de referência ( $PL(d_0=1 m)$ )	Desvio padrão
Monopolo	-0,9	3,0	-37,3	2,7
	18	3,7	-31,3	4,3
Biquad	-0,9	4,5	-22,9	3,1
	18	4,4	-25,0	6,5

### 3.4 Alcance máximo

Com base nos resultados das medições apresentadas anteriormente, efetuou-se o estudo relativamente ao alcance máximo dos módulos XBee para dois dos três meios, com obstáculos e com vegetação, pois são estes os meios de propagação presentes na linha de comunicação em estudo no projeto.

Para o meio com vegetação fez-se uso dos resultados obtidos na tabela 3.5, mais concretamente os valores do expoente de perda de percurso ( $n$ ) e a perda de percurso para a distância de 1 m ( $PL(d_0=1 m)$ ). Já para o meio com obstáculos o expoente de perda obtido foi de 1,8, abaixo do valor do expoente para o espaço livre, este facto deve-se a ter sido feito uma medição para uma curta distância. Assim, optou-se por efetuar uma medição a uma maior distância, cerca de 1 km, de modo a estimar qual o expoente mais indicado para este caso, tendo-se optado por utilizar 2,1 para o expoente de perda. Para os dois meios de propagação foram traçadas as respetivas curvas, que podem ser observadas na figura 3.20.

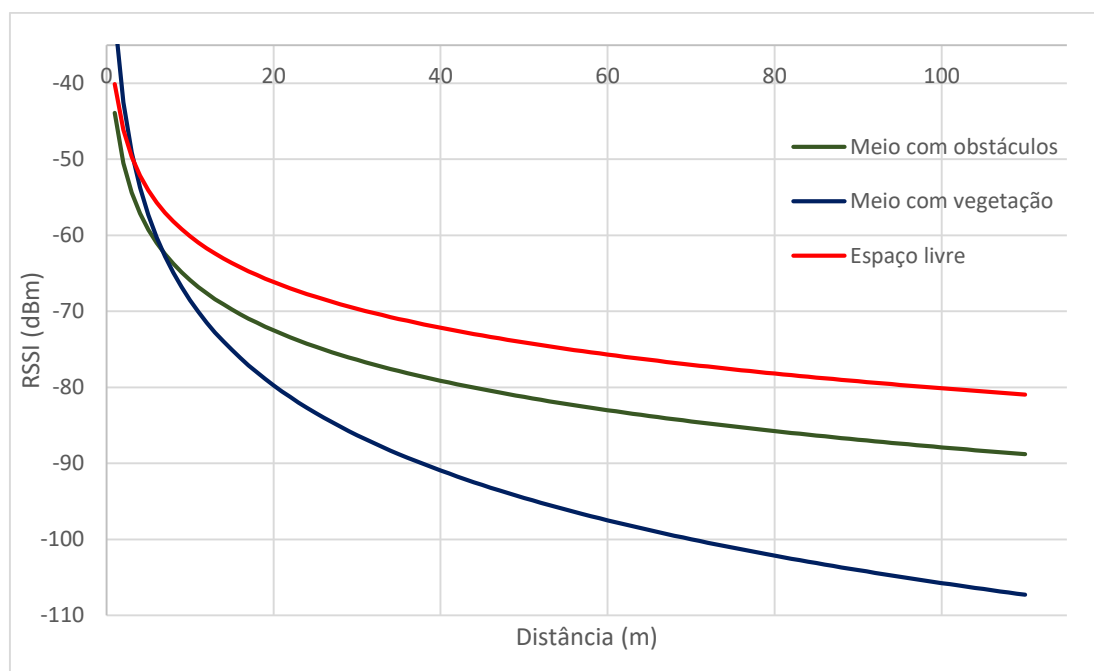


Figura 3.20 – Curvas correspondentes ao meio com obstáculos, com vegetação e espaço livre.

Concluiu-se que para o meio com obstáculos a melhor opção passa por utilizar antenas de maior ganho, tendo-se considerado um ganho de 10 dBi para a antena da recepção e da emissão, com uma potência de transmissão de 0 dBm. Esta escolha tem consideração que para a banda dos 2,4 GHz o EIRP (*Equivalent Isotropically Radiated Power*) deve ser no máximo de 10 dBm. Para o meio com vegetação foram consideradas antenas omnidirecionais, tendo-se utilizado duas antenas com um ganho de 2 dBi, para uma potência de transmissão de 8 dBm.

Sendo a máxima sensibilidade dos módulos de -98 dBm e sabendo a variação máxima em cada um dos meios calculou-se o máximo alcance dos rádios para as duas situações em questão. Os resultados estão ilustrados na tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Máximo alcance dos módulos XBee.

Meio de propagação	Alcance máximo do módulo XBee (m)
Com obstáculos (em linha de vista)	1370
Com vegetação	71

Conclui-se que em linha de vista, num meio com obstáculos, é possível um alcance aproximadamente de 1 km enquanto no meio da vegetação o alcance é extremamente menor, a rondar os 70 m.

### 3.5 Antenas do sistema de comunicação

Foram desenvolvidas duas antenas, uma omnidirecional e outra diretiva. As antenas podem ser utilizadas quer nos nós *routers* quer nos nós terminais, embora neste

trabalho se tenha optado pela utilização da antena omnidirecional no nó terminal e por uma antena diretiva nos nós *router*.

### 3.5.1 Antena omnidirecional

Fez-se um estudo acerca de antenas omnidirecionais e construiu-se uma de modo a avaliar o valor de ganho obtido por tal antena. A antena foi construída em fio de cobre (de 0,7 mm) com a configuração apresentada na figura 3.21.

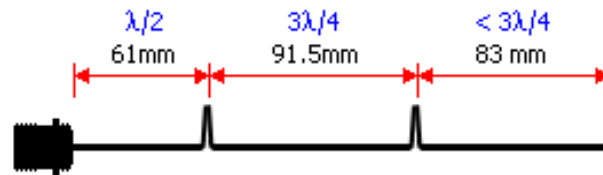


Figura 3.21 - Dimensões propostas para a antena omnidirecional [40].

A secção junto ao conector tem  $\frac{1}{2}$  do comprimento de onda, a secção central tem  $\frac{3}{4}$  do comprimento de onda e a secção de chicote no topo da antena deverá ser ligeiramente menor do que  $\frac{3}{4}$  do comprimento de onda. A primeira fase da construção da antena consistiu em soldar ao fio de cobre um conector do tipo N fêmea. Depois mediu-se  $\frac{1}{2}$  de comprimento de onda e fez-se uma espira, e assim sucessivamente até finalizar a construção da mesma.

Na figura 3.22 tem-se a antena construída. Na figura 3.23a) encontram-se os valores obtidos no analisador vetorial de rede, relativamente ao valor de SWR (*Standing Wave Ratio*) e à impedância de entrada e na 3.23b) o respetivo diagrama de radiação.



Figura 3.22 - Antena omnidirecional construída em laboratório.

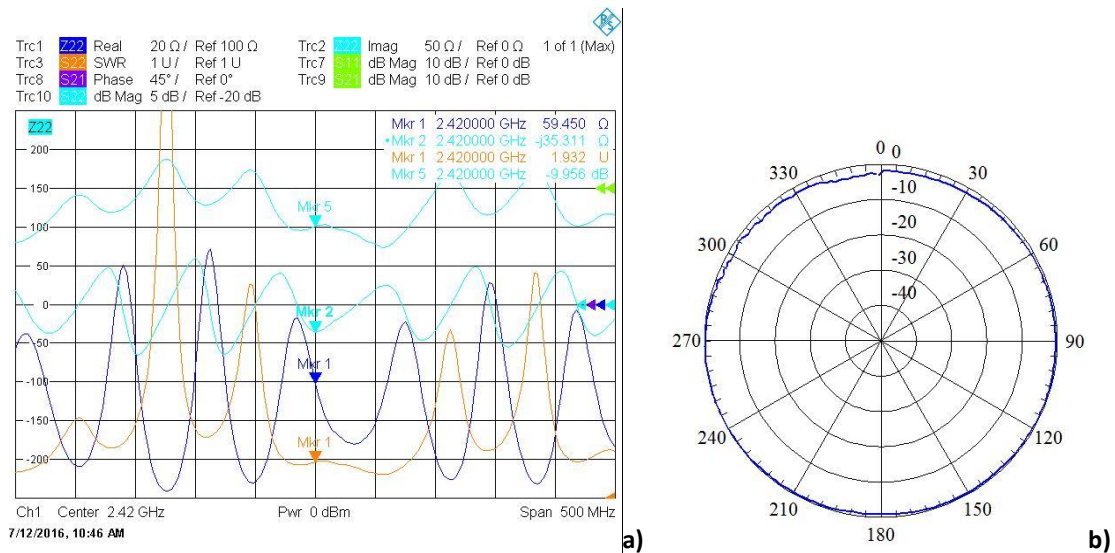


Figura 3.23 – a) SWR e impedância da antena construída; b) diagrama de radiação.

Analisando o resultado obtido na figura 3.23a), verifica-se que para a frequência pretendida (2,4 GHz) obteve-se uma impedância de  $59,5 - j35,3 \Omega$  e um valor de SWR de 1,9. No que concerne ao ganho, este foi medido na câmara anecoica, tendo-se obtido um valor de 6,2 dBi.

De modo a tentar aumentar o ganho pode-se acoplar um plano de massa, neste caso um disco de alumínio com um diâmetro de  $3\lambda/4$ , como pode ser visto na figura 3.24. Na figura 3.25 é possível ver os valores de SWR, a impedância da antena e a largura de banda da mesma (a escala da grelha de SWR é de 1 U).



Figura 3.24 - Antena omnidirecional com refletor circular de alumínio.

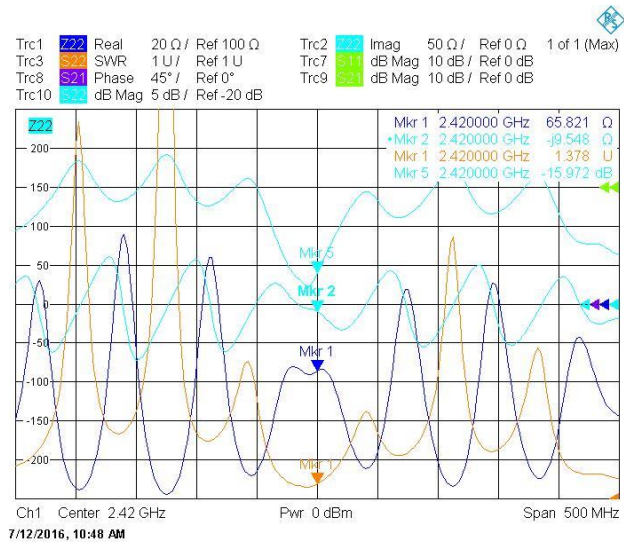


Figura 3.25 - SWR e impedância da antena com refletor circular de alumínio.

Analisando o resultado obtido na figura 3.25, verifica-se que para a frequência pretendida obteve-se uma impedância de  $65,8 - j9,5 \Omega$ . O valor do ganho passou a ser de 7,2 dBi.

Tendo em consideração que se pretende uma antena protegida para operar no exterior, utilizou-se a antena comercial com 8,4 dBi de ganho, representada na figura 3.26 [41].



Figura 3.26 - Antena omnidirecional comercial.

Na figura 3.27a) pode-se visualizar o SWR e a impedância da antena e na figura 3.27b) o seu diagrama de radiação.

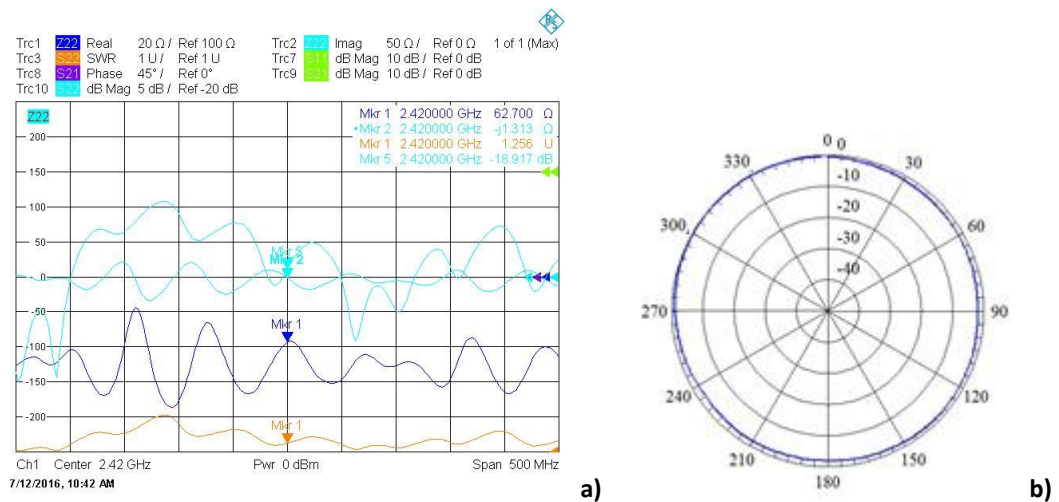


Figura 3.27 - a) Antena omnidirecional comercial; b) Diagrama de radiação.

### 3.5.2 Antena diretiva

Na fase de testes recorreu-se a um agrupamento de antenas suspensas. Contudo, para a linha de comunicação o mais indicado passa por utilizar uma antena diretiva que ofereça a vantagem de possuir dois lóbulos principais em direções opostas. Visto que no mercado não foi possível encontrar uma antena desse género optou-se por construí-la. A antena proposta foi um agrupamento de duas antenas suspensas que opera na frequência de 2,42 GHz. A figura 3.28 ilustra as medidas para a antena proposta.

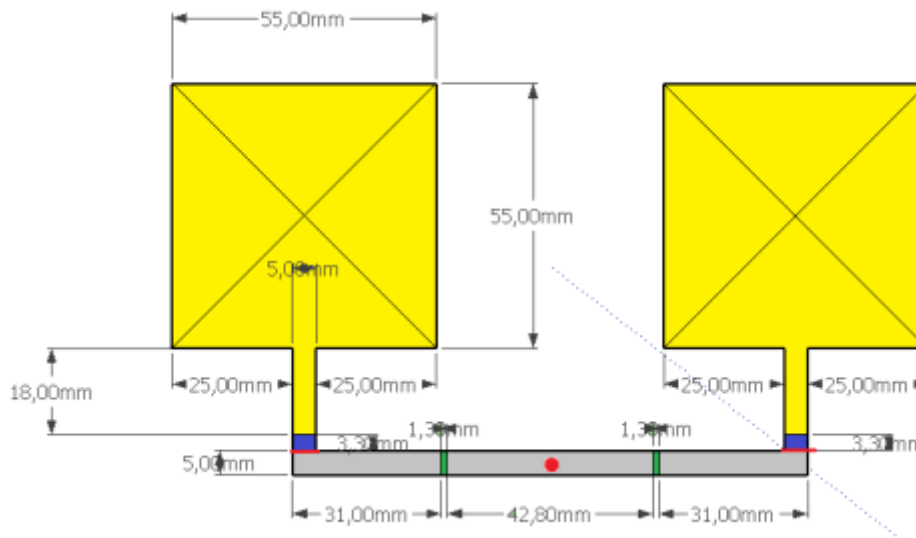


Figura 3.28 - Dimensões do agrupamento de antenas suspensas proposto [42].

Há que salientar que a antena deverá ficar suspensa a 5 mm do plano de massa, e este apresenta as seguintes dimensões: 107 mm de comprimento e 188 mm de largura. Na figura 3.29 é possível visualizar a antena projetada.

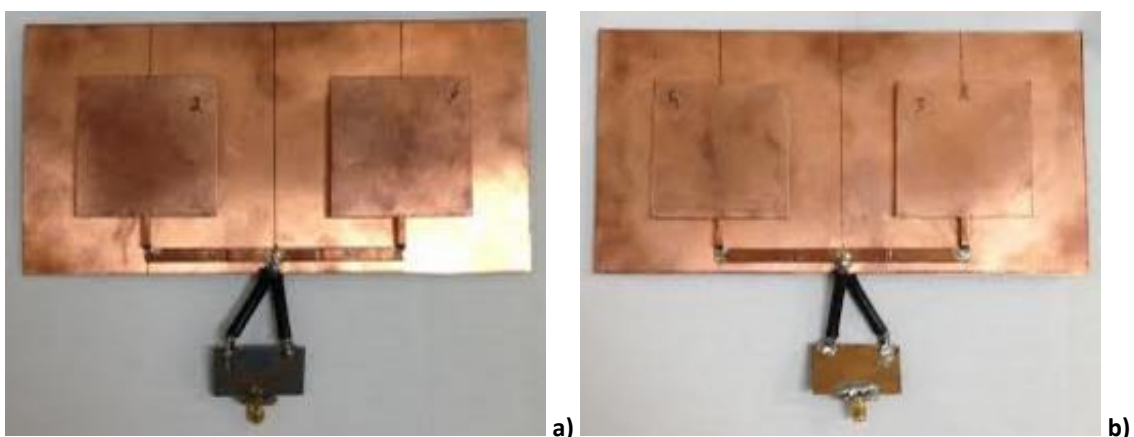
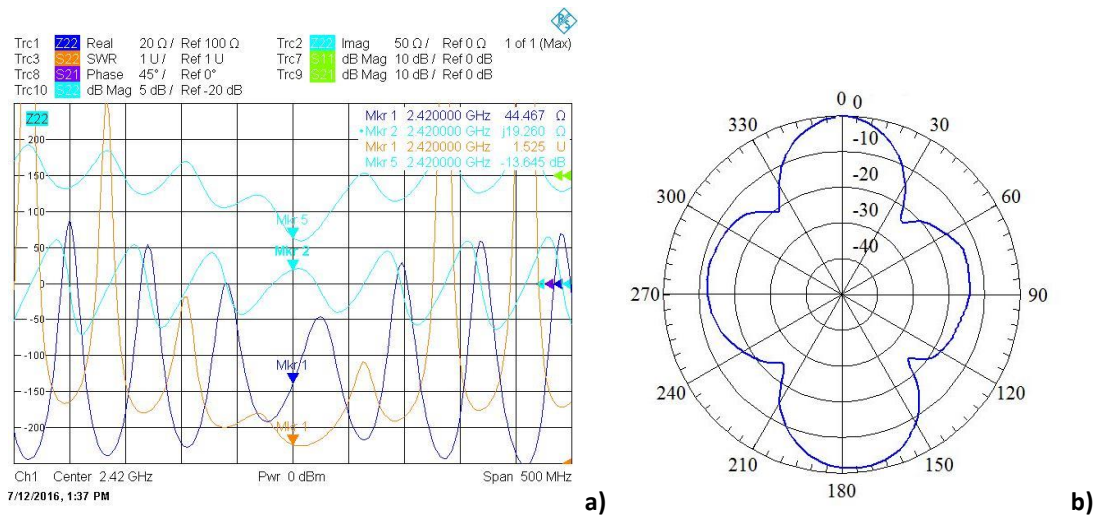


Figura 3.29 - Agrupamento de antenas suspensas: a) vista frontal; b) vista posterior.

A figura 3.30a) ilustra os resultados obtidos relativamente ao valor do SWR e da impedância da antena. A figura 3.30b) apresenta o diagrama de radiação da antena.



**Figura 3.30 - Agrupamento de antenas suspensas: a) SWR e impedância da antena; b) Diagrama de radiação.**

Analisando o resultado obtido na figura 3.30a), verifica-se que para a frequência pretendida obteve-se uma impedância de  $44,5 - j19,2 \Omega$ , um SWR de 1,5. No que concerne ao ganho da antena é de 9,3 dBi.

O último passo relativamente à construção da antena passou por colocá-la dentro de uma estrutura resistente que proteja a mesma de condições climáticas adversas e que ao mesmo tempo minimize o impacto visual (*radome*). Como tal, efetuou-se um pequeno estudo de qual o material mais indicado a utilizar, concluindo que tanto o PVC como o acrílico de 3 mm tinham a mesma influência sobre o sinal recebido. Posto isto, optou-se por utilizar o acrílico de 3 mm visto ser o mais fácil de trabalhar no caso da antena em questão. Antes de passar à construção da *radome* fez-se um último teste, de modo a determinar a distância mais indicada a que o acrílico deve estar da antena, optando-se por colocá-lo a 2 cm da antena. Os resultados obtidos podem ser visualizados na tabela 3.7.

**Tabela 3.7 - Distância ideal do acrílico à antena.**

Distância do acrílico à antena (cm)	Perda no ganho (dBi)
0,5	1
1	0,6
1,5	0,4
2	0,2
2,5	0,2
3	0

Posto isto, procedeu-se à construção da *radome* e à colocação da antena dentro da mesma, figura 3.31. A figura 3.32 apresenta o respetivo valor de SWR (1,6) e de impedância ( $45,0 - j21,9 \Omega$ ), bem como o diagrama de radiação após a colocação da

antena na *radome*. O valor do ganho da antena passou a ser de 9,1 dBi, valor muito próximo do obtido sem a proteção.

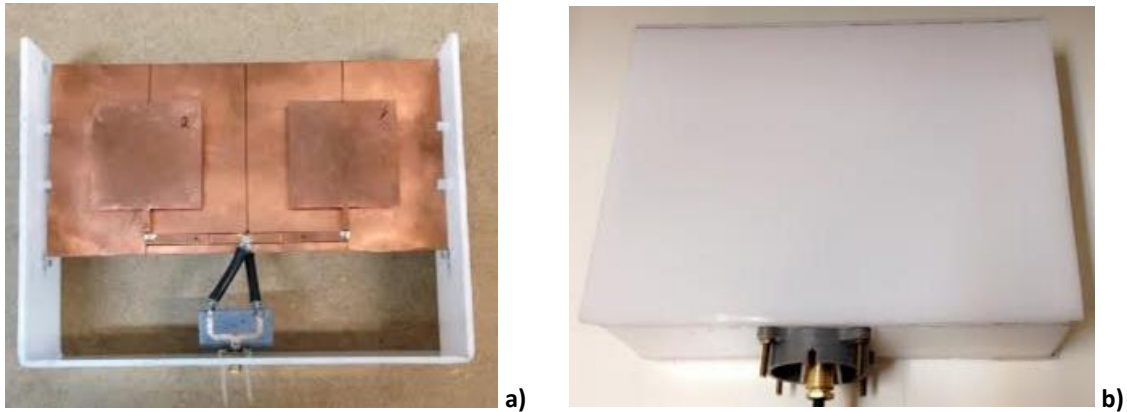


Figura 3.31 - Radome: a) interior; b) radome vedada.

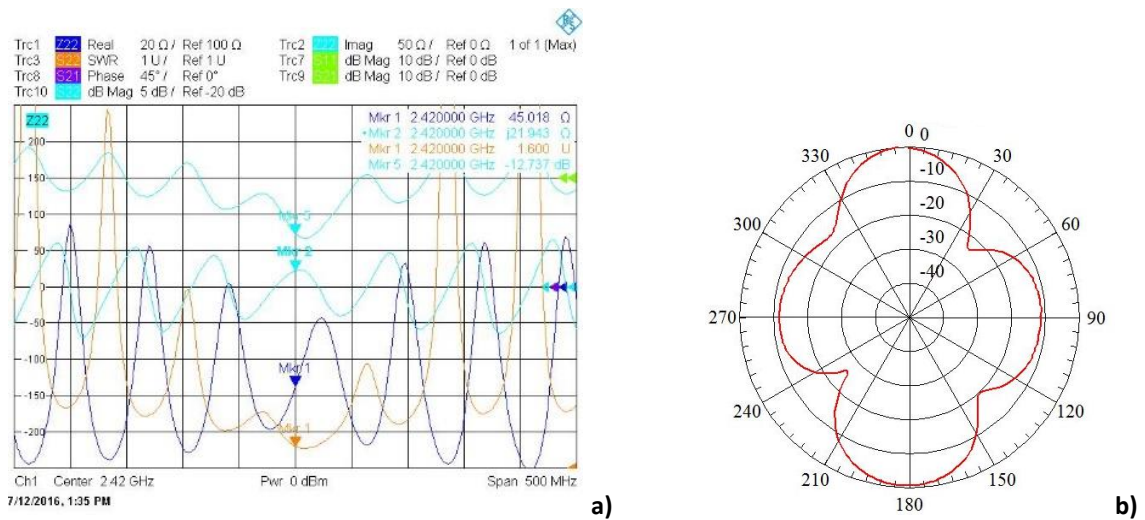


Figura 3.32 – a) SWR e impedância da antena; b) Diagrama de radiação.

## 4 Desenvolvimento dos módulos e do *software*

Neste capítulo são apresentados os requisitos necessários para a implementação do sistema de comunicação e o esquema do protótipo da rede de monitorização desde a Universidade da Madeira até ao Pico do Arieiro. São apresentados os processos de desenvolvimento dos nós sensores, como a alimentação, análise dos consumos, circuito eletrónico, construção e finalmente a programação do nó.

### 4.1 Requisitos do sistema e esquema da rede

Neste projeto é pretendido o desenvolvimento de um protótipo com capacidade de recolha de dados de modo autónomo ao longo de uma linha de vários quilómetros. Para tal, fez-se uso de uma rede de sensores sem fios, que permite a monitorização em tempo real de diversos parâmetros ambientais. Tendo presente que o protótipo será instalado no exterior, é importante que algumas características sejam levadas em consideração, tais como:

- Ter um baixo consumo energético, visto que não será alimentado pela corrente elétrica, mas sim por baterias de lítio recarregadas por um painel solar de baixa potência.
- Que possuam dimensões reduzidas de modo a causar o mínimo impacto visual.
- Os componentes eletrónicos do nó sensor deverão ser colocados dentro de uma caixa estanque, garantindo, assim, a proteção contra intempéries.
- Deve apresentar um baixo custo de produção, de modo a ser uma solução competitiva no mercado.

No que concerne à estação base, o nó coordenador encontra-se localizado no interior de um laboratório da universidade, conectado por USB (*Universal Serial Bus*) a um computador, sendo assim realizada a tarefa de transferência de dados bem como a sua alimentação. Os dados, por sua vez, são armazenados numa base de dados e posteriormente disponibilizados numa página *web*.

A figura 4.1 apresenta o esquema da rede desde a Universidade da Madeira até ao Pico do Arieiro. Para uma melhor identificação optou-se por numerar cada um dos nós, sendo o primeiro o nó coordenador. Recorreu-se à ferramenta *Google Earth* para efetuar o estudo acerca do terreno, mais propriamente acerca do perfil de elevação entre os nós sensores. O objetivo é comprovar que existe linha de vista entre os mesmos e que a comunicação é fiável. Assim, ao perfil de elevação traçou-se uma linha reta de modo a unir o início e o final de cada ligação, garantindo que nenhum monte obstrui a ligação. Os perfis de elevação entre os vários nós podem ser visualizados no Anexo A. Através da análise do perfil de elevação constatou-se que existe linha de vista entre os locais escolhidos apesar de algumas ligações oferecerem alguma preocupação devido à

proximidade da linha traçada com o relevo do terreno. Este facto deve-se a serem zonas mais planas, como é o caso das ligações entre os nós 3 e 4, 7 e 8 e entre os nós 9 e 10.



Figura 4.1 - Esquema da rede, linha de comunicação.

A rede é composta por um nó coordenador e catorze nós *routers*. Os nós terminais serão distribuídos em torno da linha de comunicação tendo em conta as aplicações a desenvolver. O nó 15 é apresentado como exemplo deste tipo. Os nós *routers* utilizam o agrupamento de antenas suspensas de 9,1 dBi que radiam em duas direções opostas ( $0^\circ$  e  $180^\circ$ ) e utilizam uma potência de transmissão de 0,5 dBm. O nó terminal utiliza uma antena omnidirecional de ganho 8,4 dBi e uma potência de transmissão de 1,6 dBm.

Como já mencionado, o nó coordenador encontra-se presente no Laboratório de Telecomunicações no piso -2, estando a 25 m do terraço da universidade. Como tal

colocou-se o primeiro nó *router* (nó 2) numa esquina no topo do edifício de modo a retransmitir a informação do nó coordenador para os restantes nós sensores e vice-versa. Para os restantes nós, a sua localização, a altitude e distância entre eles estão descritas na tabela 4.1.

**Tabela 4.1 - Dados acerca dos nós presentes na rede.**

Nó	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Distância ao nó anterior (m)
3	162	32°39'31.30"N	16°55'26.18"W	24,3
4	339	32°40'5.76"N	16°55'23.66"W	1078
5	463	32°40'35.83"N	16°55'42.17"W	1045
6	660	32°40'53.07"N	16°55'22.12"W	796
7	917	32°41'21.16"N	16°54'29.20"W	1180
8	1061	32°41'35.63"N	16°54'12.03"W	626
9	1231	32°42'10.87"N	16°54'15.37"W	1110
10	1467	32°42'36.26"N	16°54'27.58"W	879
11	1486	32°42'49.99"N	16°54'34.31"W	451
12	1578	32°43'18.56"N	16°54'55.76"W	1005
13	1700	32°43'39.27"N	16°55'32.96"W	1190
14	1782	32°44'3.91"N	16°55'41.78"W	796
15	1794	32°44'5.61"N	16°55'40.67"W	74,9

Há um aspeto a ter em consideração, o protótipo projetado para o nó *router* radia em duas direções opostas (180°). Observando a linha de comunicação projetada esta não é uma linha reta. Como tal, há que ter em consideração o diagrama de radiação do agrupamento de antenas suspensas (que não estará na máxima radiação) e o ângulo entre as ligações. A tabela 4.2 ilustra o ângulo entre duas ligações.

**Tabela 4.2 – Ângulo entre as ligações.**

Ligação entre os nós	Ângulo entre as ligações
3 ↔ 5	147°
4 ↔ 6	108°
5 ↔ 7	168°
6 ↔ 8	164°
7 ↔ 9	131°
8 ↔ 10	162°
9 ↔ 11	176°
10 ↔ 12	171°
11 ↔ 13	156°
12 ↔ 14	136°

Tendo o ângulo entre as ligações e com base nos modelos e nas medições realizadas torna-se possível estimar qual o nível de sinal esperado em cada ponto. No

entanto, há que lembrar que as medições efetuadas no meio urbano (parque da universidade) foi na presença de edifícios e veículos em redor, aumentando assim o valor da máxima variação em torno da curva de tendência. Contudo, a localização final escolhida para os nós conta com poucos ou nenhuns edifícios pelo meio, à exceção das ligações entre o nó 3 e 4, e o nó 4 e 5. A tabela 4.3 mostra os valores estimados para cada uma das ligações, incluindo a margem de 10 dB para a variação máxima do sinal, ou seja, para o pior caso.

**Tabela 4.3 - RSSI esperado na linha de comunicação.**

Ligação entre os nós	Potência recebida (dBm)
3 ↔ 4	-97
4 ↔ 5	-96
5 ↔ 6	-104
6 ↔ 7	-98
7 ↔ 8	-92
8 ↔ 9	-97
9 ↔ 10	-95
10 ↔ 11	-88
11 ↔ 12	-96
12 ↔ 13	-98
13 ↔ 14	-94

A antena do nó 5 deverá ser substituída optando por dois agrupamentos de duas antenas de modo a ajustar a antena na máxima radiação, pois o ângulo entre as ligações é demasiado elevado e desse modo o valor estimado ultrapassa a máxima sensibilidade do rádio.

## 4.2 Nó terminal

O nó terminal (*end device*) comunica diretamente com o nó *router* ou com o nó coordenador, sendo utilizado na recolha de informação e não tendo a capacidade de reencaminhar mensagens. Possui a vantagem de poder ser colocado no modo adormecido, otimizando, assim, o seu consumo de energia. Neste trabalho, os parâmetros monitorizados por este nó foram a temperatura e a humidade relativa do ar.

### 4.2.1 Alimentação e consumo energético

A alimentação do nó sensor foi realizada através de uma bateria de lítio, que fornece à saída uma tensão nominal de 3,7 V. Esta bateria detém a vantagem de possuir um circuito de proteção incluído, de modo a garantir que não carregue acima dos 4,2 V e não descarrega abaixo dos 3,0 V.

Efetua-se um estudo acerca do consumo energético total do nó. Para tal, foram tidos em consideração os consumos fornecidos pelos fabricantes de cada componente, para uma temperatura ambiente de 25°C, quando uma tensão de 3,3 V é aplicada. A tabela 4.4 apresenta os respetivos consumos. Obteve-se um consumo de 44,3 mA no modo ativo e 283,5 µA no estado adormecido.

**Tabela 4.4 - Consumo energético do nó terminal.**

Componente	Estado	
	Ativo (mA)	Adormecido (µA)
Arduíno FIO	3,8	180
Rádio XBee S2	40	3,5
Sensor DHT11	0,5	100
Consumo total	44,3	283,5

O nó terminal opera nos dois estados, ativo e adormecido, de modo a rentabilizar a vida útil da bateria. Para tal, criou-se um ciclo em que o nó permanece ativo o tempo necessário para se ligar à rede e transmitir os parâmetros medidos e de seguida volta a adormecer. A mensagem contendo a informação dos valores medidos é enviada com uma periodicidade de 10 s, dos quais 9,8 s está no estado adormecido e 0,2 s no estado ativo. Para esta situação o consumo do nó é de

$$\begin{aligned}
 \text{Consumo do nó} &= \frac{\text{Consumo total}_{\text{modo ativo}} + \text{Consumo total}_{\text{modo adormecido}}}{\text{Duração do ciclo}} & (4.1) \\
 &= \frac{44,3 \times 0,2 + 0,2835 \times 9,8}{10} = 1,16 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

Supondo um período de operação de dois meses sem recarga, a capacidade da bateria deve ser de,

$$\begin{aligned}
 \text{Capacidade da bateria} &= \text{Consumo do nó (mA)} \times \text{Duração (h)} & (4.2) \\
 &= 1,16 \times 1464 = 1698 \text{ mAh}
 \end{aligned}$$

tendo-se escolhido uma bateria de 1800 mAh. Pode-se recorrer a um pequeno sistema de captação de energia a partir do ambiente.

#### 4.2.2 Circuito e programação do nó

No sistema de teste será monitorizada a temperatura e a humidade do ar, bem como a tensão da bateria. O esquema do circuito pode ser visualizado na figura 4.2.

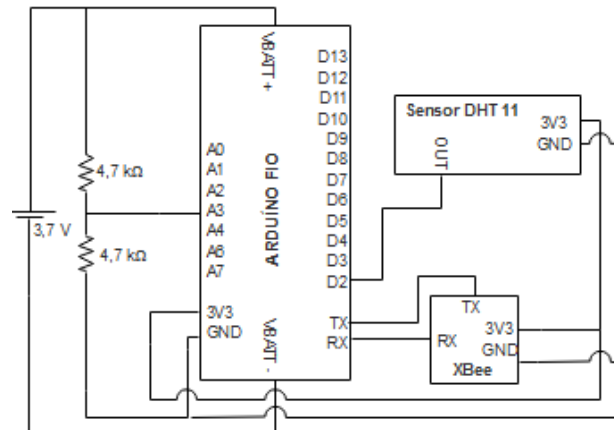


Figura 4.2 - Circuito do nó terminal.

Tendo em consideração a simplicidade do circuito optou-se por soldar os componentes diretamente numa placa PCI perfurada, não sendo necessário fabricar uma placa de circuito impresso.

O circuito eletrónico foi colocado dentro de uma caixa estanque com a norma IP65 de modo a estar protegido contra as condições climáticas adversas.

O sensor de temperatura e humidade (DHT11) não deve estar diretamente exposto ao sol, mas deve estar em contacto com o ar de modo a medir os parâmetros ambientais. Assim, colou-se o sensor dentro de um tubo, o qual está enroscado à base da caixa. Na sua extremidade foi colocado um filtro de modo a impedir o acesso de insetos e rastejantes. Tendo em conta que a caixa será colocada verticalmente, o tubo estará virado para o solo, não estando sujeito a que entre água para o interior da caixa. Para impedir a entrada de humidade na caixa vedou-se com silicone o acesso do sensor ao interior da mesma.

Na configuração do módulo XBee como nó terminal fez-se o *update* da *firmware* “ZIGBEE END DEVICE API” e definiu-se a *PAN ID* como 99. No separador Sleep Mode, SM, foi necessário seleccionar a opção PIN HIBERNATE [1] de modo a que o nó possa entrar no modo adormecido. Relativamente aos restantes parâmetros mantiveram-se as configurações predefinidas pelo *firmware*.

Já no que diz respeito à programação do Arduíno o fluxograma da figura 4.3 ajuda a uma melhor compreensão do programa desenvolvido em que na figura 4.3b) tem-se o fluxograma da função ReadAndSend().

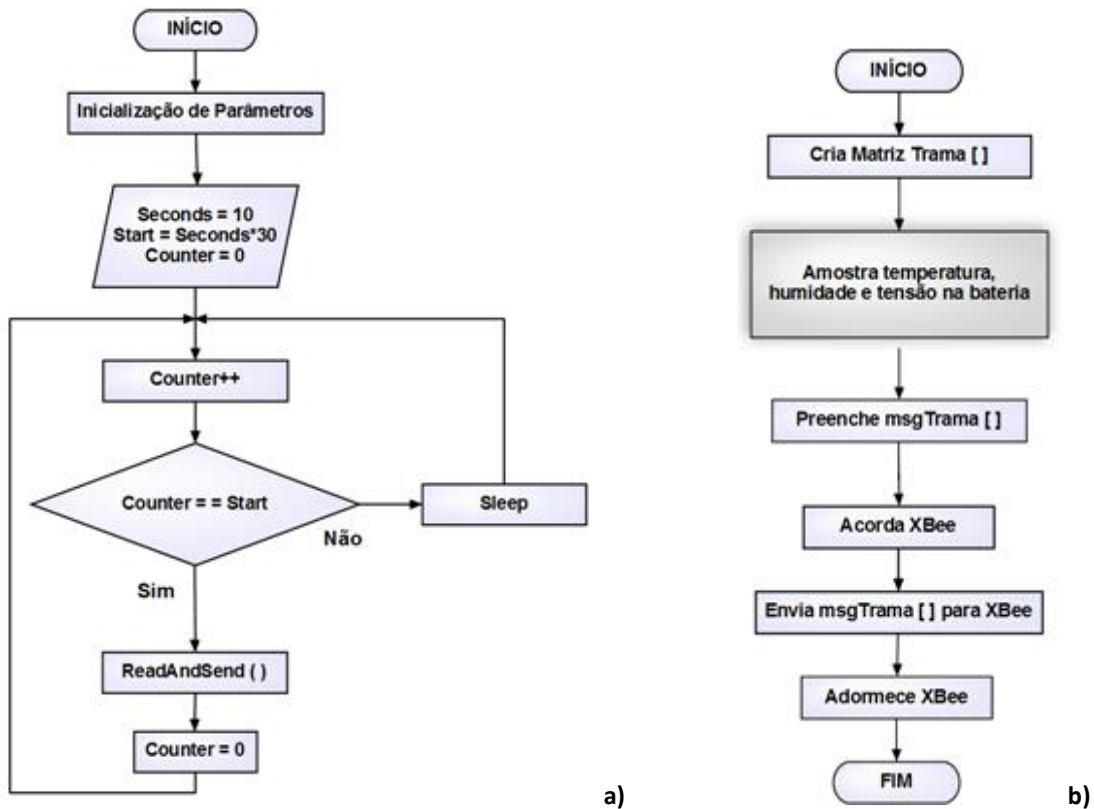


Figura 4.3 - Fluxograma referente ao nó terminal: a) código principal; b) função ReadAndSend().

O código implementado no Arduino, referente ao nó terminal, pode ser visto no anexo B1.

### 4.3 Nó router

O nó *router* tem como objetivo a retransmissão das mensagens oriundas dos nós sensores. Como tal, o nó está sempre no modo ativo. Por este motivo o seu consumo é relativamente elevado.

#### 4.3.1 Alimentação e consumo energético

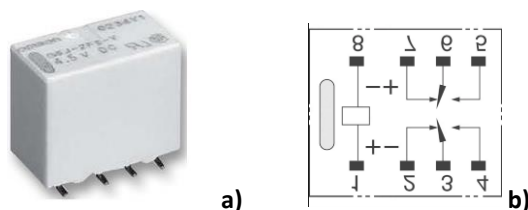
De modo a estimar qual a bateria a utilizar, efetuou-se um estudo acerca do consumo energético do nó *router*. Para tal, novamente, foram tidos em consideração os consumos fornecidos e que foram apresentados na tabela 4.1 para o Arduino e o XBee, sendo o consumo total previsto para o nó *router* de 43,8 mA.

O inverno é a estação do ano com menor radiação solar incidente. Tendo em consideração os dados climatológicos dos últimos invernos na Ilha da Madeira optou-se por utilizar uma bateria com capacidade suficiente para assegurar o funcionamento do nó durante cinco dias sem sol. Assim, recorrendo à expressão (4.2) calculou-se a capacidade necessária para tal, sendo de

$$\text{Capacidade da bateria} = 43,8 \times 120 = 5256 \text{ mAh} \quad (4.3)$$

Tendo em conta as baterias de lítio disponíveis em laboratório optou-se por ligar em paralelo 3 baterias de 2500 mAh, perfazendo uma capacidade máxima de 7500 mAh.

Embora tendo em consideração o circuito de proteção que as baterias dispõem, optou-se por anexar um circuito ON-OFF para salvaguardar que o nível da bateria não atinga o mínimo descrito pelo fabricante, definindo um valor mais elevado, ajudando, assim, a que a mesma tenha uma vida útil mais longa. Este circuito é composto por um relé, *Omeron latching relay G6-JU-2FS-Y* [43], apresentado na figura 4.4.



**Figura 4.4 – Omeron latching relay G6-JU-2FS-Y: a) relé; b) circuito interno do mesmo.**

O relé é controlado por dois impulsos provenientes do microcontrolador. Este comuta de estado ao receber por parte do microcontrolador um impulso de amplitude de 3 V, ou seja, quando a tensão da bateria lida pelo microcontrolador estiver abaixo do valor pré-definido no código (3,5 V) será enviado o tal impulso. Um dos motivos pelo qual escolheu-se este relé deve-se ao facto do seu consumo ser bastante reduzido, uma vez que necessita de 33,7 mA, somente no momento em que ocorre a comutação de estado.

Relativamente ao carregamento das baterias, tendo em conta o consumo do nó (43,8 mA), calculou-se uma potência consumida pelo nó de 144,54 mW. O próximo fator a ter em consideração foi a eficiência do controlador de carga. Constatou-se que esta é de 82,5%. Assim sendo, a potência de entrada deve ser de 175,2 mW. Visto que o sistema permanece em funcionamento 24 h por dia conclui-se que o consumo diário é de 4,2 Wh.

Através do boletim climatológico mensal do Funchal, disponibilizado pelo Instituto de Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) [44], constatou-se que nos últimos anos o mês com menor horas de insolação foi dezembro de 2012, onde foram registadas 139,7 horas, o que dá uma média diária de 4,5 horas de sol. Desta forma, dividido o consumo por este valor conclui-se que o painel deve gerar 0,93 W. No entanto, supondo que as baterias atravessaram um período de 5 dias sem sol, é desejado que seja possível carregá-las por completo num único dia. Assim, será necessário um painel ou um conjunto de painéis que gerem 4,65 W. Como tal, optou-se por utilizar 3 painéis fotovoltaicos em paralelo de modo a ser possível extrair 990 mA de corrente perfazendo, assim, 5,94 W. As características dos painéis utilizados podem ser vistas na tabela 4.5.

**Tabela 4.5 - Características dos painéis fotovoltaicos.**

<b>Modelo</b>	<b>M-05358</b>
<b>Dimensões</b>	180 mm x 130 mm x 3 mm
<b>Tensão típica em carga</b>	6 V
<b>Corrente típica em carga</b>	330 mA
<b>Potência</b>	2 W

Para o carregamento da bateria com o painel solar fez-se uso de um controlador de carga da Adafruit, o MCP73871 USB/Solar [45], representado na figura 4.5.



**Figura 4.5 - Carregador solar MCP73871.**

Os seus principais requisitos e características são os seguintes:

- Baterias de Lítio de 3,7 V/ 4,2 V;
- Painéis solares de 5 V e 6 V;
- Taxa máxima de carregamento pré-definida de 500 mA, mas pode ser ajustada desde 50 mA até 1 A.

O controlador de carga oferece uma característica denominada de *Load Sharing*, ou seja, a energia fornecida pelos painéis é utilizada simultaneamente no carregamento das baterias e na alimentação do nó. Uma vez que as baterias estejam completamente carregadas, e enquanto houver sol, o nó passa a ser alimentado através da energia gerada através dos painéis, de modo a poupar a bateria.

#### **4.3.2 Circuito e programação do nó**

A figura 4.6 apresenta o circuito do *router*. O principal objetivo do nó consiste na transmissão de informação e não na medição de parâmetros. Contudo, este foi projetado para monitorizar o nível de tensão das baterias, o consumo total do nó e a produção por parte dos painéis fotovoltaicos.

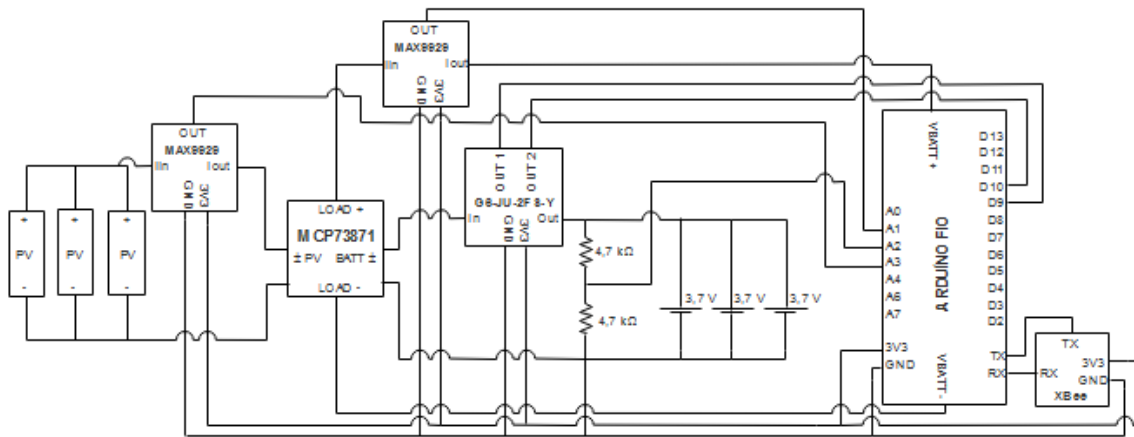
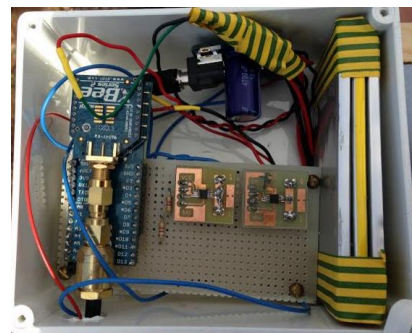


Figura 4.6 - Circuito do nó router.

O circuito foi inserido numa caixa estanque com a norma IP65. Tendo em conta que se utilizaram três painéis fotovoltaicos em paralelo foi necessário construir um suporte para os mesmos. A figura 4.7a) ilustra os painéis no respetivo suporte e a figura 4.7b) mostra os vários componentes eletrónicos no interior da caixa estanque.



a)



b)

Figura 4.7 - Nó router: a) Painéis fotovoltaicos em paralelo; b) Caixa estanque com os respetivos componentes no interior.

A estrutura foi colocada no terraço da Universidade da Madeira para a realização de testes. Neste protótipo utilizou-se um agrupamento de duas antenas suspensas. A instalação do nó *router* está ilustrada na figura 4.8.



Figura 4.8- Nó router situado no terraço da Universidade.

Na configuração do módulo como *router* da rede fez-se o *update* da *firmware* “ZIGBEE END ROUTER API” e definiu-se a *PAN ID*, novamente como 99. O fluxograma referente à programação do nó está representado na figura 4.9.

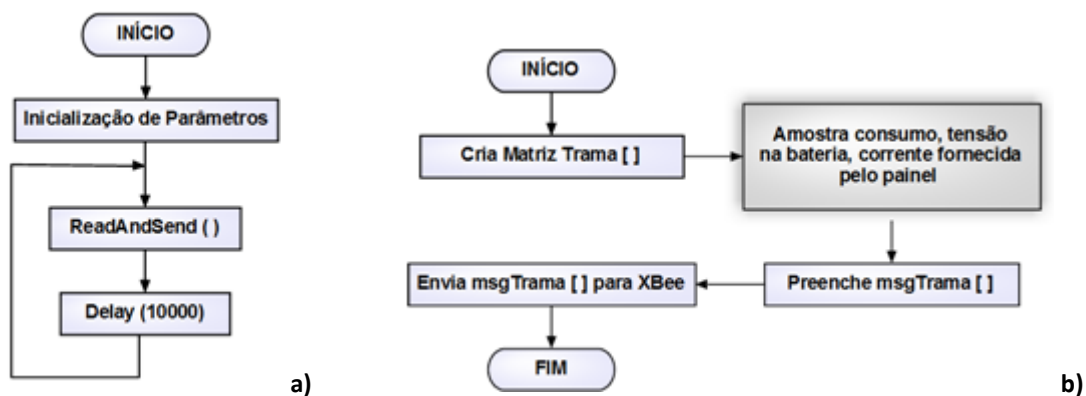


Figura 4.9- Fluxograma referente ao nó router: a) código principal; b) função ReadAndSend().

Após a leitura por parte dos sensores de corrente a mensagem é compilada e enviada pela rede. As mensagens são enviadas com uma periodicidade de 10 s. O código implementado no Arduíno pode ser visualizado no anexo B2.

### 4.3.3 Protótipo final

Após terem sido efetuados testes no terraço da universidade procedeu-se à montagem do protótipo final. De forma a assegurar o funcionamento do nó ao longo de

cinco dias sem sol é necessário que a bateria tenha uma capacidade de 5256 mAh. No entanto de modo a baixar o custo de implementação optou-se por utilizar uma capacidade da bateria de 5000 mAh (2 baterias de 2500 mAh ligadas em paralelo) que garante o funcionamento ao longo de quatro dias e dezoito horas. Relativamente ao carregamento da bateria optou-se por utilizar 2 painéis fotovoltaicos, sendo possível extrair 660 mA de corrente, perfazendo assim 3,96 W.

Também foi adicionado um sensor que mede a temperatura do ar e a humidade relativa (sensor DHT11). Na figura 4.10 é possível observar o novo circuito eletrónico do nó router.

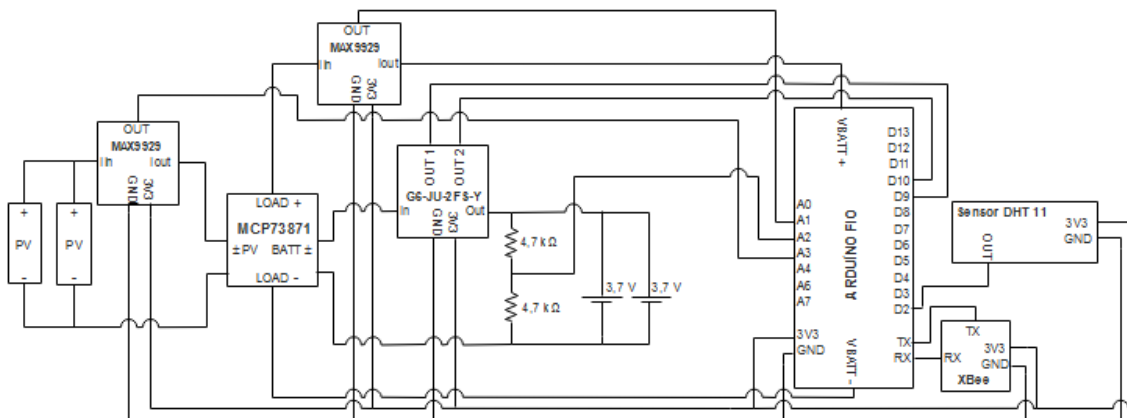


Figura 4.10- Circuito eletrónico do protótipo final do nó router.

A figura 4.11 ilustra o protótipo final, onde também é possível observar o tubo enroscado à base da caixa estanque, contendo no seu interior o sensor DHT11. A antena roda na sua base, podendo ser orientada para a direção desejada.

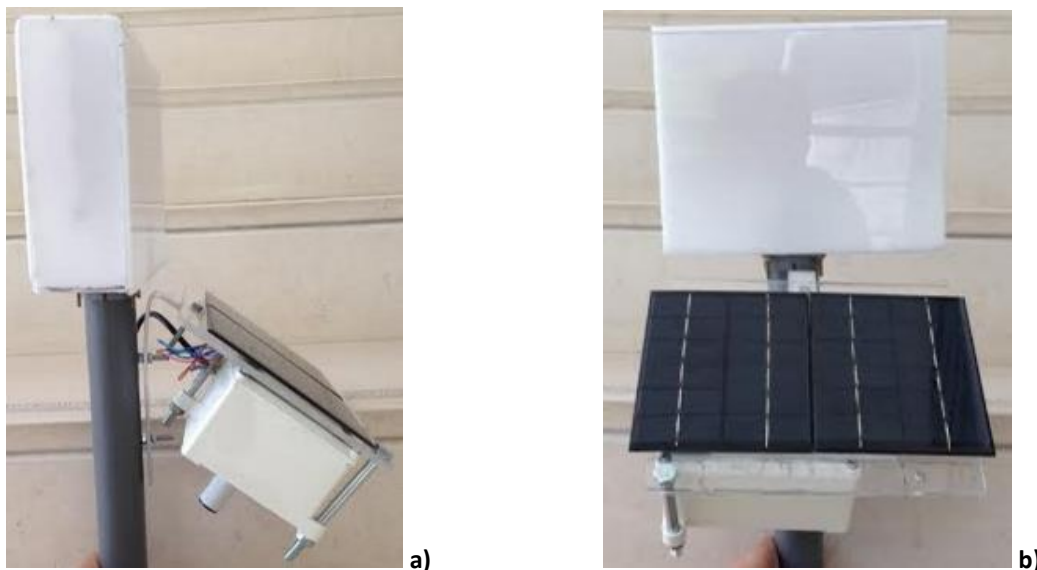


Figura 4.11 - Protótipo final: a) vista lateral; b) vista frontal.

#### 4.3.4 Custo do protótipo final

A escolha da maioria dos componentes foi efetuada com base na descrição das folhas características. Custos adicionais ao protótipo final do nó *router* são a caixa com a norma IP65, a fita de velcro, os tubos PVC, o silicone, o filtro, o acrílico, o material utilizado na construção da antena, entre outros. Na tabela 4.6 são apresentados alguns dos componentes utilizados com uma curta descrição. Os preços datam de agosto de 2016.

Tabela 4.6 - Análise financeira do protótipo final do nó *router*.

Qt.	Descrição	Referência	Preço/1u (€)	Obs.
1	Arduíno fio	DEV-10116	22,28	Sparkfun
1	Módulo XBee Series 2	Digi international XB24-Z7SIT-004	21,51	Farnell
2	Resistência de 4,7KΩ	TE Connectivity CFR100J4K7	0,07	Farnell
2	Bateria de lítio, 2500 mAh, 3,7 V	328	13,36	Adafruit
2	Painel solar, 6 V, 330 mA, 2 W	M-05358	5,39	Amazon
1	Controlador de carga, MCP73871	390	15,65	Adafruit
2	Sensor de corrente MAX9929F	Maxim Integrated Products MAX9929FAUA	1,83	Farnell
1	DHT11, sensor de temperatura do ar e humidade relativa	386	4,49	Adafruit
1	Relé G6-JU-2FS-Y	Omeron Electronic Components	2,53	Farnell
<b>Total</b>				<b>107,76 €</b>

O preço total para o nó *router*, sem contar com os custos adicionais, é de 107,76 €.

#### 4.4 Estação meteorológica

Desenvolveu-se uma estação meteorológica como intuito de monitorizar diferentes parâmetros relativamente às condições climatéricas, tais como, temperatura do ar, humidade relativa, pluviosidade e velocidade e direção do vento.

##### 4.4.1 Sensores

Nas próximas secções são apresentadas as características de cada um dos sensores utilizados no projeto da estação, bem como o seu princípio de funcionamento.

#### 4.4.1.1 Sensor de temperatura e humidade

Na monitorização da temperatura do ar e da humidade relativa utilizou-se o Kit Davis VP2 [46] que faz uso do sensor SHT11, apresentado na figura 4.12.



Figura 4.12- Sensor SHT 11: a) anteparo contra radiação; b) localização do sensor; c) sensor de temperatura do ar e humidade relativa SHT11.

O sinal de saída é obtido através de um canal de comunicação série dedicado, utilizando um ADC (*Analog to Digital Converter*) de 14 bits. O valor típico da tensão de alimentação do sensor apresentado pelo fabricante é de 3,3 V o que se torna vantajoso tendo em conta que é possível alimentá-lo diretamente através do Arduino FIO. A figura 4.13 ilustra o esquema elétrico de interligação entre o sensor e o microcontrolador.

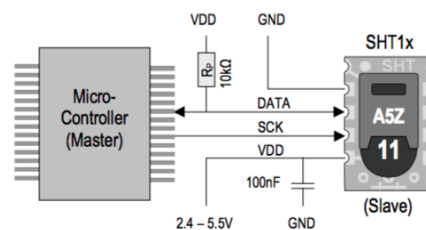


Figura 4.13 - Esquema de interligação entre o sensor e o microcontrolador.

Como pode ser visto, são utilizados dois pinos do microcontrolador para a interface com o sensor, o SCK (*Serial Clock Input*) e o DATA (*Serial Data*). O SCK é utilizado para sincronizar a comunicação entre o microcontrolador e o sensor. O DATA tem como função transferir os dados do microcontrolador para o sensor e do sensor para o microcontrolador. À alimentação do sensor, tal como está ilustrado, é acoplado um condensador de 100 nF que tem como objetivo filtrar variações bruscas no sinal de entrada, reduzindo os efeitos de ruído. Relativamente ao código utilizado na programação do sensor, o fabricante disponibiliza uma biblioteca apropriada.

#### 4.4.1.2 Pluviómetro

O pluviómetro utilizado foi desenvolvido pela *Spectrum Technologies*, mais precisamente o *Tipping Bucket Rain Gauge* [47]. Este apresenta uma precisão de 0,254

mm por comutação. Para uma melhor compreensão do seu funcionamento, na figura 4.14 é possível observar a secção interna do pluviómetro bem como a sua mecânica.

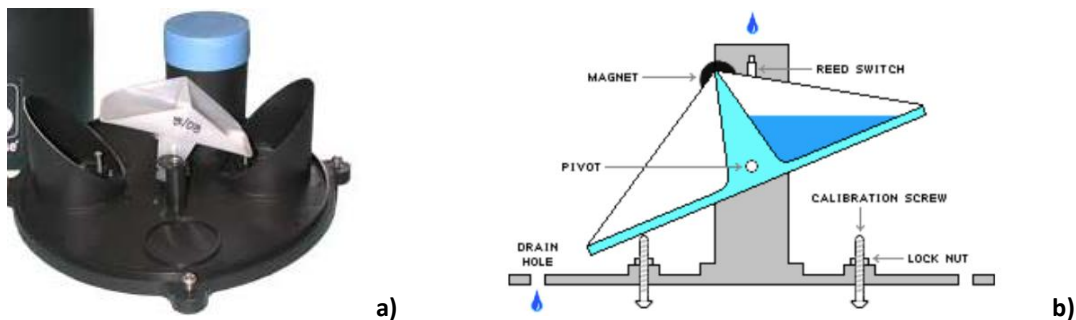


Figura 4.14 – Pluviómetro: a) secção interna; b) esquemático.

O princípio de funcionamento deste pluviómetro é relativamente simples, baseando-se na comutação de um *switch* magnético. Sempre que é colhida água no balde, esta é filtrada para o ponto central e cai num dos reservatórios. Tal como está ilustrado, existem dois reservatórios iguais, correspondendo a um determinado volume de água. Assim que um dos reservatórios fica cheio, o peso da água faz com que o reservatório incline para o lado oposto e descarregue a água pelas aberturas existentes na secção inferior do balde. Cada vez que existe uma comutação o ímã passa próximo do *reed switch* e gera um impulso elétrico. A contabilização do número de descargas de água é feita através da contagem do número de impulsos. A saída do pluviómetro é ligada a um pino digital do Arduino FIO no modo HIGH e quando se dá uma comutação o estado do pino é alterado de HIGH para LOW, sendo contado o número de interrupções para aferir a intensidade de pluviosidade.

#### 4.4.1.3 Anemómetro

No que concerne à medição da velocidade e da direção do vento utilizou-se um anemómetro de copos. O anemómetro disponível não apresenta nenhum registo gravado, não sendo possível determinar qual o seu modelo nem ter acesso à sua folha característica. Assim, de modo a entender o funcionamento do sensor começou-se por desvendar para cada um dos 5 cabos que este possui qual a sua funcionalidade. Para tal procedeu-se à desmontagem do anemómetro e fazendo uso de um multímetro e de um osciloscópio estudou-se o seu funcionamento. Conclui-se que:

- Cabo azul: GND
- Cabo castanho: VCC
- Cabo verde: Sinal de saída da direção do vento
- 2 Cabos pretos: Um corresponde ao sinal de saída referente à velocidade do vento e o outro será GND.

Na medição da velocidade do vento são utilizados três copos dispostos na vertical que giram na presença de vento. O anemómetro utilizado utiliza um *reed switch* para gerar seis interrupções por volta (existem 6 ímanes por volta). O anemómetro pode

ser alimentado diretamente através do microcontrolador, pois este requer uma tensão de alimentação de 3,3 V.

De modo a medir os valores da velocidade de vento corretamente através do microcontrolador foi necessário proceder à calibração do sensor. Para isso foi utilizado um túnel de vento para medir as rotações e um anemómetro comercial (Cup Thermo-Anemometer AN400 [48]) para medir a velocidade.

A calibração do anemómetro fez-se por comparação, para velocidades do vento entre 0,6 m/s e 10,7 m/s. A tabela e o gráfico referente aos resultados obtidos podem ser visualizados no Anexo C1.

Para se medir a direção do vento viu-se que numa superfície circular existem 8 chaves magnéticas (*reed switches*), as chaves estão colocadas de acordo com os pontos cordeais principais (Norte, Sul, Este, Oeste) e secundários (Nordeste, Noroeste, Sudeste, Sudoeste). Sobre o disco, fixo a um eixo vertical, está uma paleta de alumínio que gira livremente de acordo com a direção do vento. A cada uma das 8 chaves magnéticas está associada uma resistência. Assim, para cada volta de 360° o Arduino lê um valor compreendido entre 0 e 1023. Logo, a variação da paleta corresponde à variação da direção do vento, ângulo de azimute.

De igual modo foi necessário proceder à calibração do sensor. Para tal ligou-se o cabo da direção do vento a um pino analógico do Arduino e rodou-se o leme de grau em grau. No Anexo C2 é possível visualizar os valores obtidos bem como o gráfico correspondente.

#### 4.4.1.4 Sensor de corrente MAX9929F

Utilizou-se um sensor de corrente de modo a medir o consumo total do protótipo, bem como a produção por parte do painel fotovoltaico. O sensor utilizado foi o MAX9929F [49]. Este sensor apresenta um baixo consumo, na ordem dos 20  $\mu\text{A}$ , e a tensão de alimentação pode variar entre os 2,5 V e os 5,5 V. A figura 4.15 ilustra o circuito de operação.

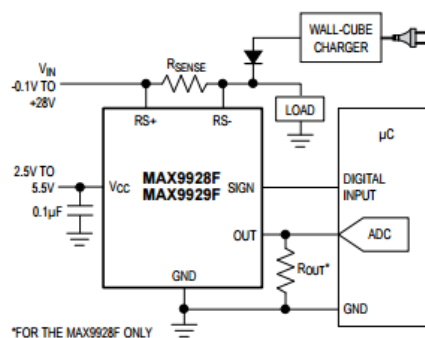


Figura 4.15 - Circuito eletrónico do sensor MAX9929F.

A tensão de saída do sensor MAX9929F é expressa por,

$$V_{out} = (R_{sense} \times I_{load}) \times (A_v) \quad (4.4)$$

onde  $R_{sense}$  é a resistência situada entre os terminais RS+ e RS- do sensor,  $I_{load}$  corresponde à corrente presente no circuito e o  $A_v$  é o ganho de tensão (50 V/V).

#### 4.4.2 Alimentação e consumo energético

Na alimentação da estação meteorológica utilizou-se uma bateria de 1800 mAh. No que concerne ao carregamento da bateria, de modo a tornar o sistema autónomo, utilizou-se o painel fotovoltaico M-05206. As suas características podem ser vistas na tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Características do painel fotovoltaico M-05206.

<b>Modelo</b>	<b>M-05206</b>
<b>Dimensões</b>	90 mm x 125 mm x 3 mm
<b>Tensão típica em carga</b>	5 V
<b>Corrente típica em carga</b>	230 mA
<b>Potência</b>	1,15 W

Para o carregamento da bateria com o painel solar fez-se uso do controlador de carga MCP73871 USB/Solar.

De forma a estimar a duração total da bateria estudou-se o consumo total do nó, sendo este apresentado na tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Consumo energético da estação meteorológica.

Componente	Estado	
	Ativo	Adormecido
<b>Arduíno FIO</b>	3,8 mA	180 $\mu$ A
<b>Rádio XBee S2</b>	Tx – 40 mA	3,5 $\mu$ A
<b>Sensor SHT11</b>	0,55 mA	0,3 $\mu$ A
<b>Anemómetro</b>	1,7 mA	
<b>Pluviómetro</b>	2 $\mu$ A	
<b>Sensor MAX9929F</b>	20 $\mu$ A	
<b>Consumo total</b>	46 mA	1,9 mA

Para uma temperatura ambiente de 25°C quando é aplicada uma tensão de 3,3 V obteve-se um consumo de 46 mA no modo ativo e 1,9 mA no estado adormecido.

Tendo em conta que a estação meteorológica é um nó terminal, que opera nos dois estados, ativo e adormecido, a periodicidade de medição dos parâmetros é de 10 s, em que 9,8 s o nó permanece no modo adormecido e 0,2 s no modo ativo.

O consumo médio do nó, através da expressão 4.1, é de,

$$\text{Consumo do nó} = \frac{46 \times 0,2 + 1,9 \times 9,8}{10} = 2,78 \text{ mA} \quad (4.5)$$

sendo a duração da bateria de

$$\text{Duração}_{\text{bateria}} = \frac{1800}{2,78} = 647,48 \text{ h} \quad (4.6)$$

Conclui-se que a bateria do nó sensor tem uma autonomia de aproximadamente 27 dias sem a presença de luz solar.

#### 4.4.3 Circuito e programação do nó

O esquema do circuito do nó sensor está ilustrado na figura 4.16. O circuito foi implementado numa placa impressa.

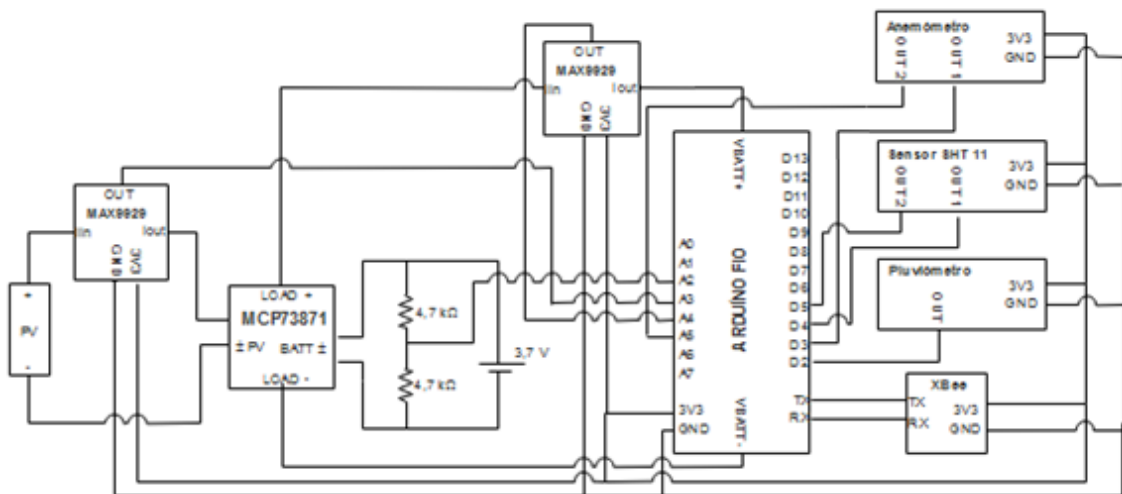


Figura 4.16 - Circuito da estação meteorológica.

A estrutura foi colocada em ambiente exterior sendo necessário tomar as devidas precauções. Na figura 4.17a) é possível visualizar a caixa estanque com a placa PCI impressa e os vários componentes. A estrutura final da estação meteorológica pode ser vista na figura 4.17b). A estação foi colocada no terraço da Universidade da Madeira de modo a ser testada e a comprovar o seu bom funcionamento.

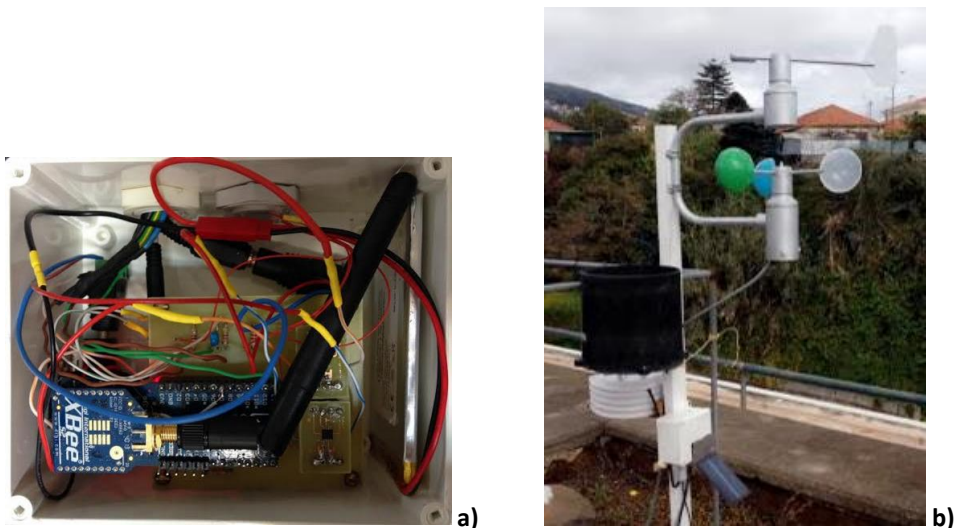


Figura 4.17 – Estação meteorológica: a) caixa estanque do nó sensor com os respetivos componentes no interior; b) estrutura final.

Para a programação do módulo XBee utilizou-se a mesma configuração que no nó terminal, *End Device*.

O fluxograma da figura 4.18 ajuda a uma melhor compreensão do programa desenvolvido para o Arduino. Na figura 4.18b) tem-se o fluxograma da função *ReadAndSend()* e na figura 4.18c) o fluxograma que diz respeito as funções *CountRainmeter()* e *CountAnemometro()*.

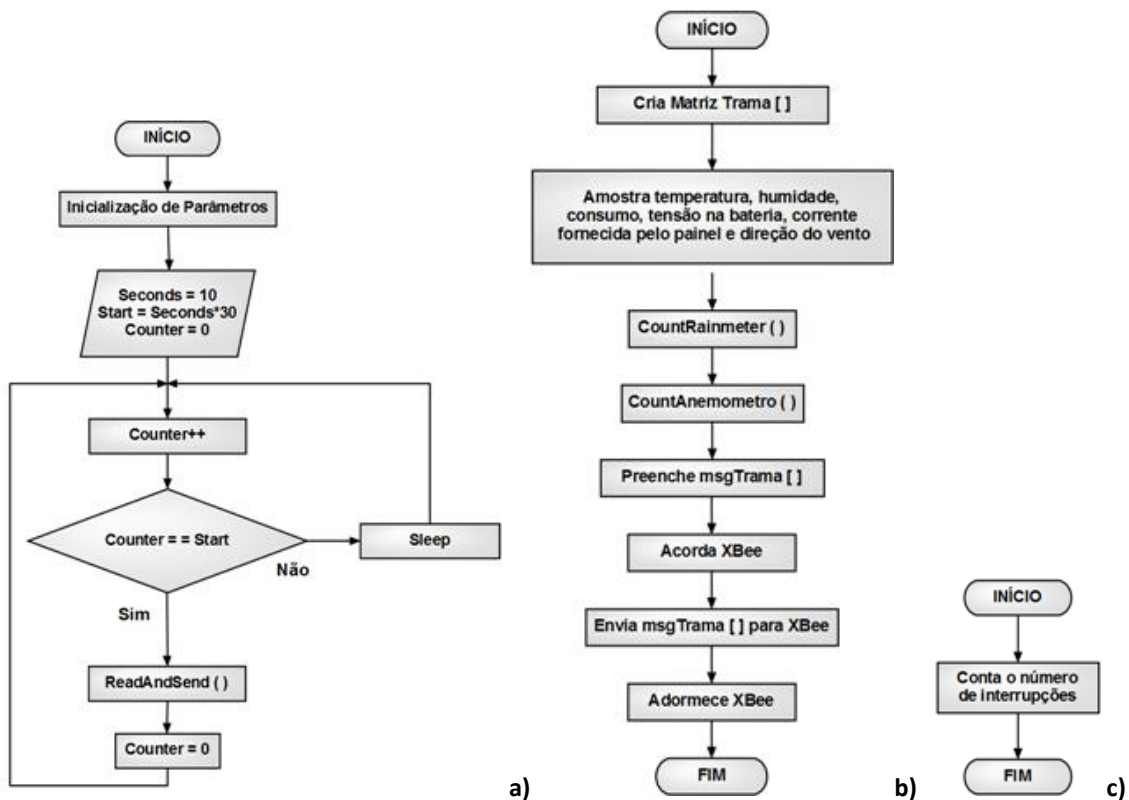


Figura 4.18 -Fluxograma referente à estação meteorológica: a) código principal; b) função *ReadAndSend()*; c) função *CountRainmeter()* e *CountAnemometro()*.

O código implementado no Arduino, em linguagem C, referente ao nó da estação meteorológica pode ser visto no anexo B3.

#### 4.4.4 Custo da estação meteorológica

A escolha da maioria dos componentes foi efetuada com base na descrição das folhas características. Outros custos adicionais à estação meteorológica são a caixa com a norma IP65, a estrutura em madeira, a fita de velcro, o tubo PVC e o silicone. Na tabela 4.9 são apresentados alguns dos componentes utilizados com uma curta descrição. Os preços datam de agosto de 2016. Tendo em conta que o anemómetro utilizado não tem registo, escolheu-se um que tivesse a mesma funcionalidade e com um preço acessível.

**Tabela 4.9 - Análise financeira da estação meteorológica.**

Qt.	Descrição	Referência	Preço/1u (€)	Obs.
1	Antena monopolo, 2,4 GHz	Pulse engineering W1030	1,82	Farnell
1	Arduino fio	DEV-10116	22,28	Sparkfun
1	Módulo XBee Series 2	Digi international XB24-Z7SIT-004	21,51	Farnell
2	Resistência de 4,7KΩ	TE Connectivity CFR100J4K7	0,07	Farnell
1	Bateria de lítio, 2000 mAh, 3,7 V	2011	11,20	Adafruit
1	Painel solar, 5 V, 230 mA, 1,15 W	M-05206	6,95	Amazon
1	Controlador de carga, MCP73871	390	15,65	Adafruit
2	Sensor de corrente MAX9929F	Maxim Integrated Products MAX9929FAUA	1,83	Farnell
1	Pluviómetro	3665R	151	Spectru
1	Sensor de temperatura do ar e humidade relativa	SHT11	19,21	Farnell
1	Anemómetro	7911	115,21	Davisnet
<b>Total</b>				<b>368,63 €</b>

O preço total para a estação meteorológica, sem contar com os custos adicionais, é de 368,63 €. Como se pode averiguar, os componentes com um preço mais elevado são essenciais para o funcionamento da estação.

#### 4.5 Aplicação de visualização na web

Os parâmetros medidos pelos nós sensores podem ser visualizados em tempo real através de uma interface gráfica, utilizando a internet, que por sua vez pode ser

consultada dentro ou fora do domínio da universidade. A página está disponível no seguinte *link*: <http://www.cee.uma.pt/hardlab/wsn/wsn/students/>. O fluxograma da aplicação está representado na figura 4.19.

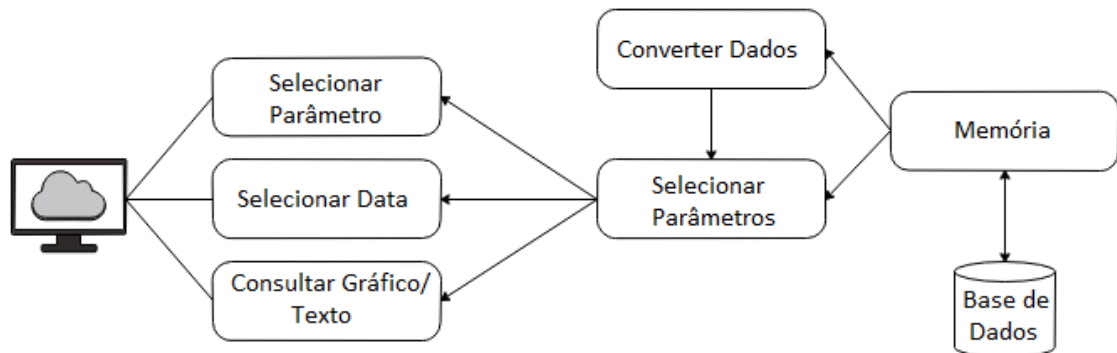


Figura 4.19 - Fluxograma da aplicação web.

Os dados recebidos são processados, tratados e armazenados numa base de dados, desenvolvida anteriormente no âmbito de outro trabalho. Os dados recolhidos pelos nós sensores são armazenados em diferentes tabelas, na base de dados, possibilitando, deste modo, ao utilizador aceder aos dados em qualquer data desejada. Os dados podem ser visualizados de duas formas distintas, em gráfico ou em texto.

A figura 4.20 ilustra a interface da página, onde existem duas janelas para a visualização gráfica ou apresentação dos valores gravados.

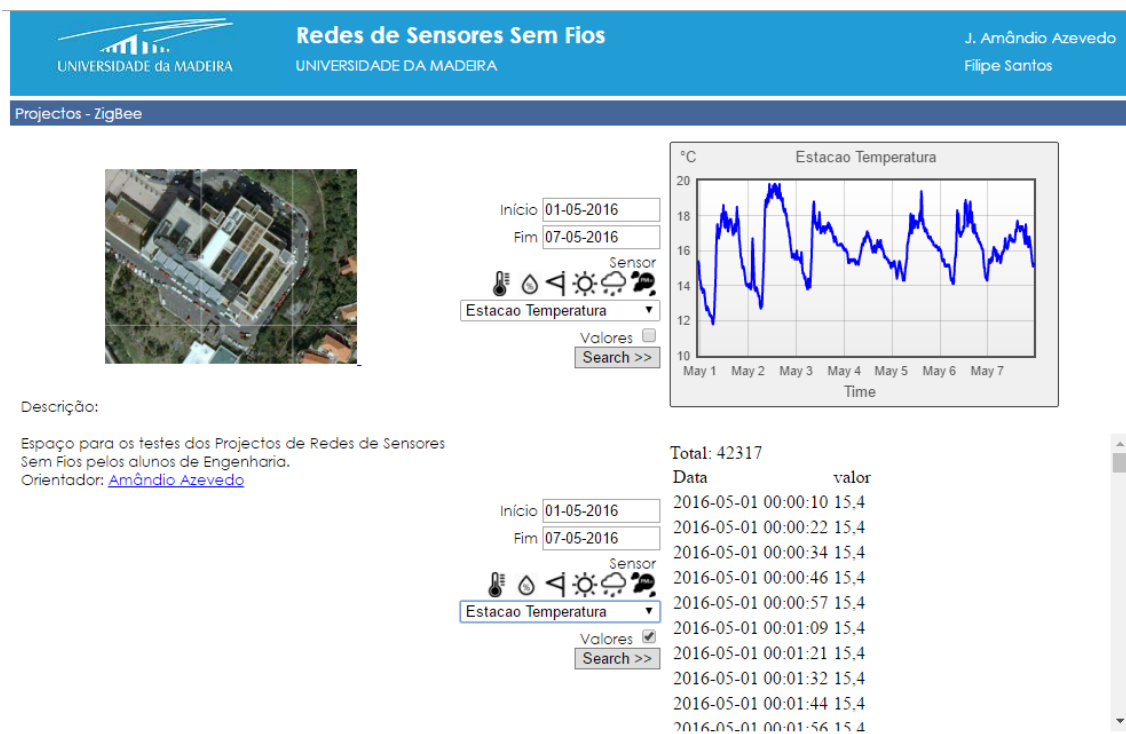


Figura 4.20 - Interface gráfica da aplicação.



## 5 Testes e resultados

Neste capítulo, primeiramente, são apresentados os testes de sinal efetuados à linha de comunicação e os respetivos resultados. Numa segunda fase averiguou-se o comportamento dos nós sensores relativamente à captação de energia e alimentação. Por último, os resultados obtidos pela estação meteorológica foram comparados com os dados provenientes do IPMA de modo a avaliar o seu grau de fiabilidade.

### 5.1 Linha de comunicação

Para avaliar o desempenho da linha de comunicação desde a Universidade da Madeira até ao Pico do Arieiro efetuaram-se testes em algumas ligações.

Um dos testes consistiu em medir os parâmetros ambientais, tendo-se avaliado as ligações entre os nós 3 e 4, entre os nós 4 e 5 e entre o nó 5 e um nó terminal desenvolvido para efeitos de teste. A figura 5.1 obtida através do *Google Earth* mostra a distribuição geográfica dos nós.

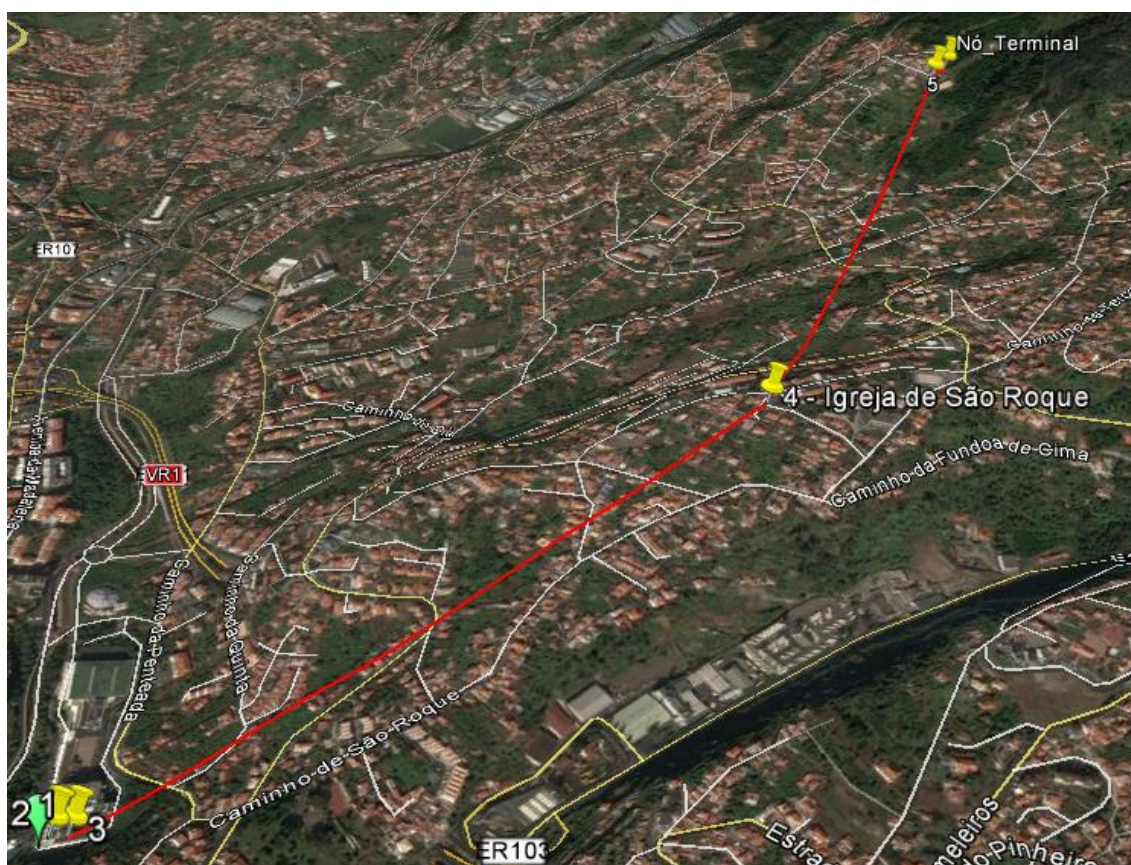


Figura 5.1 - Localização geográfica dos nós sensores.

O nó terminal encontra-se a 494 m de altitude. Este foi colocado a 31 m do nó 5 com o intuito de recolher dados de uma zona com vegetação.

A tabela 5.1 mostra as antenas utilizadas em cada um dos nós, bem como a potência de transmissão utilizada.

**Tabela 5.1 - Antenas e potência de transmissão utilizadas na linha de comunicação.**

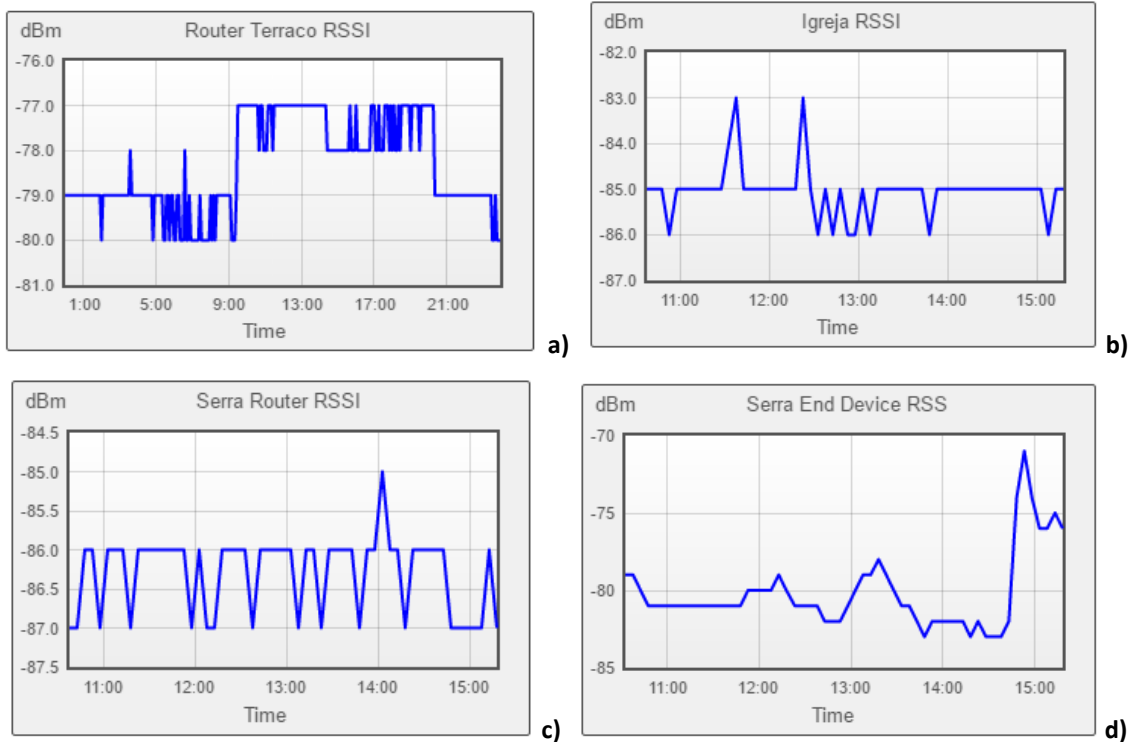
Nó sensor	Antena utilizada	Potência de transmissão (dBm)
1	Monopolo	4,6
2	Monopolo	4,6
3	Agrupamento de suspensas	-1
4	Grelha	-1,8
5	Agrupamento de suspensas	-1
Nó Terminal	Monopolo	4,6

Na figura 5.2 é possível observar alguns dos nós sensores implantados ao longo da linha de comunicação.



**Figura 5.2 - Nós sensores implementados: a) Nó 4; a) Nó 5; c) Nó\_Terminal.**

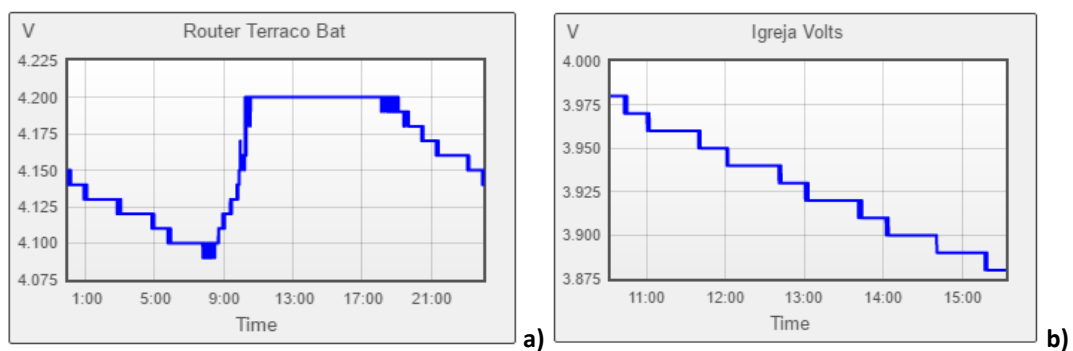
Os testes foram efetuados no dia 29 de abril ao longo de cinco horas. A figura 5.3 mostra os resultados obtidos relativamente à qualidade da ligação entre cada rádio, caracterizados pelo parâmetro RSSI.



**Figura 5.3 - Nível de sinal recebido (RSSI): a) Nó 3; b) Nó 4; c) Nó 5; d) Nó\_Terminal.**

Tendo em conta que a máxima sensibilidade dos módulos é de -98 dBm, observa-se que ainda existe uma margem de cerca de 10 dB, visto que a máxima variação obtida para o meio com obstáculos foi de 8,2 dB pode-se assegurar que a qualidade da ligação é fiável.

Todos os nós instalados monitorizam o nível de tensão da bateria. Os resultados podem ser observados na figura 5.4.



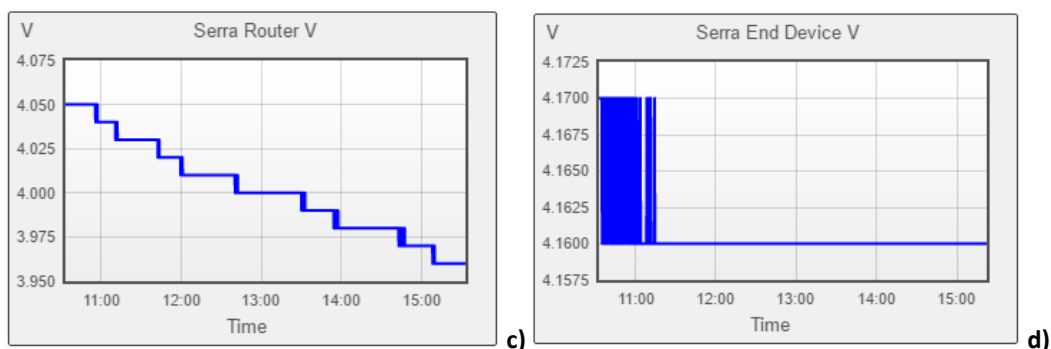


Figura 5.4 - Tensão nas baterias: a) Nó 3; b) Nó 4; c) Nó 5; d) Nó\_Terminal.

Comparando os resultados obtidos entre os nós *routers* e o nó terminal é notório que o nível de tensão deste último decresce mais lentamente, por operar nos dois estados, ativo e adormecido. O nó 3 utiliza um painel solar, daí a tensão aumentar ao longo da manhã até atingir a tensão máxima (4,2 V), permanecendo carregada enquanto houver sol.

Definiu-se que apenas o nó terminal monitoriza parâmetros ambientais. Contudo colocou-se o nó 4 (*router*) a monitorizar a temperatura do ar e a humidade relativa de modo a efetuar uma comparação entre os resultados obtidos para o meio urbano e para o meio com vegetação. Na figura 5.5 estão representadas as variações da temperatura do ar e da humidade relativa para o Nó\_Terminal (meio com vegetação) no decorrer das 5 horas de medição. As medições foram efetuadas entre as 10:30 e as 15:30.

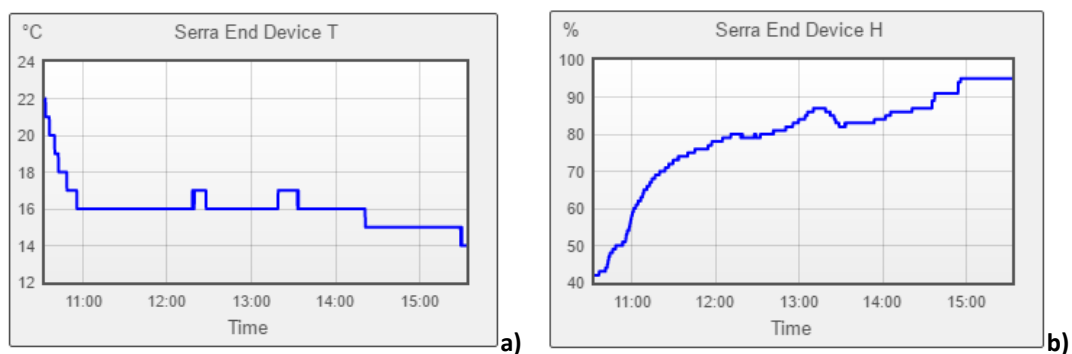
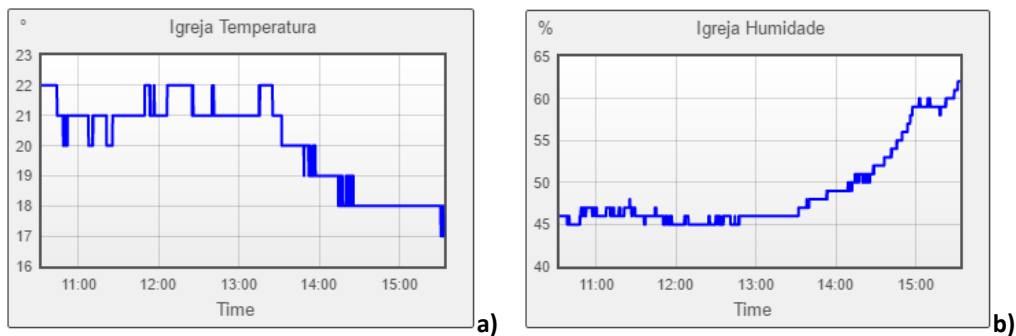


Figura 5.5 - Resultados do Nó\_Terminal: a) temperatura do ar; b) humidade relativa.

A figura 5.6 mostra a temperatura do ar e a humidade relativa registadas pelo nó 4.



**Figura 5.6 - Resultados do nó 4: a) temperatura do ar; b) humidade relativa.**

Ao analisar os gráficos correspondentes aos dois meios observa-se que os valores de humidade no meio com vegetação (Nó\_Terminal) são superiores quando comparados com os valores obtidos no nó 4. No nó 4 é possível observar que com o passar da manhã a temperatura tende a aumentar e ao início da tarde a diminuir. O oposto acontece com a humidade relativa, apresentando valores mais baixos durante os períodos mais quentes e valores mais elevados durante os períodos mais frios. Nos valores registados pelo nó terminal observa-se que a humidade aumentou atingindo quase os 100%, sendo importante mencionar que houve ocorrência de precipitação no final da tarde no dia em que as medições foram efetuadas. Um outro motivo que justifica a variação da humidade quando comparados os dois meios deve-se ao facto de o solo do meio com vegetação não estar tão exposto ao sol (devido à sombra causada pelas árvores) como acontece no meio urbano, contribuindo desse modo para o registo de valores mais elevados de humidade relativa no meio com vegetação.

Em relação à restante distância até ao Pico do Arieiro realizaram-se testes, em algumas das ligações, recorrendo à ferramenta *Range Test* de modo a avaliar a ligação, registando o nível de potência do sinal recebido (RSSI) entre os nós. A figura 5.7 ilustra as ligações testadas.



**Figura 5.7 - Ligações testados.**

Na figura 5.8 é possível visualizar o local da medição entre o nó 13 e o nó 14. No Anexo D são apresentadas algumas figuras referentes aos restantes locais das medições.



**Figura 5.8 - Local da medição entre o nó 13 e 14.**

A tabela 5.2 mostra o valor de potência recebida obtida nos testes efetuados no terreno.

Tabela 5.2 - Valor de RSSI.

Ligação entre os nós	RSSI (dBm)
10 ↔ 11	-73,4
11 ↔ 12	-78,7
12 ↔ 13	-76,2
13 ↔ 14	-72,3

Os resultados apresentados são para os locais expressos na tabela 4.1. O motivo pelo qual os valores de RSSI medidos são melhores que os estimados deve-se ao facto da antena emissora e recetora estarem direcionadas na máxima radiação. Observou-se que ao mover a antena de 1 a 2 m a potência pode baixar até cerca de 12 dB. Tendo em conta a máxima variação obtida para o meio urbano e com vegetação, bem como a atenuação devido à orientação da antena, conclui-se que existe uma boa margem de ligação.

## 5.2 Carregamento das baterias para o nó *router*

Antes da construção do protótipo final referente ao nó *router* foram realizados alguns testes com a intenção de averiguar a duração e o comportamento das baterias. Relembrando, o intuito consistia em utilizar uma bateria com capacidade suficiente que assegurasse o funcionamento do nó durante cinco dias sem sol e que os painéis fossem capazes de carregar as baterias num só dia, independentemente de estarem completamente descarregada ou não. Como tal, no dia 11 de abril desligou-se o painel solar do circuito, voltando a ser ligado cinco dias após.

A figura 5.9 mostra a descarga da bateria desde o dia 11 até ao dia 16, assim como o carregamento da mesma em apenas um dia.

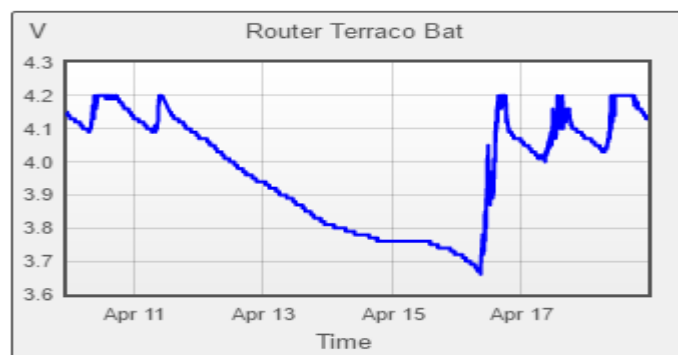


Figura 5.9 - Comportamento da bateria ao ser descarregada ao longo de 5 dias.

A figura 5.10 comprova que ao longos dos 5 dias de descarga não existiu produção de energia e ilustra a diferença entre a produção antes da bateria estar descarregada e depois.

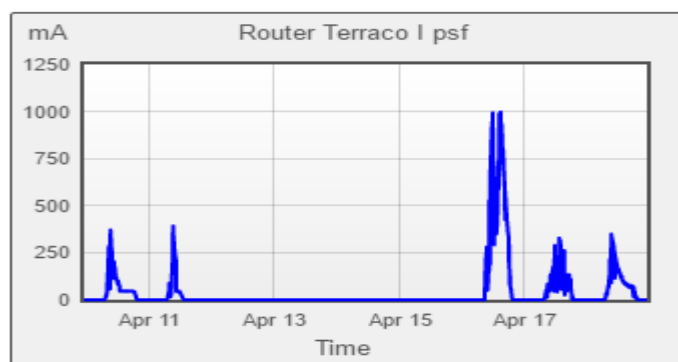


Figura 5.10 - Comportamento do painel solar ao carregar uma bateria descarregada.

Segundo a figura 5.10, tal como era esperado tendo em conta os cálculos teóricos efetuados, comprovou-se que se houver 5 dias sem sol num inverno rigoroso as baterias do nó *router* são suficientes para que este se mantenha em funcionamento. Relativamente ao carregamento das mesmas constatou-se que após estarem descarregadas é possível carregá-las num só dia com sol. É importante mencionar que no dia 16 de abril, registou-se alguma nebulosidade e precipitação ao longo do dia, no entanto foi produzida energia suficiente para carregar as baterias por completo.

### 5.3 Estação meteorológica

A estação meteorológica encontra-se em funcionamento desde o dia 1 de março de 2016. Como mencionado, esta é utilizada na medição da temperatura do ar, humidade relativa, pluviosidade e velocidade e direção do vento. Na análise dos resultados apenas os dados da direção do vento não foram comparados com os obtidos pelo IPMA pois essa informação não é disponibilizada. O IPMA disponibiliza algumas estações, tendo-se escolhido para esta análise a estação situada na zona do Lido, no Funchal.

A figura 5.11 apresenta os dados medidos pela estação meteorológica desde o dia 25 de março até dia 15 de abril para a velocidade do vento.

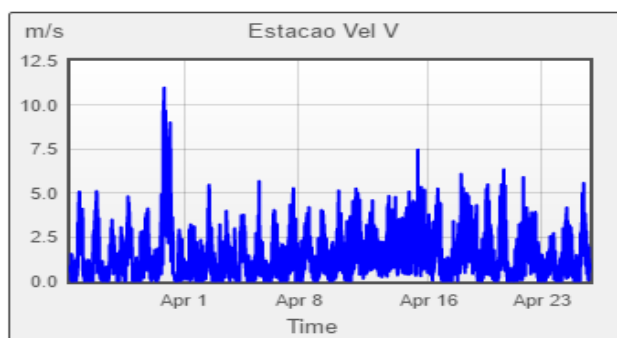
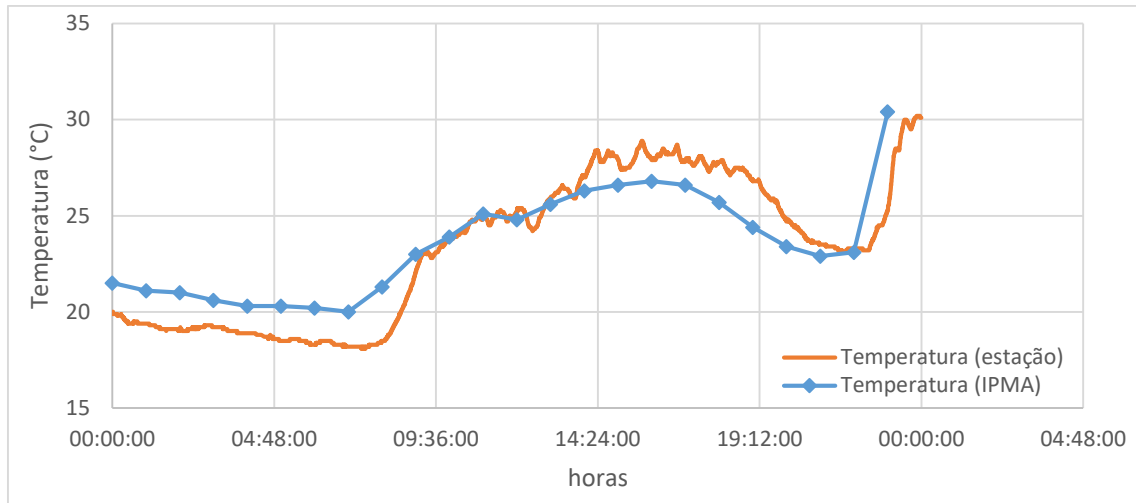


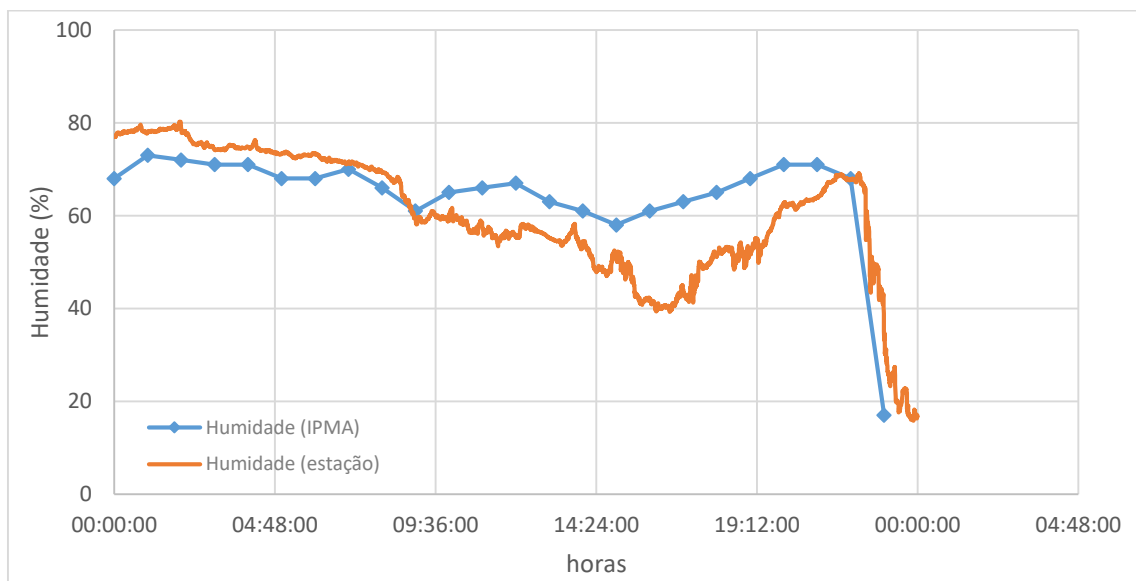
Figura 5.11 - Valores da velocidade do vento ao longo de um mês.

O dia 30 de março foi o dia com maior intensidade de vento, onde a velocidade máxima de vento atingida foi de 11 m/s, sendo esta a velocidade máxima registada pela estação meteorológica desde o dia da sua colocação até ao mês de agosto.

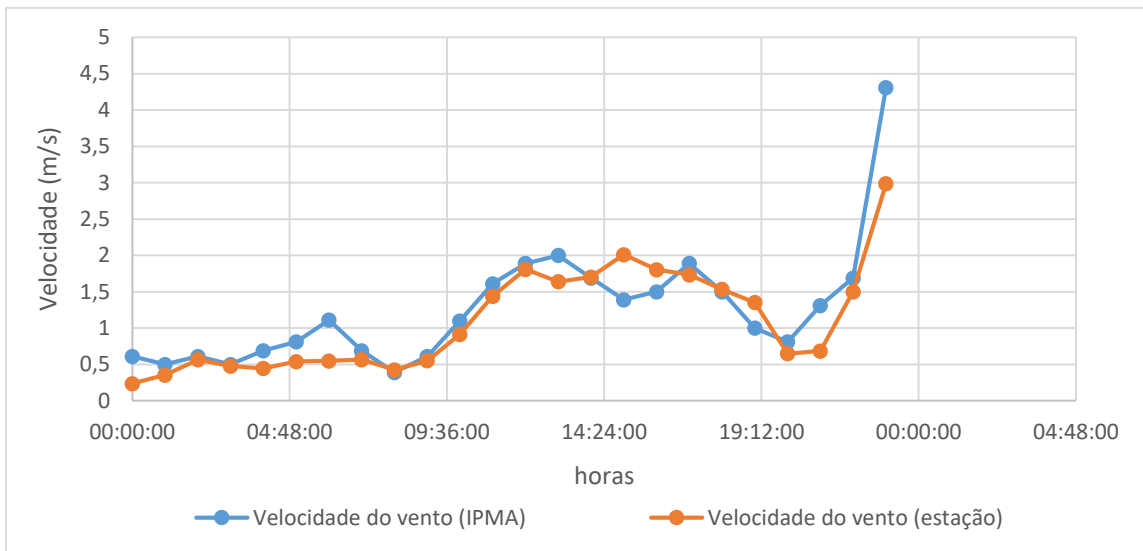
Os valores medidos pela estação meteorológica no dia 4 de agosto foram comparados com os dados do IPMA. A figura 5.12 mostra a temperatura do ar, a figura 5.13 a humidade relativa e a figura 5.14 a velocidade do vento.



**Figura 5.12 - Comparação dos resultados da temperatura do ar.**



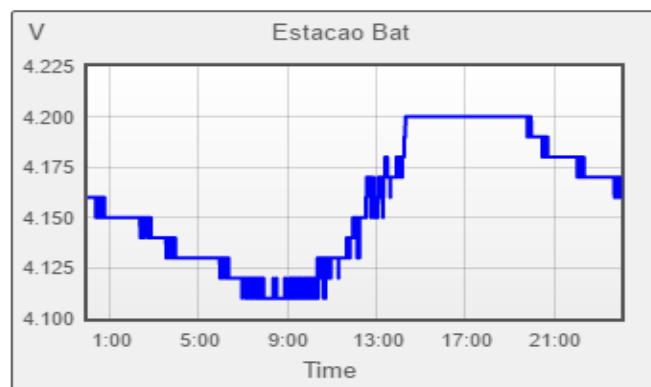
**Figura 5.13 - Comparação dos resultados da humidade relativa.**



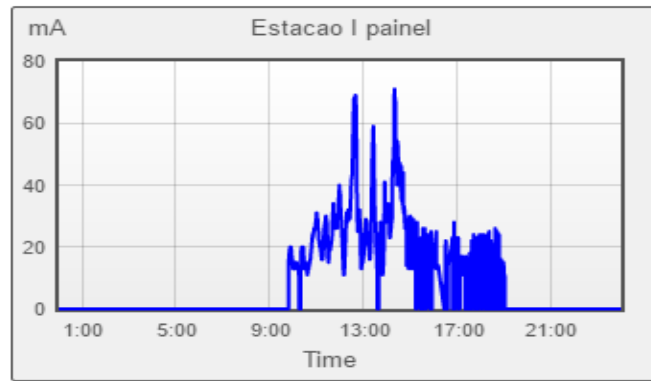
**Figura 5.14 - Comparação dos resultados da velocidade do vento.**

É importante mencionar que os dados disponibilizados pelo IPMA correspondem à média horária. Pela comparação gráfica efetuada é possível observar que os valores obtidos pela estação colocada no terraço da universidade, têm o mesmo seguimento que os valores recolhidos pela estação do IPMA. A partir das 22 horas observa-se uma variação brusca nos dados monitorizados, com o aumento da temperatura e da velocidade do vento e uma diminuição na humidade relativa. Este facto é justificado pela influência de uma massa de ar de Leste, portanto seca, que atingiu a ilha nesse período.

A figura 5.15 ilustra o comportamento da bateria ao longo de um dia do mês de abril e a figura 5.16 a produção por parte do painel solar nesse mesmo dia.



**Figura 5.15 - Comportamento da bateria da estação ao longo de um dia.**



**Figura 5.16 - Comportamento do painel solar da estação ao longo de um dia.**

Como mencionado no capítulo 4, secção 3, o painel continua a produzir energia enquanto houver luz solar de modo a alimentar o nó sensor, poupando a bateria. Este facto pode ser observado pelos resultados obtidos entre as 14 e as 19 horas, em que a bateria continua com a máxima carga e o painel continua a produzir.



## 6 Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões acerca do estudo realizado na área das redes de sensores sem fios, mais precisamente numa linha de comunicação de suporte à monitorização ambiental, abrangendo os estudos efetuados relativamente à propagação do sinal e aos protótipos implementados. São, ainda, indicados alguns trabalhos futuros com aspetos que podem ser melhorados e desenvolvidos.

### 6.1 Conclusão

Com a concretização deste projeto deu-se mais um passo para a implementação de uma rede de baixo custo, na Madeira, que realize o suporte à monitorização ambiental. A linha de monitorização proposta permite recolher dados de um ambiente suburbano ou no meio florestal para aplicações de interesse.

Estudou-se a propagação do sinal, mais precisamente a influência do ganho e da diretividade das antenas nas perdas de percurso de uma ligação. Este estudo foi efetuado para duas combinações de antenas, omnidirecional e diretiva, em três meios distintos: meio sem obstáculos (simulando o espaço livre), meio com obstáculos (em linha de vista) e meio com vegetação.

Em relação ao meio sem obstáculos observou-se que as duas combinações utilizadas acompanham a curva do espaço livre, significando que o RSSI da rede XBee apresenta uma boa aproximação ao nível de sinal esperado.

Relativamente ao meio com obstáculos observou-se um pequeno aumento da atenuação comparativamente ao meio sem obstáculos, devendo-se ao facto de existir uma maior variedade de objetos na proximidade que alteram a propagação do sinal. Para este meio concluiu-se que quanto maior for o ganho da antena emissora e recetora maior é a potência recebida, assim, torna-se vantajosa a utilização de antenas de maior ganho (diretivas) pois estas permitem um maior alcance.

Quanto ao meio com vegetação é notório o aumento da atenuação face ao meio sem obstáculos e com obstáculos. Em relação aos dois conjuntos de antenas no meio em questão conclui-se que existe uma maior divergência no desempenho entre estas. Concluiu-se que com o aumento da distância a atenuação aumenta para as antenas de maior ganho e que a partir de uma determinada distância há um aumento da potência recebida por parte das antenas de menor ganho. Este facto deve-se às antenas de menor ganho receberem mais reflexões por serem omnidirecionais. Assim, no meio com vegetação torna-se preferível a utilização de antenas omnidirecionais.

Nos protótipos desenvolvidos o protocolo utilizado para implementar a rede foi o ZigBee. Este apresenta um baixo consumo energético, baixa complexidade de

implementação e baixo custo. Apesar das baixas taxas de transferência de dados concluiu-se que este é suficiente para permitir a viabilidade e fiabilidade da rede.

Visto que um dos requisitos fundamentais é o baixo consumo de energia, a escolha dos componentes torna-se um ponto essencial, bem como a técnica de adormecimento aplicada ao nó sensor terminal. Esta técnica de adormecimento possibilita minimizar o consumo de energia durante um determinado período de tempo, permitindo uma maior autonomia do nó.

Relativamente ao modelo de carregamento com painéis fotovoltaicos tanto do nó *router*, como do nó terminal, verificou-se que este consegue satisfazer as necessidades energéticas mesmo nos períodos de menor exposição solar.

Em relação à estação meteorológica desenvolvida, através da análise dos resultados, comparativamente aos dados disponibilizados pelo IPMA, verificou-se que os valores de temperatura do ar, humidade relativa e velocidade do vento tinham o mesmo seguimento. Contudo, alguns valores divergem minimamente devido ao facto de as duas estações estarem distanciadas de 3 km.

Quanto aos resultados obtidos para os testes efetuados às ligações entre nós da linha de comunicação constatou-se que a qualidade da ligação é fiável para uma margem de ligação de, pelo menos, 10 dB.

Em conclusão, constatou-se que é possível implementar uma rede de sensores sem fios autónoma, desde o Funchal até ao Pico do Arieiro, que realize a monitorização dos parâmetros de interesse e que os dados mensurados sejam disponibilizados em tempo real numa página de Internet.

## **6.2 Trabalhos futuros**

Como trabalhos futuros tem-se a implementação no terreno da linha de comunicação, desde o Funchal até ao Pico do Arieiro de modo a monitorizar as serras nesse espaço.

Desenvolver um estudo piloto de cobertura de uma área com nós terminais e nós *routers*.

Instalar novos sensores na estação meteorológica (nó terminal) de modo a se obter um maior número de parâmetros relativamente ao meio em questão. Como, por exemplo, um barómetro, sensor de humidade do solo, entre outros.

Explorar outras fontes de energias renováveis para alimentar os nós sensores, como, por exemplo, a energia eólica ou hídrica e comparar a relação produção/consumo com a obtida por parte dos painéis fotovoltaicos.

Por último, adicionar à aplicação da página *web* um sistema de alertas que consista na comparação do valor medido pelos nós sensores com um determinado limiar de

modo a prevenir o utilizador caso ocorra alguma alteração brusca dos parâmetros monitorizados ou mesmo caso o sistema falhe.



## Referências

- [1] “Capítulo 4 – Arquiteturas para Redes de Sensores Sem Fio”. [Online]. Disponível em: <http://homepages.dcc.ufmg.br/~mmvieira/publications/04mc-sbrc.pdf>. Acedido em: 2016.
- [2] T. C. Pimenta, “Simulação de Protocolos de Encaminhamento para Redes AdHoc usando o NS”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Portugal, 2013.
- [3] K. Romer, P. Blum e L. Meier, *Time Synchronization and Calibration in Wireless Sensor Networks*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [4] G. C. Menezes, “Modelo e Algoritmos para a Definição da Densidade, Cobertura e Conectividade em uma Rede de Sensores Sem Fios”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2004.
- [5] S. Farahani, *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*. ELSEVIER Ltd., 2008.
- [7] D. Gislason, *ZigBee Wireless Networking*. ELSEVIER Ltd., 2008.
- [8] A. Elahi e A. Gschwendner, *ZigBee Wireless Sensor and Control Network*. Theodore S. Rappaport, Series Editor, 2009.
- [9] J. C. Vicente, “GolfSense: Sistema de Monitorização de Campos de Golf com Redes de Sensores”, Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal, 2009.
- [10] A. E. Santo e J. A. M. F. Souza, “Controlo Industrial – Dispositivos I/O”, Universidade da Beira Interior, pp. 77-104, 2003.
- [11] S. S. Vilarinho, “Influência da Localização, nas Medições Efectuadas por uma Estação Meteorológica, no Campus de Gualtar”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Portugal, 2009.
- [12] “Instituto Newton C. Braga”. [Online]. Disponível em: <http://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/4883-art644>. Acedido em: 2016.
- [13] “Pluviómetros”. [Online]. Disponível em: <http://www.pluviometros.com.br/>. Acedido em: 2016.
- [14] “Sensor de chuva YL-83”. [Online]. Disponível em: <http://blog.filipeflop.com/sensores/sensor-de-chuva-yl-83.html>. Acedido em: 2016.
- [15] “Instituto Português do Mar e da Atmosfera”. [Online]. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/educativa/observar.tempo/index.jsp?page=ema.udom.xml>. Acedido em: 2016.
- [16] “Anemometer”. [Online]. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Anemometer>. Acedido em: 2016.
- [17] “Como funciona um anemómetro”. [Online]. Disponível em: [http://www.ehow.com.br/funciona-anemometro-como\\_69966/](http://www.ehow.com.br/funciona-anemometro-como_69966/). Acedido em: 2016.
- [18] A. Palmieri, “Desenvolvimento de Sistema Automatizado de Baixo Custo para Coleta e Armazenamento de Dados de Variáveis Climáticas: Aplicações no Ambiente Agrícola.”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Brasil, 2009.
- [19] “Instrumentação e aquisição de dados”. [Online]. Disponível em: <http://www.green-islands-azores.uac.pt/admin/ficheiros/uploads/Instrumentacao%20&%20Aquisicao%20de%20Dados.pdf>. Acedido em: 2016.
- [20] G. Mariano, J. C. C. Borba e C. S. Querino, “Comparação Sazonal do Saldo de Radiação e Evapotranspiração (Estação Seca e Chuvosa) na Amazônia – Florestas e Pastagens”. Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza, Brasil, 2004, pp. 1-9.

- [21] “Quercus alerta para os perigos das antenas UMTS”. [Online]. Disponível em: [http://tek.sapo.pt/noticias/telecomunicacoes/artigo/quercus\\_alerta\\_para\\_os\\_perigos\\_das\\_antenas\\_umts-882794tek.html](http://tek.sapo.pt/noticias/telecomunicacoes/artigo/quercus_alerta_para_os_perigos_das_antenas_umts-882794tek.html). Acedido em: 2016.
- [22] T. Marques e M. Curado, “Guia de Boas Práticas para a Integração Paisagística de Infraestruturas Elétricas”, EDP Distribuição, Vol. 2, Portugal, 2011. [Online]. Disponível em: [http://www.edpdistribuicao.pt/pt/ambiente/desempenhoambiental/Documentos/Guia%20de%20boas%20pr%C3%A1ticas%20para%20integra%C3%A7%C3%A3o%20paisag%C3%ADstica%20de%20infraestruras%20el%C3%A9tricas%20-%20Anexos%20\(vol.%202\).pdf](http://www.edpdistribuicao.pt/pt/ambiente/desempenhoambiental/Documentos/Guia%20de%20boas%20pr%C3%A1ticas%20para%20integra%C3%A7%C3%A3o%20paisag%C3%ADstica%20de%20infraestruras%20el%C3%A9tricas%20-%20Anexos%20(vol.%202).pdf).
- [23] “Foshan Times Antenna Factory”. [Online]. Disponível em: <http://www.timesantenna.com/en/pro.asp?pageID=44>. Acedido em: 2016
- [24] “Painting a Fiberglass CB or Ham Radio Antenna”. [Online]. Disponível em: <http://cbradiomagazine.com/Articles/Painting%20an%20antenna/How%20to%20paint%20a%20CB%20or%20ham%20radio%20antenna.htm>. Acedido em: 2016.
- [25] “Stealth antenas – Camouflage painting Wellbrook”. [Online]. Disponível em: <https://g0isw.wordpress.com/2013/02/26/stealth-antennas-camouflage-painting-wellbrook-1530-loop-in-mtp-pattern/>. Acedido em: 2016.
- [26] “PUC-Rio – Certificação Digital Nº 0521343/CA”. [Online]. Disponível em: [http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0521343\\_10\\_cap\\_01.pdf](http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0521343_10_cap_01.pdf). Acedido em: 2015
- [27] E. C. Moraes, “Fundamentos de Sensoriamento Remoto”. Ministério da Ciência e Tecnologia: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil, 2002. [Online]. Disponível em: [http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1\\_ECMoraes.pdf](http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1_ECMoraes.pdf).
- [28] Y. S. Lee e Y. S. Meng, *Investigations of Foliage Effect on Modern Wireless Communication Systems: A Review*. Singapore: Vol. 105, pp.313-332, 2010. [Online]. Disponível em: <http://www3.ntu.edu.sg/home/eyhlee/Prof%20Lee/PIER%20foliage%20review%202010.pdf>. Acedido em: 2016
- [29] J. A.R. A. e F. E.S. Santos, “Propagação em Ambientes Florestais”, Universidade da Madeira, Portugal, 2008.
- [30] J. A.R. Azevedo, F. E.S. Santos, T. A. Sousa e J. M. Agrela, “Impact of the antenna directivity on path loss for diferente propagation environments”, IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol.9, no. 13, pp. 1392-1398, 2015.
- [31] “Libelium: Detecting Forest Fires using Wireless Sensor Networks”. [Online]. Disponível em: [http://www.libelium.com/wireless\\_sensor\\_networks\\_to\\_detec\\_forest\\_fires/](http://www.libelium.com/wireless_sensor_networks_to_detec_forest_fires/). Acedido em: 2015.
- [32] “Project MasliNET: Wireless Sensor Networks in Agriculture – Olive Growing”. [Online]. Disponível em: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/Market\\_Communication/JAN%202009%20microSOLUTIONS.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/Market_Communication/JAN%202009%20microSOLUTIONS.pdf). Acedido em: 2015.
- [33] “Libelium: Nature Preservation by Monitoring and Studying the Habitat of Bats with Waspnote”. [Online]. Disponível em: [http://www.libelium.com/nature\\_monitoring\\_bats\\_sensors\\_waspnote/](http://www.libelium.com/nature_monitoring_bats_sensors_waspnote/). Acedido em: 2015.
- [34] “Five Years of Designing Wireless Sensor Networks in the Doñana Biological Reserve (Spain): An Applications Approach”. [Online]. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1424-8220/13/9/12044>. Acedido em: 2016.
- [35] “Arduíno Fio”. [Online]. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardFio>. Acedido em: 2016.
- [36] “DIGI - XBEE AND XBEE-PRO ZIGBEE”. [Online]. Disponível em: [http://www.digi.com/pdf/ds\\_xbee\\_zigbee.pdf](http://www.digi.com/pdf/ds_xbee_zigbee.pdf). Acedido em: 2016

- [37] "DIGI - X-CTU Configuration & Test Utility Software". [Online]. Disponível em: [https://www.cse.msu.edu/~dennisp/SeismicNode/docs/90001003\\_A.pdf](https://www.cse.msu.edu/~dennisp/SeismicNode/docs/90001003_A.pdf). Acedido em: 2015.
- [38] L. Reimer e H. Kohl, *Transmission Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis*. Springer, 1997.
- [39] P. G. Mendes e J. A. Baptista, "Implementação de Antena Suspensa", Universidade da Madeira, Portugal, 2015.
- [40] "Home-brew Compact 6dBi Collinear Antenna". [Online]. Disponível em: <http://martybugs.net/wireless/collinear.cgi>. Acedido em: 2016.
- [41] "2.4 GHz 8 dBi Omni-directional Antenna – Datasheet". [Online]. Disponível em: <http://www.superpass.com/SPDG16O.html>. Acedido em: 2016.
- [42] "XBee – Datasheet". [Online]. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>. Acedido em: 2016.
- [43] "Omeron latching relay G6-JU-2FS-Y – Datasheet". [Online]. Disponível em: <http://datasheetz.com/data/Relays/Signal,%20Up%20to%202%20Amps%20@%2030%20VDC/Z2152-datasheetz.html>. Acedido em: 2016.
- [44] "Instituto Português do Mar e da Atmosfera". [Online]. Disponível em: <https://www.ipma.pt/pt/index.html>. Acedido em: 2016.
- [45] "Adafruit – MCP73871 USB/Solar". [Online]. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/usb-dc-and-solar-lipoly-charger/using-the-charger>. Acedido em: 2016.
- [46] "Vantage Pro2™ Temperature/Humidity Sensor – Datasheet". [Online]. Disponível em: [http://www.davisnet.com/product\\_documents/weather/spec\\_sheets/6152\\_62\\_53\\_63\\_SS.pdf](http://www.davisnet.com/product_documents/weather/spec_sheets/6152_62_53_63_SS.pdf). Acedido em: 2016.
- [47] "Tipping Bucket Rain Gauge – Datasheet". [Online]. Disponível em: [http://www.agrometria.it/sites/default/files/prodotto\\_scheda\\_tecnica/3665RTipRain.pdf](http://www.agrometria.it/sites/default/files/prodotto_scheda_tecnica/3665RTipRain.pdf). Acedido em: 2016.
- [48] "Extech Cup Thermo-Anemometer – Datasheet". [Online]. Disponível em: [https://www.instrumart.com/assets/an400\\_datasheet.pdf](https://www.instrumart.com/assets/an400_datasheet.pdf). Acedido em: 2015.
- [49] "MAX9929F – Datasheet". [Online]. Disponível em: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX9928-MAX9929.pdf>. Acedido em: 2016.



# Anexos

## Anexo A

Através da ferramenta *Google Earth* traçou-se os perfis de elevação das ligações entre os vários nós. Estes podem ser visualizados desde a figura A.1 à figura A.12. Ao perfil de elevação disponibilizado traçou-se uma linha reta de modo a unir o início e o final da ligação.

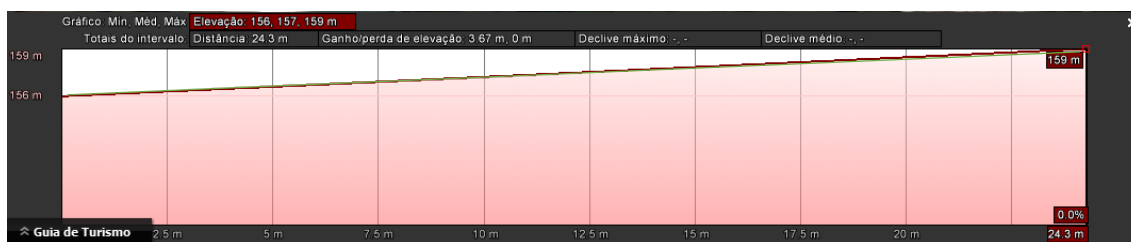


Figura A. 1 - Perfil de elevação entre o nó 2 e o nó 3.

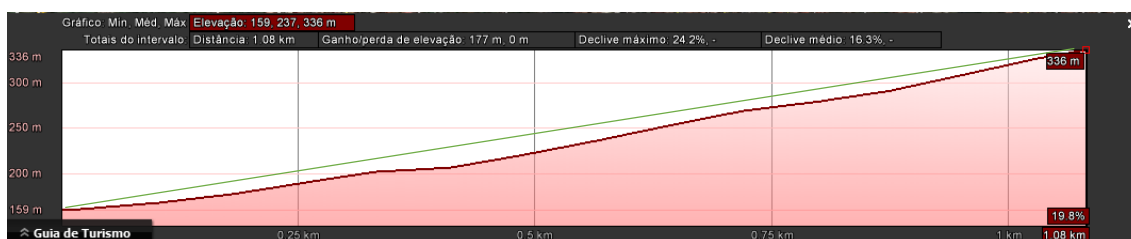


Figura A. 2 - Perfil de elevação entre o nó 3 e o nó 4.

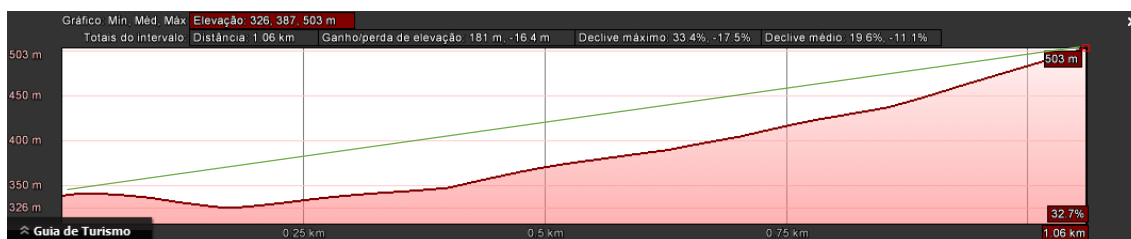


Figura A. 3 - Perfil de elevação entre o nó 4 e o nó 5.

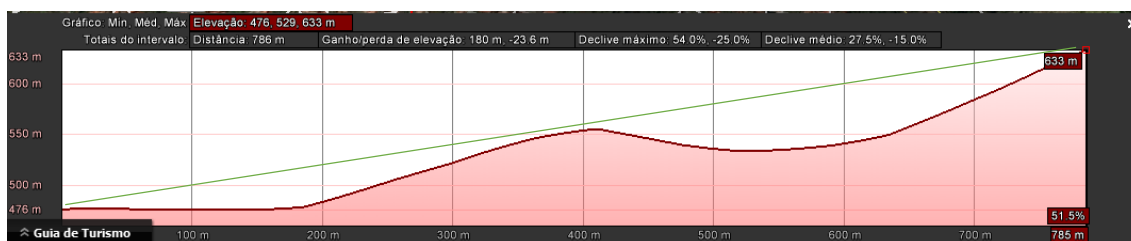


Figura A. 4 - Perfil de elevação entre o nó 5 e o nó 6.

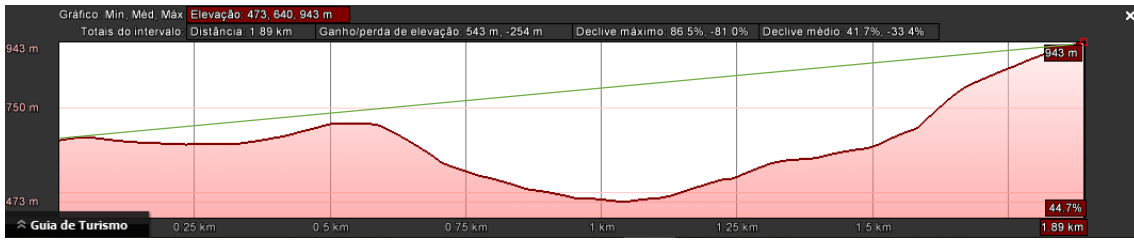


Figura A. 5 - Perfil de elevação entre o nó 6 e o nó 7.

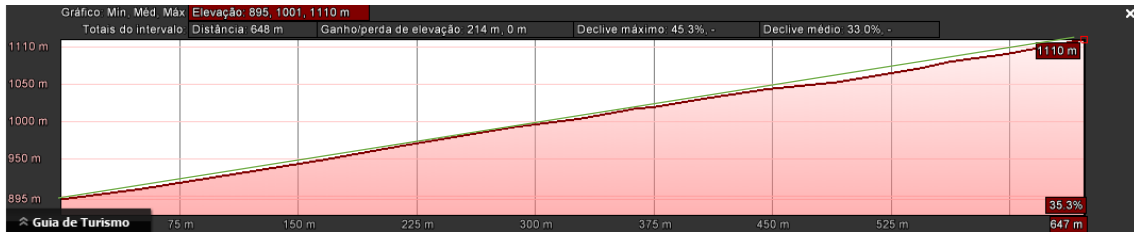


Figura A. 6 - Perfil de elevação entre o nó 7 e o nó 8.

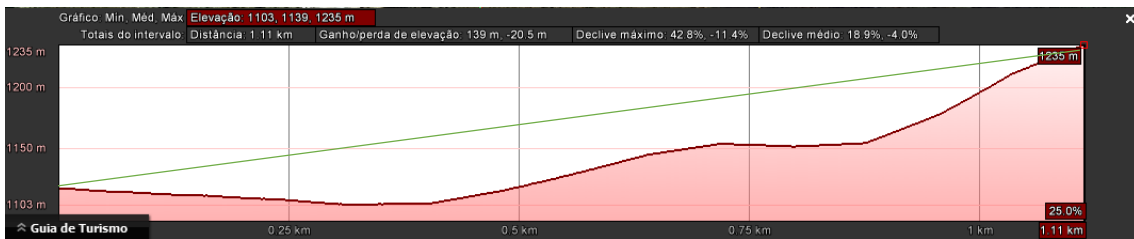


Figura A. 7 - Perfil de elevação entre o nó 8 e o nó 9.

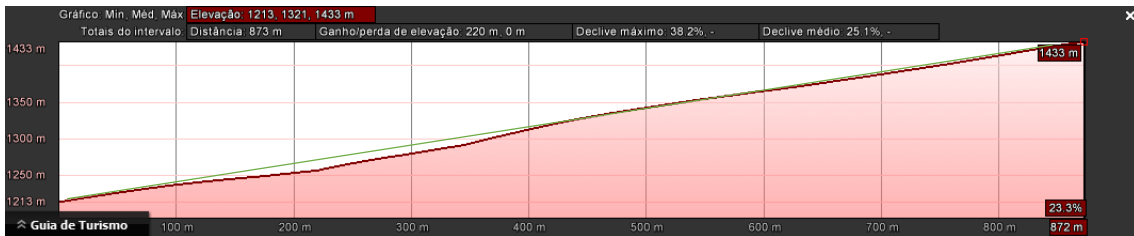


Figura A. 8 - Perfil de elevação entre o nó 9 e o nó 10.

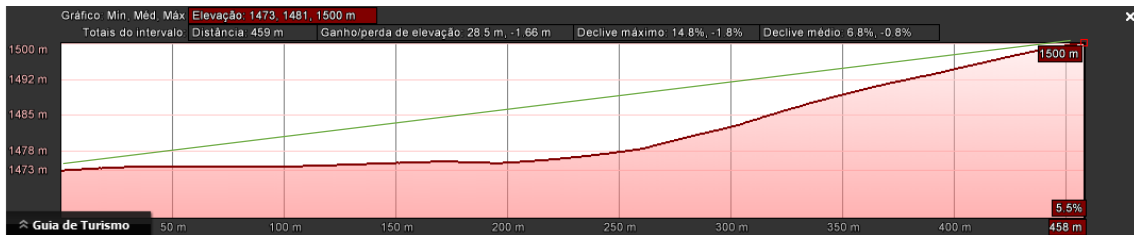


Figura A. 9 - Perfil de elevação entre o nó 10 e o nó 11.

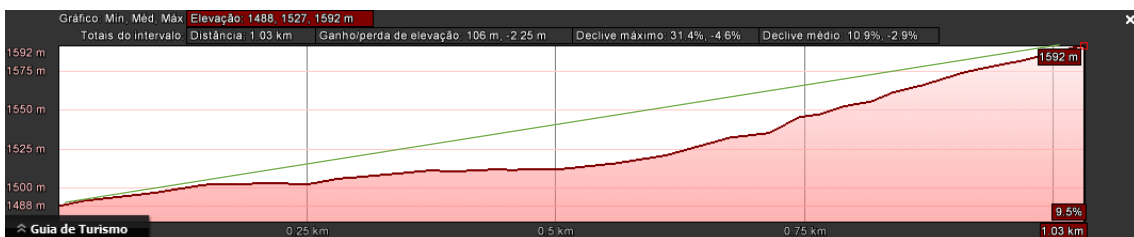


Figura A. 10 - Perfil de elevação entre o nó 11 e o nó 12.

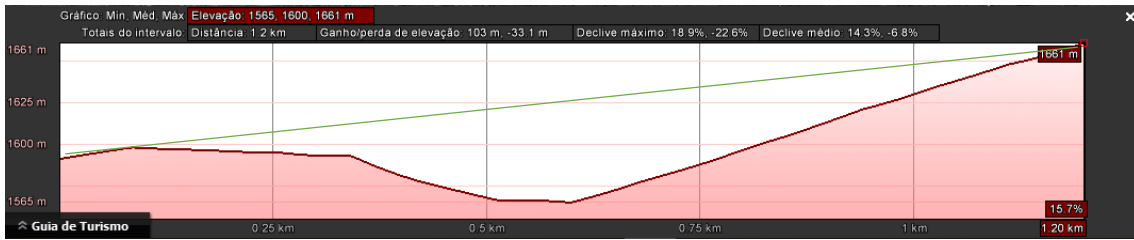


Figura A. 11 - Perfil de elevação entre o nó 12 e o nó 13.

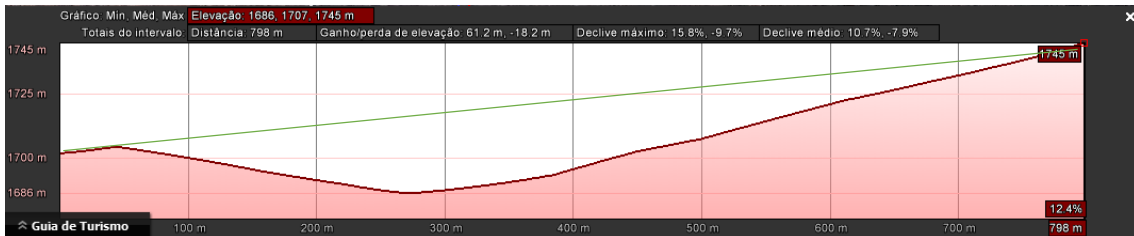


Figura A. 12 - Perfil de elevação entre o nó 13 e o nó 14.

Apesar das ligações entre os nós 3 e 4, 7 e 8 e entre os nós 9 e 10 serem zonas planas constatou-se que existe linha de vista entre todas as ligações.



## Anexo B – Código implementado no Arduíno

### Anexo B1 – Código nó terminal

```
/* *Universidade da Madeira 2015/2016
* *Projeto de Mestrado: Linha de comunicação de suporte à monitorização ambiental
* *Autor: Yasmina Chatterley
*código: Nó terminal */
#include <avr/sleep.h>
//sensor temperatura e humidade
#include <dht11.h>
#include <dht11.h>
dht11 DHT11;
#define DHT11PIN 2
/* Timer2 reload value, globally Disponível em */
unsigned int tcnt2;
/* Toggle HIGH or LOW digital write */
int seconds = 10; // Período em segundos
int start = seconds*30;
int counter = 0;
int i=0;
// Inicializar a mensagem
byte trama[] = {
0x7E,0x00,0x34,0x10,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0xFF,0xFE,0x00,
0x00,'?','Y','a','s','E','D','t','p','=',0x00,0x00,0x00,0x00,'&','Y','a','s','E','D','h','=',0x00,0x00
,0x00,0x00,'&','Y','a','s','E','D','v','b','=',0x00,0x00,0x00,0x00,0x00};
int valorSensor = 0;
byte checksum = 0;
int xbeeSleep = 7;
int hum;
int temp;

//Tensão na bateria
```

```

int V_bat;
void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Criar ligação com o XBee
  pinMode(13, OUTPUT); // LED as output
  pinMode(xbeeSleep, OUTPUT);
  // digitalWrite(xbeeSleep, LOW);
  /* First disable the timer overflow interrupt while we're configuring */
  TIMSK2 &= ~(1<<TOIE2);
  /* Configure timer2 in normal mode (pure counting, no PWM etc.) */
  TCCR2A &= ~((1<<WGM21) | (1<<WGM20));
  TCCR2B &= ~(1<<WGM22);
  /* Select clock source: internal I/O clock */
  ASSR &= ~(1<<AS2);
  /* Disable Compare Match A interrupt enable (only want overflow) */
  TIMSK2 &= ~(1<<OCIE2A);
  /* Now configure the prescaler to CPU clock divided by 1024 */
  TCCR2B |= (1<<CS22) | (1<<CS21) | (1<<CS20); // Set bits
  //TCCR2B &= ~(1<<CS21); // Clear bit
  /* We need to calculate a proper value to load the timer counter.
  * The following loads the value 131 into the Timer 2 counter register
  * The math behind this is: * (CPU frequency) / (prescaler value) = 125000 Hz = 8us.
  * (desired period) / 8us = 125. * MAX(uint8) + 1 - 125 = 131;
  */
  /* Save value globally for later reload in ISR */
  tcnt2 = 0;
  /* Finally load and enable the timer */
  TCNT2 = tcnt2;
  TIMSK2 |= (1<<TOIE2);

  set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_SAVE);
  sleep_enable();

```

```

}
/* * Install the Interrupt Service Routine (ISR) for Timer2 overflow.
* This is normally done by writing the address of the ISR in the
* interrupt vector table but conveniently done by using ISR() */
ISR(TIMER2_OVF_vect) {
    /* Reload the timer */
    TCNT2 = tcnt2;
    /* Write to a digital pin so that we can confirm our timer */
    //digitalWrite(2, toggle == 0 ? HIGH : LOW);
    //toggle = ~toggle;
    counter++;
}
double Fahrenheit(double celsius)
{
    return 1.8 * celsius + 32;
}
void readAndSend(){
    char acBuf[4 + 1]; // adiciona 1 para terminação NULL e 1 para o sinal negativo
    // Ler valores do sensor multiplicados por 1000, para precisão de 4 casas decimais
    int chk = DHT11.read(DHT11PIN);
    //Temperatura; // Amostra o valor da temperatura
    temp = (int)DHT11.temperature; //Temperatura em graus Celcius
    sprintf( acBuf, "%4d", temp ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
    trama[26] = acBuf[0];
    trama[27] = acBuf[1];
    trama[28] = acBuf[2];
    trama[29] = acBuf[3];
    //Humidade; // Amostra o valor da humidade
    hum = (int)DHT11.humidity; //Humidade em percentagem
    sprintf( acBuf, "%4d", hum ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
    trama[38] = acBuf[0];
    trama[39] = acBuf[1];
}

```

```

trama[40] = acBuf[2];
trama[41] = acBuf[3];
//Tensão na bateria
V_bat=analogRead(4);
V_bat=map(V_bat,0,1023,0,3300);
V_bat=V_bat*2;
sprintf( acBuf, "%4d", V_bat ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[51] = acBuf[0];
trama[52] = acBuf[1];
trama[53] = acBuf[2];
trama[54] = acBuf[3];
// Wake up XBee
digitalWrite(xbeeSleep, LOW); // Liga xbee
delay(15); // Espera que acorde
// Cálculo do checksum
checksum = 0;
for ( i = 3; i < sizeof(trama)-1; i++) {
    checksum+= trama[i]; // Soma os valores que contam para checksum
}
trama[sizeof(trama)-1] = 0xFF - checksum; // Realiza o complemento para 2
Serial.write(trama, sizeof(trama)); // Envia a trama pela porta série
delay(200);
// Sleep XBee
digitalWrite(xbeeSleep, HIGH);
}
/* Main loop. Empty, but needed to avoid linker errors */
void loop() {
    if(counter == start){
        TIMSK2 &= ~(1<<TOIE2);
        // executa tarefa
        readAndSend();
        counter = 0;

```

```

TCNT2 = tcnt2;
TIMSK2 |= (1<<TOIE2);
}
// Sleep
sleep_enable();
sleep_mode();
sleep_disable();
}

```

## **Anexo B2 – Código nó router**

```

/* *Universidade da Madeira 2015/2016
* *Projeto de Mestrado: Linha de comunicação de suporte à monitorização ambiental
* *Autor: Yasmina Chatterley
*código: Nó router */

#include <avr/sleep.h>
#include <SHT1x.h>
int i=0;
// Inicializar a mensagem
byte trama[] = {
0x7E,0x00,0x34,0x10,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0xFF,0xFE,0x00,
0x00,'?','Y','e','B','T','I','a','f','=',0x00,0x00,0x00,0x00,'&','Y','e','B','T','I','p','=',0x00,0x00,
0x00,0x00,'&','Y','e','B','T','V','b','t','=',0x00,0x00,0x00,0x00,0x00};
byte checksum = 0;
//Consumos
int C_arduino; //corrente bateria
int V_bat; //tensao bateria
int C_painel; //corrente painel
//Controlo Bateria relé
int pin1 = 9;
int pin2 = 10;
volatile unsigned long relefecha;

```

```

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Criar ligação com o XBee
  pinMode(13, OUTPUT); // LED as output
  pinMode(pin1, OUTPUT);
  pinMode(pin2, OUTPUT);
}

void readAndSend(){
  char acBuf[4 + 1]; // adiciona 1 para terminação NULL e 1 para o sinal negativo
  // Ler valores do sensor multiplicados por 1000, para precisão de 4 casas decimais
  //Corrente bateria
  C_arduino=analogRead(1);
  C_arduino=map(C_arduino,0,1023,0,611);
  sprintf( acBuf, "%4d", C_arduino ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para
string
  trama[26] = acBuf[0];
  trama[27] = acBuf[1];
  trama[28] = acBuf[2];
  trama[29] = acBuf[3];
  //Corrente painel
  C_painel=analogRead(3);
  C_painel=map(C_painel,0,1023,0,1222);
  sprintf( acBuf, "%4d", C_painel ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
  trama[38] = acBuf[0];
  trama[39] = acBuf[1];
  trama[40] = acBuf[2];
  trama[41] = acBuf[3];
  //Tensão na bateria
  V_bat=analogRead(2);
  V_bat=map(V_bat,0,1023,0,3300);
  V_bat=V_bat*2;
  sprintf( acBuf, "%4d", V_bat ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string

```

```

trama[51] = acBuf[0];
trama[52] = acBuf[1];
trama[53] = acBuf[2];
trama[54] = acBuf[3];
if(V_bat<3500){ //se a tensão na bateria for inferior a 3,5V
  if(relefecha==1){
    Abre_rele();
  }
  relefecha=0;
}
else if(V_bat>3600){
  if(relefecha==0){
    Fecha_rele();
  }
  relefecha=1;
}
// Cálculo do checksum
checksum = 0;
for ( i = 3; i < sizeof(trama)-1; i++) {
  checksum+= trama[i]; // Soma os valores que contam para checksum
}
trama[sizeof(trama)-1] = 0xFF - checksum; // Realiza o complemento para 2
Serial.write(trama, sizeof(trama)); // Envia a trama pela porta série
delay(100);
}
/* Main loop. */
void loop() {
  // executa tarefa
  readAndSend();
  delay (10000);
}
void Abre_rele(){

```

```

digitalWrite(pin1, HIGH);
digitalWrite(pin2,LOW);
delay(13);
digitalWrite(pin1,LOW);
}
void Fecha_rele(){
digitalWrite(pin1, LOW);
digitalWrite(pin2,HIGH);
delay(13);
digitalWrite(pin2,LOW);
}

```

### Anexo B3 – Código estação meteorológica

```

/* *Universidade da Madeira 2015/2016
* *Projeto de Mestrado: Linha de comunicação de suporte à monitorização ambiental
* *Autor: Yasmina Chatterley
*código: Estação meteorologica */
#include <avr/sleep.h>
#include <SHT1x.h>
/* Timer2 reload value, globally Disponível em */
unsigned int tcnt2;
/* Toggle HIGH or LOW digital write */
int seconds = 10; // Período em segundos
int start = seconds*30;
int counter = 0;
int i=0;
// Inicializar a mensagem
byte trama[] = {
0x7E,0x00,0x82,0x10,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0x00,0xFF,0xFE,0x00,
0x00,'?', 'Y', 'a', 's', 'T', 'e', 'm', 'p', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00, '&', 'Y', 'a', 's', 'H', 'u', 'm', '=', 0x00,0x
00,0x00,0x00, '&', 'Y', 'a', 's', 'R', 'a', 'i', 'n', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00, '&', 'Y', 'a', 's', 'D', 'i', 'r', 'W', '=
', 0x00,0x00,0x00,0x00, '&', 'Y', 'a', 's', 'V', 'e', 'l', 'W', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00, '&', 'Y', 'a', 's', 'I', '
b', 'a', 't', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00, '&', 'Y', 'a', 's', 'V', 'b', 'a', 't', '=', 0x00,0x00,0x00,0x00, '&', 'Y',

```

```

'a','s','l','p','s','f','=',0x00,0x00,0x00,0x00,'&','Y','a','s','l','d','i','r','=',0x00,0x00,0x00,0x00,
0x00};

int valorSensor = 0;

byte checksum = 0;

int xbeeSleep = 7;

//Definir as portas DATA e Clock e ainda estanciar o object SHT1x
#define dataPin 4
#define clockPin 5
SHT1x sht15 (dataPin, clockPin);

int temperatura;

int humidade;

//Pluviometro
#define pluviometro 2
volatile int contagem = 0;

float quant=0.0;

//Direção do vento
#define pin_van 5

int angle;

volatile int van = 0;

//Velocidade do vento
#define anemometro 3
volatile int velcontagem=0;

//Consumos
int C_bat; //corrente bateria
int V_bat; //tensao bateria
int C_painel; //corrente painel
int sentido=0; //se a bateria esta a carregar ou a consumir

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Criar ligação com o XBee
  pinMode(13, OUTPUT); // LED as output

```

```

pinMode(xbeeSleep, OUTPUT);
// digitalWrite(xbeeSleep, LOW);
pinMode(pluviometro, INPUT);
digitalWrite(pluviometro, HIGH);
attachInterrupt(0, countRainmeter, HIGH);
pinMode(anemometro, INPUT);
digitalWrite(anemometro, HIGH);
attachInterrupt(1, countAnemometro, HIGH);
pinMode(6, INPUT);
/* First disable the timer overflow interrupt while we're configuring */
TIMSK2 &= ~(1<<TOIE2);
/* Configure timer2 in normal mode (pure counting, no PWM etc.) */
TCCR2A &= ~((1<<WGM21) | (1<<WGM20));
TCCR2B &= ~(1<<WGM22);
/* Select clock source: internal I/O clock */
ASSR &= ~(1<<AS2);
/* Disable Compare Match A interrupt enable (only want overflow) */
TIMSK2 &= ~(1<<OCIE2A);
/* Now configure the prescaler to CPU clock divided by 1024 */
TCCR2B |= (1<<CS22) | (1<<CS21) | (1<<CS20); // Set bits
//TCCR2B &= ~(1<<CS21); // Clear bit

/* We need to calculate a proper value to load the timer counter.
 * The following loads the value 131 into the Timer 2 counter register
 * The math behind this is: * (CPU frequency) / (prescaler value) = 125000 Hz = 8us.
 * (desired period) / 8us = 125. * MAX(uint8) + 1 - 125 = 131;
 */
/* Save value globally for later reload in ISR */
tcnt2 = 0;
/* Finally load and enable the timer */
TCNT2 = tcnt2;
TIMSK2 |= (1<<TOIE2);

```

```

set_sleep_mode(SLEEP_MODE_PWR_SAVE);
sleep_enable();
}
/* * Install the Interrupt Service Routine (ISR) for Timer2 overflow.
* This is normally done by writing the address of the ISR in the
* interrupt vector table but conveniently done by using ISR() */
ISR(TIMER2_OVF_vect) {
    /* Reload the timer */
    TCNT2 = tcnt2;
    /* Write to a digital pin so that we can confirm our timer */
    //digitalWrite(2, toggle == 0 ? HIGH : LOW);
    //toggle = ~toggle;
    counter++;
}
//Pluviometro
void countRainmeter()
{
    if(digitalRead ( pluviometro )){
        delayMicroseconds(100);
        contagem++;
        // quant=contagem*0.254;
    }
}
//Anemometro
void countAnemometro()
{
    if(digitalRead ( anemometro )){
        delayMicroseconds(100);
        velcontagem++;
    }
}
void readAndSend(){

```

```

char acBuf[4 + 1]; // adiciona 1 para terminação NULL e 1 para o sinal negativo
// Ler valores do sensor multiplicados por 1000, para precisão de 4 casas decimais
//Temperatura; // Amostra o valor da temperatura
temperatura = 10*sht15.readTemperatureC(); //Temperatura em graus Celcius
sprintf( acBuf, "%4d", temperatura ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para
string
trama[26] = acBuf[0];
trama[27] = acBuf[1];
trama[28] = acBuf[2];
trama[29] = acBuf[3];
//Humidade; // Amostra o valor da humidade
humidade = 10*sht15.readHumidity(); //Humidade em percentagem
sprintf( acBuf, "%4d", humidade ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para
string
trama[38] = acBuf[0];
trama[39] = acBuf[1];
trama[40] = acBuf[2];
trama[41] = acBuf[3];
//Pluviometro
sprintf( acBuf, "%4d", contagem ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para
string
trama[51] = acBuf[0];
trama[52] = acBuf[1];
trama[53] = acBuf[2];
trama[54] = acBuf[3];
contagem=0;
// quant=0;
//Van Wind
van=analogRead(pin_van);
angle=map(van,0,1023,0,359);
sprintf( acBuf, "%4d", angle ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[64] = acBuf[0];

```

```

trama[65] = acBuf[1];
trama[66] = acBuf[2];
trama[67] = acBuf[3];
//Veloc Wind
sprintf( acBuf, "%4d", velcontagem ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para
string
trama[77] = acBuf[0];
trama[78] = acBuf[1];
trama[79] = acBuf[2];
trama[80] = acBuf[3];
velcontagem=0;
//Corrente na bateria
C_bat=analogRead(4);
C_bat=map(C_bat,0,1023,0,611);
sprintf( acBuf, "%4d", C_bat ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[90] = acBuf[0];
trama[91] = acBuf[1];
trama[92] = acBuf[2];
trama[93] = acBuf[3];

//Tensão na bateria
V_bat=analogRead(2);
V_bat=map(V_bat,0,1023,0,3300);
V_bat=V_bat*2;
sprintf( acBuf, "%4d", V_bat ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[103] = acBuf[0];
trama[104] = acBuf[1];
trama[105] = acBuf[2];
trama[106] = acBuf[3];
//Corrente no painel
C_painel=analogRead(3);
C_painel=map(C_painel,0,1023,0,611);

```

```

sprintf( acBuf, "%4d", C_painel ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[116] = acBuf[0];
trama[117] = acBuf[1];
trama[118] = acBuf[2];
trama[119] = acBuf[3];
//Sentido da Corrente
sentido=digitalRead(6);
sprintf( acBuf, "%4d", sentido ); // 1024 -> "1024" converte valor inteiro para string
trama[129] = acBuf[0];
trama[130] = acBuf[1];
trama[131] = acBuf[2];
trama[132] = acBuf[3];
sentido=0;
// Wake up XBee
digitalWrite(xbeeSleep, LOW); // Liga xbee
delay(15); // Espera que acorde
// Cálculo do checksum
checksum = 0;

for ( i = 3; i < sizeof(trama)-1; i++) {
    checksum+= trama[i]; // Soma os valores que contam para checksum
}
trama[sizeof(trama)-1] = 0xFF - checksum; // Realiza o complemento para 2
Serial.write(trama, sizeof(trama)); // Envia a trama pela porta série
delay(200);
// Sleep XBee
digitalWrite(xbeeSleep, HIGH);
}
/* Main loop. Empty, but needed to avoid linker errors */
void loop() {
    if(counter == start){
        TIMSK2 &= ~(1<<TOIE2);

```

```
// executa tarefa
readAndSend();
counter = 0;
TCNT2 = tcnt2;
TIMSK2 |= (1<<TOIE2);
}
// Sleep
sleep_enable();
sleep_mode();
sleep_disable();
}
```



## Anexo C – Calibração do anemómetro

### Anexo C1 – Calibração da velocidade do vento

Na tabela C1.1 é possível observar os dados obtidos relativamente à calibração do anemómetro, para a velocidade do vento. Em que na primeira coluna tem-se a velocidade do vento medida pelo anemómetro AN400, na segunda coluna temos a frequência medida pelo Arduino e na terceira coluna tem-se o resultado da velocidade do vento medida pelo anemómetro em estudo, substituindo o valor da frequência de saída na função da linha de tendência.

Tabela C1.0.1 - Resultados da calibração da velocidade do vento.

Anemómetro AN400	Arduino	Anemómetro em estudo
Velocidade (m/s)	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)
0,6	0,2	0,7
1,1	0,3	1
1,9	0,7	1,5
2,1	1	2
2,5	1	2,3
3	1,3	2,6
3,4	1,5	2,9
3,6	1,7	3
3,8	1,8	3,4
4,3	2	3,7
4,7	2,3	4,2
5,6	2,7	4,8
6,2	3,2	5,6
6,4	3,3	5,8
7,1	3,5	6,1
7,6	4	6,9
7,8	4,2	7,2
8,6	4,3	7,5
9,3	5,2	8,8
10	5,7	9,7
10,4	6	10,2
10,7	6,2	10,5

Na figura C.1 é apresentado o gráfico referente aos valores da tabela anterior, mais precisamente da velocidade do vento em função da frequência de saída medida pelo Arduino.

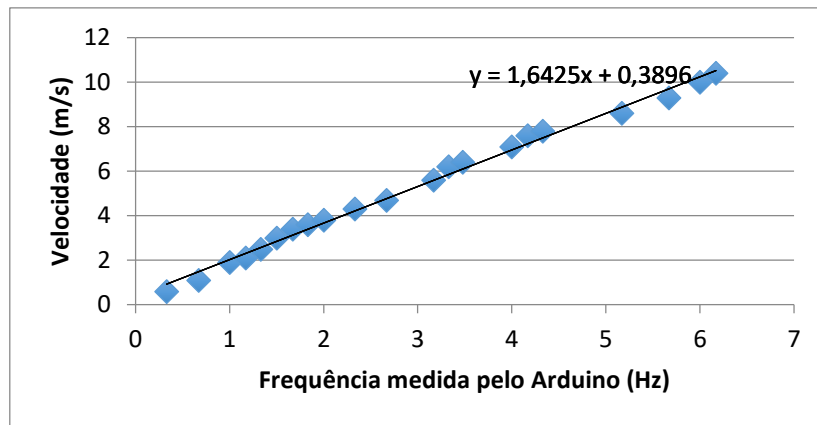


Figura C1. 1 - Velocidade do vento em função da frequência de saída.

## Anexo C2 – Calibração da direção do vento

Na tabela C2.1 é possível observar os dados obtidos relativamente à calibração do anemómetro, para a direção do vento. Em que na primeira coluna tem-se o ângulo entre 0° e 360° e na segunda coluna temos o valor entre 0 e 1023 lido pelo Arduino.

Tabela C2.1 - Resultados da calibração da direção do vento.

Ângulo (°)	Valor lido pelo	Ângulo (°)	Valor lido pelo
0	0	180	504
10	16	190	532
20	39	200	564
30	72	210	593
40	101	220	623
50	128	230	654
60	160	240	685
70	185	250	718
80	214	260	749
90	250	270	776
100	272	280	814
110	300	290	840
120	323	300	867
130	365	310	903
140	391	320	925
150	419	330	978
160	456	340	1007
170	470	350	1023

De seguida é apresentado gráfico referente aos valores da tabela anterior, mais precisamente do ângulo e dos valores medidos pelo Arduino.

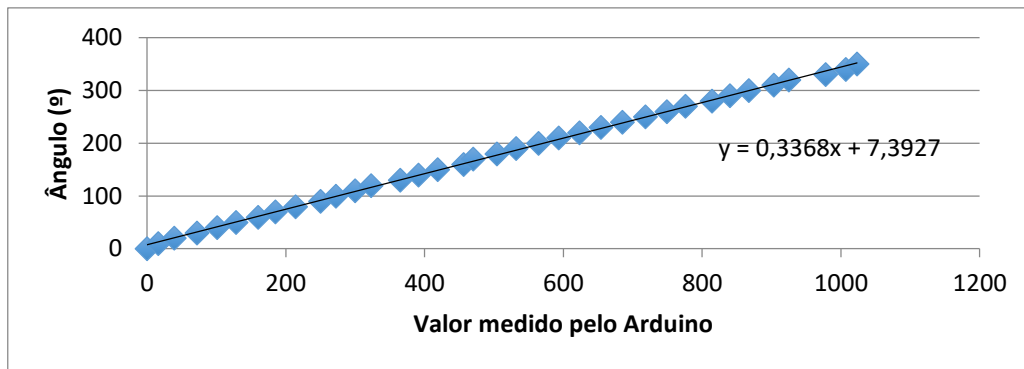


Figura C2. 1 - Direção do vento em função do valor medido no pino do Arduino.



## Anexo D



Figura D. 1 – Vista do local do nó 12 no sentido Funchal – Pico do Arieiro.



Figura D. 2 – Vista do local do nó 12 no sentido Pico do Arieiro – Funchal.



a)



b)

Figura D. 3 - Nós implementados: a) Nó 14 - Pico do Areeiro; b) Nó 13