

# COMUNICAÇÕES MARÍTIMAS WI-FI USANDO A BANDA 5.8 GHz

Mário Jorge de Matos Lopes



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Telecomunicações

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2013



Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Disciplina de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Mário Jorge de Matos Lopes, N° 1101298, 1101298@isep.ipp.pt

Orientação científica: Jorge Botelho da Costa Mamede, JBM@isep.ipp.pt

Empresa: INESC TEC - Porto

Supervisão: Rui Campos, rcampos@inescporto.pt



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Telecomunicações

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

25 de Outubro de 2013







## *Agradecimentos*

Expresso aqui o meu agradecimento a todas as pessoas que, diretamente ou indiretamente, me ajudaram na elaboração desta Tese contribuindo para o sucesso da mesma.

Em primeiro lugar aos meus pais, pois sempre que necessitei estiveram presentes e deram-me um apoio incondicional. Sem eles não era possível ser a pessoa que sou.

Em segundo lugar ao Doutor Jorge Mamede, ao Doutor Rui Campos e ao Mestre Filipe Teixeira pelo apoio prestado, acompanhamento durante toda a tese e pela validação dos conteúdos do meu trabalho. Também quero agradecer ao Luciano Santos pela ajuda prestada no decorrer das atividades desenvolvidas no âmbito da presente Tese.

Em terceiro lugar às entidades envolvidas neste trabalho, ao INESC TEC, à Cooperativa Propeixe, à entidade gestora do Edifício Transparente e à Associação Porto Digital, sem as quais a presente Tese não teria sido realizada.

Finalmente, aos meus colegas e amigos. A todos um muito obrigado.



## *Resumo*

Tendo em conta a popularidade que as comunicações Wi-Fi têm na atualidade em vários dispositivos como computadores portáteis, telemóveis ou *tablets*, sendo estes utilizados praticamente por qualquer pessoa, surgiu a ideia de utilizar esta tecnologia de baixo custo e isenta de licenciamento num cenário de comunicações marítimas. Neste contexto, esta permite fornecer o acesso à Internet em banda larga a grupos de embarcações, que atualmente recorrem a tecnologias de elevado custo (satélite) e/ou de banda estreita (rádios VHF). Com o acesso em banda larga, os proprietários poderão utilizar aplicações informáticas de interesse à atividade de negócio ou de lazer, até então só disponíveis junto à costa onde existe cobertura celular.

Nesta tese pretende-se fazer um estudo teórico e prático sobre o alcance e respetivo desempenho de comunicações de banda larga em ambiente marítimo, utilizando parte da gama de frequências dos 5,8 GHz, isenta de licença, e a norma IEEE 802.11n. Para se utilizar equipamento produzido em massa a operar nessa gama, existem duas normas disponíveis, a IEEE 802.11a e a IEEE 802.11n. Optou-se pelo IEEE 802.11n pois os esquemas de codificação ao nível físico permitem débitos mais elevados e MIMO.

Para a realização dos testes experimentais, foi necessário elaborar um protótipo de comunicação ponto a ponto, constituído por dois nós de comunicação. Um deles foi instalado numa embarcação de pesca em colaboração com a Associação Propeixe e o outro no Edifício Transparente, no Porto, em colaboração com a entidade gestora do edifício e a Associação Porto Digital. Tanto quanto se conhece é o primeiro teste de comunicações Wi-Fi realizado nestas condições a nível mundial.

Os objetivos do trabalho foram atingidos. Foi possível estabelecer comunicações Wi-Fi na banda dos 5,8 GHz até cerca de 7 km com débito médio mínimo de 1 Mbit/s. O ambiente de testes desenvolvido e os resultados obtidos servirão de base para futuros trabalhos de investigação na área das comunicações marítimas.

### ***Palavras-Chave***

Comunicações Marítimas, Telecomunicações, Banda Larga, IEEE 802.11n.



## *Abstract*

Considering nowadays popularity of Wi-Fi communications in various devices such as laptops, mobile phones and tablets, those used by almost anybody, the idea of using this technology that does not require license fee popped up, also on a maritime communications scenario. In this context, it allows small fishing vessels to access the Internet, which is currently being done using expensive and/or narrow band technologies such as satellite or VHF radios. In this way, owners could use IT applications of interest for business or leisure, which are currently only available near shore where mobile phone coverage is available.

In this thesis we intend to perform a theoretical and practical study about range and performance of high speed communications on maritime environment, by using part of the ISM 5.8 GHz range and the IEEE 802.11n standard. To use mass production equipment operating on that range, there are two possible standards, IEEE 802.11a and IEEE 802.11n. IEEE 802.11n was chosen because of its coding scheme at physical level allowing greater bitrates and MIMO.

To make experimental tests, it was necessary to develop a point-to-point communications prototype, which consists of two communications nodes. One of those was installed on a fishing vessel, in collaboration with Cooperativa Propeixe and the other one was installed at Edifício Transparente, in Porto, in collaboration with the building manager and Associação Porto Digital. To the best of our knowledge, these are the first tests performed worldwide on Wi-Fi maritime communications in these conditions.

The objectives of the work were achieved. It was possible to communicate up to around 7 km at 1 Mbit/s. The developed testbed and obtained results will pave the way to future research work within the maritime communications area.

### ***Keywords***

Maritime communications, Telecommunications, Broadband, IEEE 802.11n.



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2. MOTIVAÇÃO .....	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.4. ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	4
<b>2. ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>7</b>
2.1. ACESSOS À <i>INTERNET</i> EM AMBIENTE MARÍTIMO .....	7
2.2. EXPERIÊNCIAS REALIZADAS EM AMBIENTE MARÍTIMO .....	9
2.3. MODELOS DE PROPAGAÇÃO .....	10
2.4. ZONA DE FRESNEL .....	14
2.5. NORMA IEEE 802.11N.....	15
<b>3. MONTAGEM EXPERIMENTAL</b> .....	<b>19</b>
3.1. TOPOLOGIA DE REDE.....	19
3.2. HARDWARE .....	20
3.3. CÁLCULOS TEÓRICOS.....	25
3.4. SOFTWARE.....	29
3.5. MONTAGEM DO EQUIPAMENTO.....	37
3.6. TESTES LABORATORIAIS EM AMBIENTE TERRESTRE.....	39
<b>4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>49</b>
4.1. EMBARCAÇÃO DE PESCA AO LARGO DO PORTO.....	49
4.2. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL AO LARGO DE SESIMBRA .....	62
4.3. SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE VÍDEO PARA VIGILÂNCIA MARÍTIMA .....	69
<b>5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO</b> .....	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>77</b>

<b>ANEXO A. SCRIPT DE REGISTO DE TESTES DE BARCO PARA TERRA.....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXO B. DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO DA ANTENA SECTORIAL .....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO C. DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO DA ANTENA OMNIDIRECIONAL .....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXO D. FICHEIROS DE CONFIGURAÇÃO DE CADA NÓ .....</b>	<b>90</b>
<b>ANEXO E. EXEMPLO DE FICHEIRO KML .....</b>	<b>92</b>

## Índice de Figuras

Figura 1	Cenário de comunicação entre equipamento de terra e barco .....	3
Figura 2	Gráfico de exemplo da atenuação segundo o modelo FSPL (Free Space Path Loss) para 5,8 GHz .....	11
Figura 3	Exemplificação do modelo de 2 raios[20].....	12
Figura 4	Gráfico de exemplo da atenuação segundo o modelo de 2 raios para 5,8 GHz .....	13
Figura 5	Exemplificação do modelo de 4 raios[8].....	13
Figura 6	Comparação entre modelo de 2 raios e de 4 raios[8] .....	14
Figura 7	Exemplificação zona de Fresnel.....	15
Figura 8	Multiple In Multiple Out[22] .....	16
Figura 9	Topologia de rede utilizada .....	20
Figura 10	Placa Alix.3d3 .....	20
Figura 11	Placa RouterBOARD R52n-M.....	21
Figura 12	Montagem equipamento para realizar primeiros testes .....	22
Figura 13	Montagem GPS fora da caixa no nó de barco .....	23
Figura 14	Medição da atenuação de cabo de 3 metros a 5,8 GHz .....	24
Figura 15	Medição da atenuação de cabo de 1 metro a 5,8 GHz.....	25
Figura 16	Modelo dois raios, onde existe o raio direto (1) e o raio refletido (2).....	26
Figura 17	Gráfico da atenuação do sinal de acordo com o modelo de 2 raios.....	28
Figura 18	Gráfico da primeira zona de Fresnel para 16757 metros.....	29
Figura 19	Gráfico da primeira zona de Fresnel para 25327 metros.....	29
Figura 20	Ecrã inicial do portal de configuração.....	30
Figura 21	Ecrã inicial da linha de comandos .....	30
Figura 22	Ecrã após instalação do <i>kernel module</i> referente à placa Wi-Fi.....	31
Figura 23	Fluxograma referente ao script de recolha de dados .....	34
Figura 24	Fluxograma referente ao processamento dos ficheiros com os resultados dos testes...	35
Figura 25	Screenshot do iperf e iwinf.....	37
Figura 26	Fixação das placas na caixa estanque.....	38
Figura 27	Fixação caixa estanque em mastro .....	39
Figura 28	Montagem do nó de terra .....	40
Figura 29	Colocação do nó de terra no terreno.....	40
Figura 30	Montagem do nó de barco na bagageira do carro.....	41
Figura 31	Localizações dos equipamentos .....	42
Figura 32	Equipamento montado no tejadilho da viatura.....	43
Figura 33	Montagem de antena omnidirecional na viatura .....	44

Figura 34	Montagem da caixa e antena sectorial.....	44
Figura 35	Montagem do nó de terra no topo do edifício transparente.....	45
Figura 36	Abertura da antena montada em terra a -6 dB.....	46
Figura 37	Montagem do nó de barco.....	47
Figura 38	Percurso do barco de pesca.....	50
Figura 39	Débito em modo UDP em função da distância no regresso.....	51
Figura 40	Jitter em função da distância no regresso.....	52
Figura 41	Débito em modo TCP em função da distância no regresso.....	52
Figura 42	Tempo de ida e volta ao nó de terra em função da distância no regresso.....	53
Figura 43	Média de débitos em modo TCP em função da distância na saída.....	54
Figura 44	Média de débitos em modo TCP em função da distância no regresso.....	54
Figura 45	Média de débitos em modo UDP em função da distância na saída.....	55
Figura 46	Média de débitos em modo UDP em função da distância no regresso.....	55
Figura 47	Média de tempos de jitter em função da distância na saída.....	56
Figura 48	Média de tempos de jitter em função da distância no regresso.....	56
Figura 49	Média de tempos de RTT em função da distância na saída.....	57
Figura 50	Média de tempos de RTT em função da distância no regresso.....	57
Figura 51	Percentagem de pacotes recebidos em função da distância na saída.....	58
Figura 52	Percentagem de pacotes recebidos em função da distância no regresso.....	58
Figura 53	Potência de sinal enviado de terra e recebido no barco em função da distância na saída	59
Figura 54	Potência de sinal enviado de terra e recebido no barco em função da distância no regresso	60
Figura 55	Modelo de 2 raios ajustado à ondulação e respetivo sinal medido no regresso.....	61
Figura 56	Posição do nó de terra e do nó de barco em Sesimbra.....	63
Figura 57	Montagem da antena de terra para realização de testes.....	64
Figura 58	Débito em modo UDP ao longo do tempo.....	65
Figura 59	Jitter ao longo do tempo.....	65
Figura 60	Débito em modo TCP ao longo do tempo.....	66
Figura 61	Tempo de ida e volta ao nó de barco ao longo do tempo.....	66
Figura 62	Fotograma de vídeo recebido.....	68
Figura 63	Estação Litoral da Aguda[18].....	69
Figura 64	Montagem equipamento terra.....	70
Figura 65	Fotograma de vídeo recebido em boas condições.....	71
Figura 66	Fotograma de vídeo recebido com erros devido a informação perdida na ligação.....	71





## *Índice de Tabelas*

Tabela 1	Comparação entre serviços disponíveis em ambiente marítimo .....	8
Tabela 2	Esquemas de codificação da norma IEEE 802.11n[21] .....	17
Tabela 3	Valores considerados para efetuar cálculos teóricos .....	26
Tabela 4	Valores considerados para efetuar cálculos da zona de Fresnel .....	28



## *Acrónimos*

AIS	–	Automatic Identification System
ATS	–	Adaptive Traffic Scheduling
BER	–	Bit Error Ratio
BPSK	–	Binary Phase Shift Keying
BSSID	–	Basic Service Set Identifier
BWA	–	Broadband Wireless Access
CSV	–	Comma-separated values
DNS	–	Domain Name System
EIRP	–	Equivalent Isotropically Radiated Power
FER	–	Frame Error Ratio
FSPL	–	Free Space Path Loss
GPS	–	Global Positioning System
GTS	–	Greedy Traffic Scheduling
HF	–	High Frequency
HTTP	–	Hypertext Transfer Protocol
IP	–	Internet Protocol
KML	–	Keyhole Markup Language
MAC	–	Medium Access Control

- MF – Medium Frequency
- MIMO – Multiple In Multiple Out
- NAT – Network Address Translation
- PoE – Power over Ethernet
- RP-SMA – Reverse Polarity - SubMiniature version A
- RTT – Round-Trip Time
- SSH – Secure Shell
- TCP – Transmission Control Protocol
- UDP – User Datagram Protocol
- UHF – Ultra High Frequency
- USB – Universal Serial Bus
- VHF – Very High Frequency
- VoIP – Voice over IP
- WiMAX – Worldwide Interoperability for Microwave Access





# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Em termos de comunicações realizadas em ambiente marítimo, junto à costa é possível comunicar utilizando o telefone móvel, tanto para comunicações de voz como de dados. Com o afastamento da costa, esse serviço vai-se degradando, sendo necessário utilizar um acesso satélite ou rádio VHF (Very High Frequency).

Com este trabalho pretendeu-se explorar o desempenho de uma ligação Wi-Fi ponto a ponto utilizando equipamento produzido em massa, de baixo custo, utilizando tecnologia aberta, isenta de licença, em ambiente marítimo. Esta ligação Wi-Fi permitirá o acesso à Internet de uma embarcação, caso o equipamento instalado na costa tenha acesso à mesma. Vai igualmente permitir que aplicações informáticas, utilizadas no âmbito da atividade da embarcação em questão, sejam utilizadas sem recurso a soluções pagas de acesso à Internet, quando estas apenas necessitam de transmitir informação da embarcação para a costa.

Para tal, recorreu-se à norma IEEE 802.11n, operando numa parte da gama de frequências dos 5,8 GHz, pois existem em Portugal poucas redes Wi-Fi e outras tecnologias a operar nesta gama. Também existem aplicações que normalmente são utilizadas em terra que utilizam em parte esta gama [1], como é o caso dos sistemas telemáticos de transportes rodoviários. Esta banda não está tão explorada como a banda dos 2,4 GHz devido às características de propagação do sinal rádio dentro de edifícios. No entanto, esta é utilizada, por exemplo, nos Estados Unidos da América para criar redes a

operar sobre a norma IEEE 802.11a, onde uma das vantagens se traduz no simples facto de o funcionamento de um forno micro-ondas não causar problemas na transmissão de dados na rede Wi-Fi, por operarem em frequências diferentes. A banda dos 5,8 GHz está isenta de licença e beneficia de ser permitida uma maior potência de transmissão face a outras bandas [2][3].

Tendo em conta as vantagens que a norma IEEE 802.11n tem em relação à norma IEEE 802.11a, sendo estas as únicas escolhas possíveis devido ao *hardware* utilizado e à frequência de operação, optou-se por se utilizar a norma IEEE 802.11n. Esta permite maiores débitos com a mesma intensidade de sinal recebido face à norma IEEE 802.11a, sendo no máximo de 72,2 Mbit/s versus 54 Mbit/s usando 20 MHz de largura de banda, alcançando 150 Mbit/s com 40 MHz de largura de banda e 300 Mbit/s utilizando duas antenas recorrendo à técnica MIMO (Multiple In Multiple Out) explorando duas *spatial streams*, podendo alcançar ainda mais velocidade em condições que não são objeto de estudo na presente tese.

Considerando a elevada penetração no mercado que a norma IEEE 802.11n tem, que o equipamento no qual está a operar é de baixo custo, pois é produzido em massa, e que a banda de operação é isenta de licenciamento, o custo final do equipamento é muito inferior ao de equipamento feito à medida ou com uma baixa penetração no mercado. Tal acontece, por exemplo, na norma IEEE 802.16 [4]. O restante equipamento necessário à elaboração do protótipo não o encarece substancialmente, mantendo-se este protótipo como sendo constituído por equipamento de baixo custo.

De acordo com [5][6], tanto nas comunicações entre barco e terra, como nas comunicações barco a barco, o Wi-Fi é visto como sendo uma solução de comunicação de curta distância, a ser utilizada apenas dentro dos barcos ou nos portos, sendo assumido que fora deles apenas se utilizam serviços pagos ou de banda estreita. Logo aqui existe uma enorme vantagem pois cada utilizador apenas compra o equipamento, não sendo necessário pagar uma licença, uma mensalidade ou ambos. No entanto, para obter maiores distâncias relativamente às que são consideradas na presente tese, o custo do equipamento seria superior pois as placas Wi-Fi teriam que emitir mais potência e terem uma sensibilidade mais elevada. Também existe um limite de potência de transmissão, que é de 36 dBm de EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) ao usar 20 MHz de largura de banda [7].



**Figura 1** Cenário de comunicação entre equipamento de terra e barco

A experiência de comunicações entre o barco e terra realizada no âmbito da presente tese, tanto quanto se conhece, foi a primeira realizada a nível mundial, usando o Wi-Fi a operar numa banda isenta de licença, sendo testado num cenário real, onde o próprio barco descreve a rota que normalmente utiliza para pescar.

## **1.2. MOTIVAÇÃO**

A ausência de um método de comunicação em banda larga de baixo custo, acessível a proprietários de pequenas embarcações, a uma distância compreendida entre 2 e 10 km da linha de costa, fornecendo pelo menos 1 Mbit/s de débito binário, motivou a exploração do desempenho Wi-Fi para essas distâncias. O Wi-Fi está isento de licença e o custo do equipamento pode ser suportado pelos proprietários, pois nessa gama de distâncias apenas existem comunicações por voz utilizando rádios VHF ou o telemóvel. Para aceder à Internet pode-se utilizar um acesso de banda larga 3G junto à costa ou então recorrer a uma ligação satélite, cujo custo é elevado e, no caso da pesca com recurso a pequenas embarcações, o benefício não cobre a despesa.

Existindo essa necessidade de comunicações em banda larga, com recurso ao Wi-Fi, podem ser utilizadas aplicações de vídeo chamada, VoIP (Voice over IP), aplicações informáticas específicas à prática de pesca, entre outras, com custos de ligação muito menores.

A solução defendida na presente tese passa por utilizar equipamento de baixo custo, que permita a operação da ligação Wi-Fi entre 2 e 10 km da linha de costa, respeitando os limites legais de potência emitida. Este equipamento está preparado para ser facilmente instalado no barco e em terra.

Todo o trabalho desenvolvido na presente tese, tanto quanto se sabe, é pioneiro a nível mundial pois não só utiliza o Wi-Fi adaptado a funcionar em longas distâncias em ambiente marítimo como também os testes são realizados em ambiente real. Neste existem variáveis que não podem ser controladas como seriam num simulador, mas que por sua vez permite que trabalho futuro aperfeiçoe o Wi-Fi para este tipo de cenário de aplicação.

### **1.3. OBJETIVOS**

A motivação descrita na Secção 1.2 levou à definição do principal objetivo deste trabalho: a análise da viabilidade de comunicações Wi-Fi em ambiente marítimo até 10 km. Para a concretização deste objetivo foram considerados os seguintes objetivos específicos:

- Fazer uma pesquisa bibliográfica de modelos de propagação sobre a água que suportaram experiências em ambiente semelhante;
- Fazer um estudo dos modelos teóricos;
- Averiguar quais as licenças necessárias para levar a cabo esta experiência, junto da ANACOM;
- Fazer o planeamento rádio e averiguar que sistemas interferem na frequência utilizada;
- Fazer um levantamento sobre o equipamento que será mais vantajoso em termos de custo versus alcance, considerando as limitações de potência;
- Fazer a assemblagem do equipamento escolhido bem como as respetivas configurações de *software* para a elaboração do protótipo;
- Elaborar *software* de apoio à recolha e processamento de medidas;
- Efetuar testes em terra simulando ambiente marítimo e corrigir possíveis problemas ou encontrar alternativas;
- Instalar equipamento em terra e na embarcação e superar desafios que venham a surgir no ambiente real;
- Efetuar testes em ambiente marítimo de forma a validar os modelos teóricos.

### **1.4. ESTRUTURA DO DOCUMENTO**

Este documento está dividido em 6 capítulos. O Capítulo 2 demonstra o estado atual das comunicações marítimas, bem como experiências que foram feitas neste meio com alguns aspetos comuns aos referidos nesta tese. O Capítulo 3 apresenta os cálculos teóricos de suporte à experiência, enquanto o Capítulo 4 apresenta a montagem experimental. O

Capítulo 5 apresenta os resultados experimentais. Finalmente no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e trabalho futuro.



## 2. ESTADO DA ARTE

Devido à constante evolução da tecnologia, novos mecanismos de acesso à informação e de comunicação surgem, permitindo que processos sejam executados mais rapidamente. Como tal, foi realizada uma pesquisa sobre o que existe a nível comercial, experiências realizadas em ambiente marítimo, modelos de propagação existentes e a norma IEEE 802.11n.

### 2.1. ACESSOS À *INTERNET* EM AMBIENTE MARÍTIMO

É possível aceder à *Internet* em barcos, navios, embarcações ou outro tipo de veículos marítimos utilizando as tecnologias descritas na Tabela 1, onde são sumariadas algumas das vantagens e desvantagens de cada tecnologia.

**Tabela 1 Comparação entre serviços disponíveis em ambiente marítimo**

<b>Serviço</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Acesso satélite	Elevada área de cobertura Acesso em banda larga	Elevado custo do equipamento e de utilização do serviço
Acesso através de rede celular	Acesso em banda larga	Cobertura limitada a zonas próximas da costa Serviço com um custo associado
Acesso através de rádios HF (High Frequency) e VHF	Elevada área de cobertura Acesso sem custos de utilização	Praticamente utilizado para comunicações de voz devido à baixa velocidade atingida na transmissão de dados

Em termos de acesso satélite, existe por exemplo o serviço disponibilizado pela Inmarsat [8], que garante o acesso a voz ou à Internet a nível global, mas com um custo mensal elevado, proporcional ao débito pretendido. Como recorre a satélites geoestacionários que se encontram a ~ 36000 km da terra, aplicações que sejam sensíveis ao atraso sofrem uma quebra significativa na qualidade do serviço, pois considerando apenas a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas ( $2,98 \times 10^8$  m/s), o tempo de ida e volta situa-se à volta dos 240 ms.

Relativamente ao acesso em banda larga recorrendo às redes celulares junto à costa [9], em Portugal existem 3 operadores [10][11][12] que disponibilizam esse serviço pago, tendo um alcance limitado no mar.

Quanto ao acesso à Internet com recurso a rádios HF e VHF, por exemplo recorrendo a um modem VHF/UHF (Ultra High Frequency) [13], que permite débitos entre 2,4 kbit/s e os 9,6 kbit/s, é possível um elevado alcance dependendo da frequência utilizada para comunicar. Por sua vez é necessário outro equipamento igual ou equivalente em terra, que estando ligado a um *router* com acesso à Internet, permita que o barco possa ter acesso à Internet. Um sistema de comunicações marítimo que usa a banda MF (Medium Frequency)/HF, denominado PACTOR-III, tem um alcance entre 4000 km e 40000km [14].

## 2.2. EXPERIÊNCIAS REALIZADAS EM AMBIENTE MARÍTIMO

Com o objetivo de melhorar as comunicações no mar em termos de débito, alcance, facilidade de utilização e redução de custos, a comunidade científica tem vindo a efetuar experiências em ambiente marítimo com o intuito de expandir o leque de opções disponíveis para assegurar serviços de acesso e de comunicação em banda larga nesse ambiente.

A nível mundial, de acordo com a pesquisa realizada, foram encontradas experiências que estão focadas na simulação [9][15][16][17], na utilização da norma IEEE 802.16 [9][15][16][18][9], no impacto que o ambiente marítimo tem na propagação do sinal rádio [2][3][9][15][16][18][19][21][21].

Das experiências referidas anteriormente podem salientar-se algumas em particular, pela proximidade contextual com o trabalho desta tese. Assim, no porto de Singapura, foi realizado um teste, utilizando a banda de frequência dos 5,8 GHz, onde foram caracterizados os efeitos *Doppler*, o balanço do barco, multi-percurso e as suas respetivas influências no desempenho do sistema, através da análise do BER (Bit Error Ratio) e do FER (Frame Error Ratio). Os testes foram conduzidos utilizando uma antena sectorial em terra a 4 metros da altura do nível do mar apontada para o barco e uma antena omnidirecional no plano horizontal no barco a 5,5 metros de altura do nível do mar. A nível físico foi atingido um débito de 8 Mbit/s usando a modulação BPSK (Binary Phase Shift Keying) e 10 MHz de largura de banda. Durante a execução do teste, foi mantida a linha de vista entre a antena de terra e a antena do barco, estando este no máximo a 2200 metros de distância. As principais conclusões foram que o efeito *Doppler* contribui para que o BER e o FER aumentem à medida que o barco se desloca, que a agitação do barco contribui para um aumento do BER, piorando fortemente à medida que se aproxima do limite de cobertura e que é possível fornecer acesso sem fios de banda larga, BWA (Broadband Wireless Access), a barcos num porto [18].

Foi também realizado um estudo sobre as condições marítimas e o respetivo impacto na utilização da norma IEEE 802.16j, ou seja, o WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) *mesh* [15]. Nesta experiência verificou-se que a ondulação pode permitir linha de vista bem como colocar o barco numa zona de sombra, tendo sido feitas duas simulações nesse ambiente para avaliar o desempenho dos algoritmos ATS (Adaptive Traffic Scheduling) e GTS (Greedy Traffic Scheduling), uma

onde um barco em movimento e um barco parado competem pela comunicação com uma estação base utilizando estações de encaminhamento e outra onde 5 barcos parados competem pela comunicação com a estação base, utilizando estações de encaminhamento. Deste estudo pode-se inferir o impacto que a ondulação tem na comunicação em ambiente marítimo [15].

Numa proposta de um modelo de comunicações marítimas, denominado NANET [14], é referido que ao nível físico, o uso de técnicas como o MIMO (Multiple In Multiple Out) aumentam o débito e a distância de transmissão. Contudo, o MIMO é obrigatório na norma IEEE 802.11n [22].

O AIS (Automatic Identification System) é um sistema de localização de barcos e navios. Este permite fornecer, por exemplo, informações de posicionamento e direção, que são úteis no âmbito de uma rede *mesh* para definir a sua topologia de rede e prever as alterações a essa topologia [30], de modo a melhorar o desempenho de aplicações que utilizam esta rede.

O impacto que a ondulação tem nas comunicações está detalhado em [19][21]. A ondulação altera continuamente a altura da antena de transmissão e da antena recetora mas também a inclinação em relação à superfície da água. Essa constante alteração faz variar a potência de sinal recebida de acordo com o modelo de 2 raios [18][21].

## **2.3. MODELOS DE PROPAGAÇÃO**

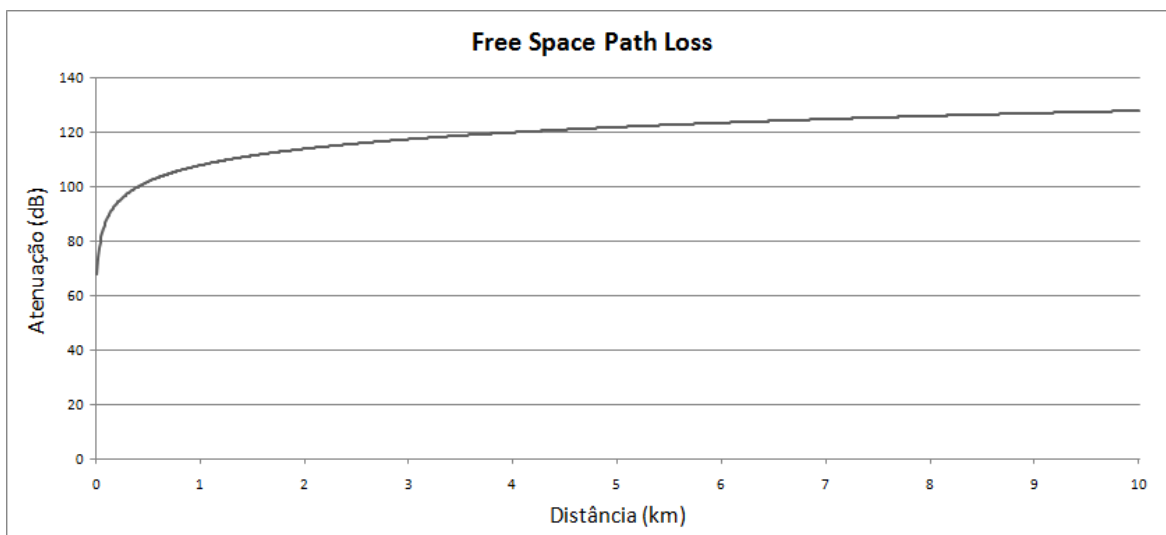
De modo a efetuar uma previsão do alcance máximo esperado, foi recolhida informação relativa aos principais modelos de propagação existentes, detalhados nesta secção.

### **2.3.1. FREE SPACE PATH LOSS**

Este modelo tem por base a atenuação que o raio direto sofre ao percorrer uma determinada distância, sem ter em linha de conta os raios que possam ser refletidos. Este modelo é utilizado essencialmente em espaço livre. A atenuação do sinal,  $L_{fs}$ , em função da distância,  $d$ , e do comprimento de onda,  $\lambda$ , pode ser calculada a partir da seguinte fórmula [16][16]:

$$L_{fs} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

Na Figura 2 encontra-se um gráfico exemplo onde se mostra a atenuação do sinal em função da distância considerando a gama de frequências dos 5,8 GHz.

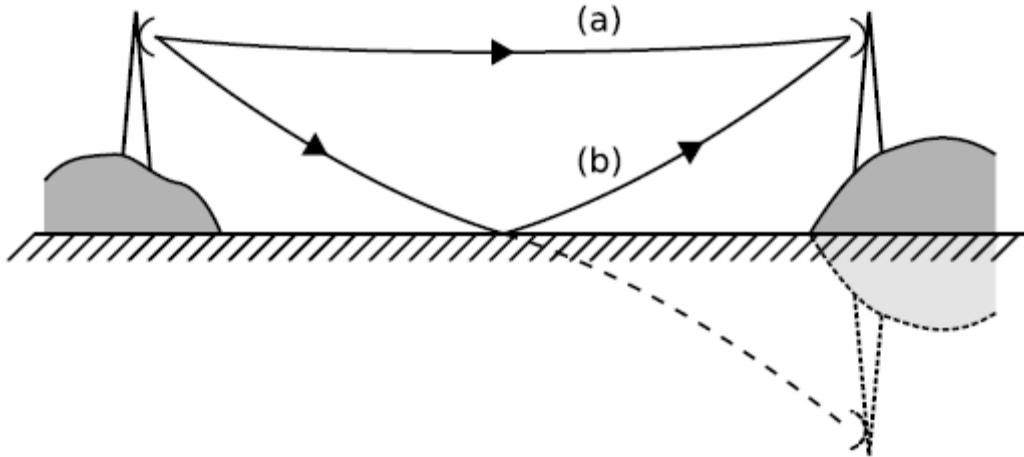


**Figura 2** Gráfico de exemplo da atenuação segundo o modelo FSPL (Free Space Path Loss) para 5,8 GHz

### 2.3.2. MODELO DE 2 RAIOS

Este modelo contempla a existência de dois raios a chegar a uma antena recetora, onde um é o raio direto e o outro o raio refletido numa superfície. Este é maioritariamente utilizado para o cálculo de atenuação de um sinal entre duas antenas à superfície terrestre, onde se considera que a reflexão do raio ocorre na superfície da Terra.

Na Figura 3 é mostrado um exemplo do modelo de 2 raios, onde o raio (a) é o raio direto e o raio (b) é o raio refletido.



**Figura 3** Exemplificação do modelo de 2 raios [21]

A fórmula que permite calcular o valor da atenuação [19] para uma distância  $d$  entre o emissor e o recetor, considerando uma altura da antena de transmissão  $h_t$ , uma altura da antena de recepção  $h_r$  e um comprimento de onda  $\lambda$ , é a seguinte:

$$Atenuação = 10 \log_{10} \left( \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \left( 2 \sin \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right)^2 \right)$$

Este modelo considera que o raio refletido sai da antena emissora com a mesma intensidade de sinal que o raio direto.

Na Figura 4 apresenta-se um gráfico de exemplo onde se mostra a atenuação em função da distância considerando a frequência dos 5,8 GHz e uma altura de antenas de 10 metros em relação à superfície refletora.

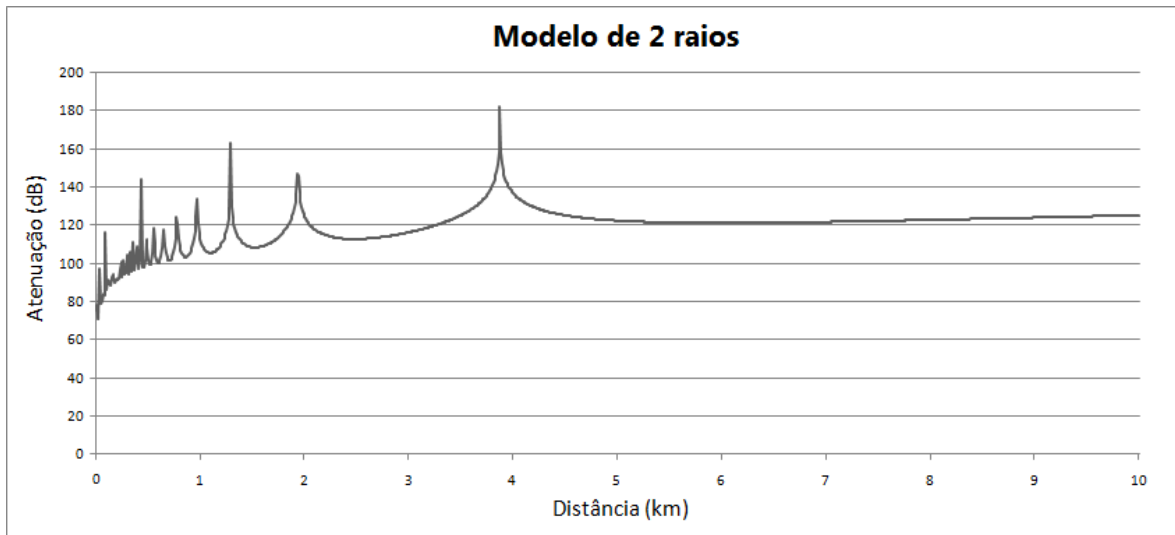


Figura 4 Gráfico de exemplo da atenuação segundo o modelo de 2 raios para 5,8 GHz

### 2.3.3. MODELO DE 4 RAIOS

Este modelo contempla a existência de quatro raios a chegar a uma antena recetora, onde dois deles seguem o comportamento abordado no modelo de 2 raios, o terceiro e o quarto sofrem uma reflexão numa segunda superfície em locais diferentes, sendo que o quarto sofre uma segunda reflexão na primeira superfície. Na Figura 5 está ilustrado um exemplo deste modelo.

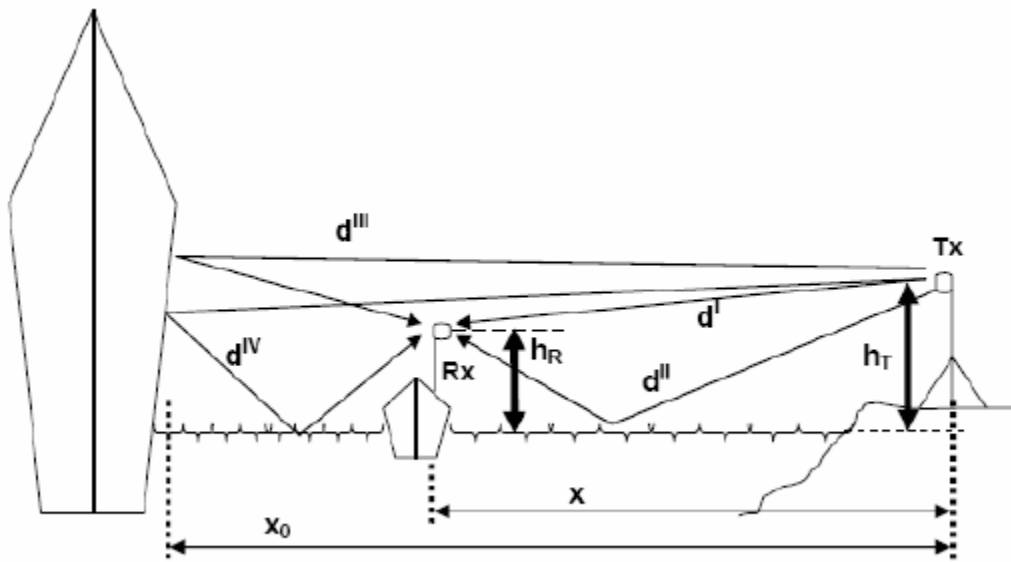


Figura 5 Exemplificação do modelo de 4 raios [18]

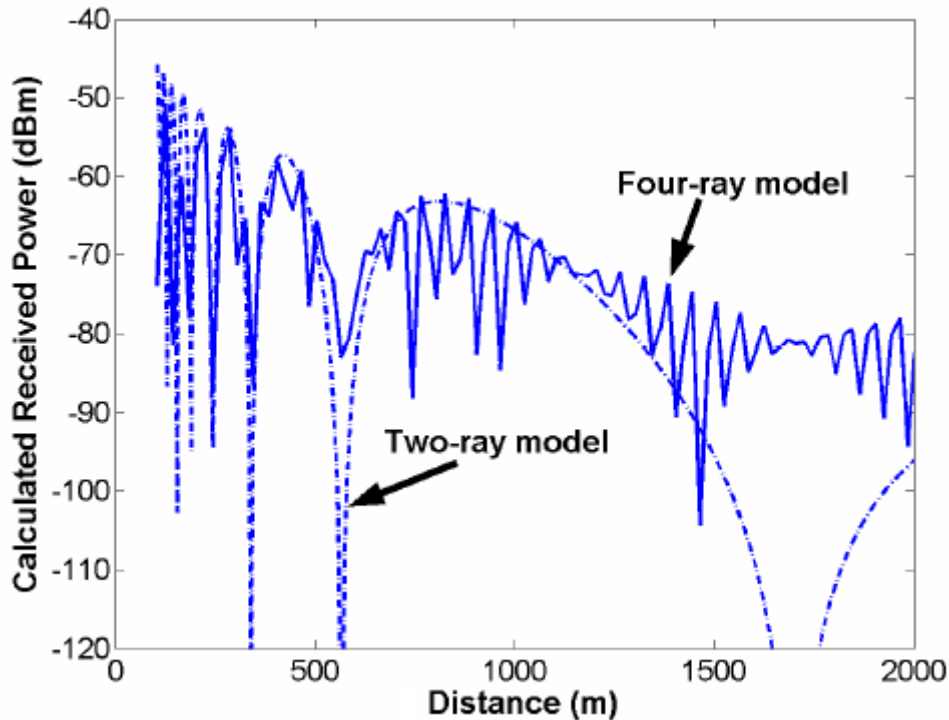


Figura 6 Comparação entre os modelos de 2 raios e de 4 raios [18]

Na Figura 6 é feita uma comparação entre os modelos de 2 e de 4 raios, onde se considerou uma altura da antena de terra de 4 metros e a antena de barco colocada a 5,5 metros [18].

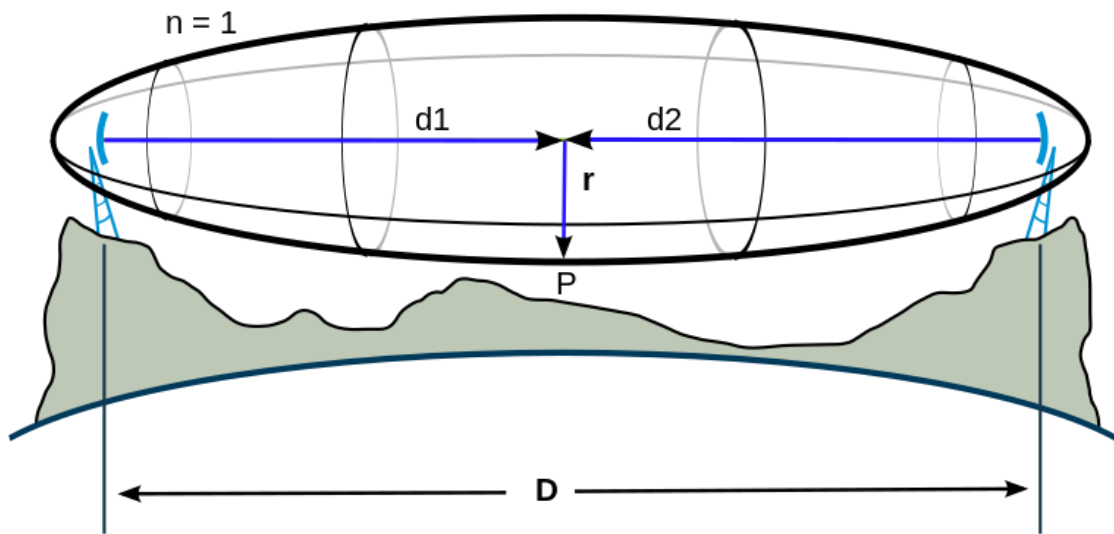
Este modelo apenas é útil no caso de se querer calcular a potência de sinal recebida quando um barco se encontra entre um navio de grandes dimensões e uma antena de terra. Tal só ocorre vulgarmente dentro de um porto marítimo e muito raramente fora do porto.

## 2.4. ZONA DE FRESNEL

Este modelo permite averiguar qual a altura máxima de objetos presentes no meio de uma ligação sem fios, qual a altura mínima das antenas ou se com um conjunto de condições se é possível receber uma determinada potência de sinal. De seguida encontra-se a fórmula para calcular o raio da elipse ( $F_n$ ) que define a zona de *Fresnel* de ordem  $n$ , para um determinado comprimento de onda ( $\lambda$ ) e para as distâncias do emissor( $d_1$ ) e do recetor( $d_2$ ) em relação ao local onde se pretende calcular o raio.

$$F_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

Na Figura 7 está um exemplo para a primeira zona de *Fresnel*, onde o raio ( $r$ ) corresponde ao raio da elipse ( $F_n$ ).



**Figura 7** Exemplificação zona de Fresnel

O sinal recebido poderá ser inferior ao esperado, dependendo do desfasamento do raio refletido em relação ao raio direto [23][24], que pode variar entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$  para a primeira zona. Cerca de 100% do sinal esperado pelo raio direto chegará à antena recetora, caso o obstáculo mais próximo da elipse esteja a pelo menos 60% do raio da elipse nesse ponto.

## 2.5. NORMA IEEE 802.11N

Tendo em conta a constante necessidade de transmitir maior número de bits em menos tempo, surgiu a norma IEEE 802.11n, que é uma versão melhorada das normas IEEE 802.11a e IEEE 802.11g. A IEEE 802.11n permite maiores débitos com recurso a algumas técnicas como por exemplo o MIMO, que possibilitam um aumento do débito binário a nível físico dos convencionais 54 Mbit/s para um máximo de 600 Mbit/s [25][22]. Ao invés da norma IEEE 802.11a só ser utilizada na banda dos 5,8 GHz e a norma 802.11g nos 2,4 GHz, a IEEE 802.11n pode operar nas duas bandas, aproveitando as características de uma determinada banda para uma aplicação específica [26].

### 2.5.1. MIMO

De modo a possibilitar maiores débitos, no IEEE 802.11n utiliza-se a técnica MIMO, que possibilita o envio e receção de informação com recurso a várias antenas, como mostrado na Figura 8.

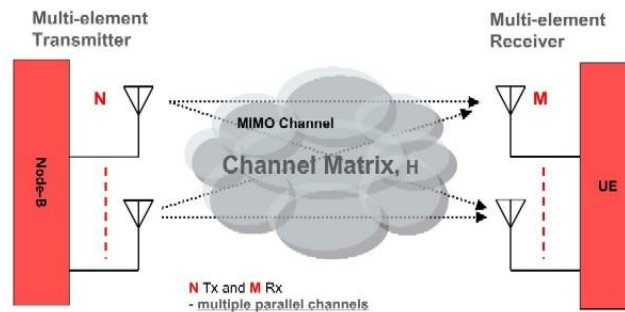


Figura 8 Multiple In Multiple Out [25]

De acordo com a norma IEEE 802.11n, a configuração de antenas é definida pela fórmula  $N \times M$ , onde  $N$  é o número de antenas de transmissão e  $M$  o número de antenas de receção. Esta configuração pode variar entre  $1 \times 1$ , onde a técnica MIMO não está a ser utilizada, podendo ir até  $4 \times 4$ , que possibilita até 600 Mbit/s de débito. A técnica *spatial multiplexing* fragmenta a informação a enviar em *spatial streams*, recorrendo então às várias antenas disponíveis para transmitir. Ao chegar ao recetor, as *spatial streams* são novamente reunidas ordenadamente, pois cada uma tem a sua própria assinatura diferenciadora. O número máximo de *spatial streams* a enviar é limitado pelo número mínimo de antenas presentes no transmissor ou no recetor. Por exemplo, numa configuração  $2 \times 3$  ou  $3 \times 2$ , só serão enviadas 2 *spatial streams* [22][26].

### 2.5.2. LARGURA DE BANDA

As normas IEEE 802.11a e IEEE 802.11g utilizam uma largura de banda de 20 MHz. Um método simples de aumentar o débito passa por aumentar a largura de banda utilizada para transmitir informação. Tal foi contemplado na norma IEEE 802.11n, utilizando dois canais de 20 MHz adjacentes, totalizando 40 MHz, o que permite duplicar o débito. Também permite operar com 20 MHz de largura de banda, para que possa funcionar em locais onde existam bastantes redes Wi-Fi criadas tanto na norma IEEE 802.11n, como noutras variantes da norma IEEE 802.11, interferindo o menos possível [22][26].

### 2.5.3. ESQUEMAS DE CODIFICAÇÃO

De acordo com as condições de sinal recebido, percentagem de erros nas tramas recebidas, entre outras medidas, podem ser feitas alterações no débito da ligação, tal como demonstrado na Tabela 2, de forma a manter a comunicação o mais estável possível fornecendo o maior débito binário possível.

**Tabela 2** Esquemas de codificação da norma IEEE 802.11n [22]

MCS Index	Type	Coding Rate	Spatial Streams	Data Rate (Mbps) with 20 MHz CH		Data Rate (Mbps) with 40 MHz CH	
				800 ns	400 ns (SGI)	800 ns	400 ns (SGI)
0	BPSK	1 / 2	1	6.50	7.20	13.50	15.00
1	QPSK	1 / 2	1	13.00	14.40	27.00	30.00
2	QPSK	3 / 4	1	19.50	21.70	40.50	45.00
3	16-QAM	1 / 2	1	26.00	28.90	54.00	60.00
4	16-QAM	3 / 4	1	39.00	43.30	81.00	90.00
5	64-QAM	2 / 3	1	52.00	57.80	108.00	120.00
6	64-QAM	3 / 4	1	58.50	65.00	121.50	135.00
7	64-QAM	5 / 6	1	65.00	72.20	135.00	150.00
8	BPSK	1 / 2	2	13.00	14.40	27.00	30.00
9	QPSK	1 / 2	2	26.00	28.90	54.00	60.00
10	QPSK	3 / 4	2	39.00	43.30	81.00	90.00
11	16-QAM	1 / 2	2	52.00	57.80	108.00	120.00
12	16-QAM	3 / 4	2	78.00	86.70	162.00	180.00
13	64-QAM	2 / 3	2	104.00	115.60	216.00	240.00
14	64-QAM	3 / 4	2	117.00	130.00	243.00	270.00
15	64-QAM	5 / 6	2	130.00	144.40	270.00	300.00
16	BPSK	1 / 2	3	19.50	21.70	40.50	45.00
...	...	...	...	...	...	...	...
31	64-QAM	5 / 6	4	260.00	288.90	540.00	600.00

Para se atingir o débito máximo de 600 Mbit/s, é necessário existirem 4 antenas no transmissor e outras 4 no recetor para que possam ser usadas 4 *spatial streams*. É também necessário que o transmissor e o recetor estejam próximos, na ordem das dezenas de metros, para que o intervalo de guarda de 400 ns permita transacionar informação sem perda de pacotes. O intervalo de guarda existe para garantir que não ocorra interferência na receção de dados. Tal pode ocorrer ao receber dois blocos de dados diferentes transmitidos em intervalos de tempo distintos, um recebido através do raio direto e o outro de uma reflexão de sinal [27].

#### 2.5.4. OTIMIZAÇÕES AO NÍVEL MAC

De modo a permitir os débitos referidos anteriormente, foram introduzidas algumas alterações ao nível MAC (Medium Access Control) face às normas IEEE 802.11a/b/g, nomeadamente:

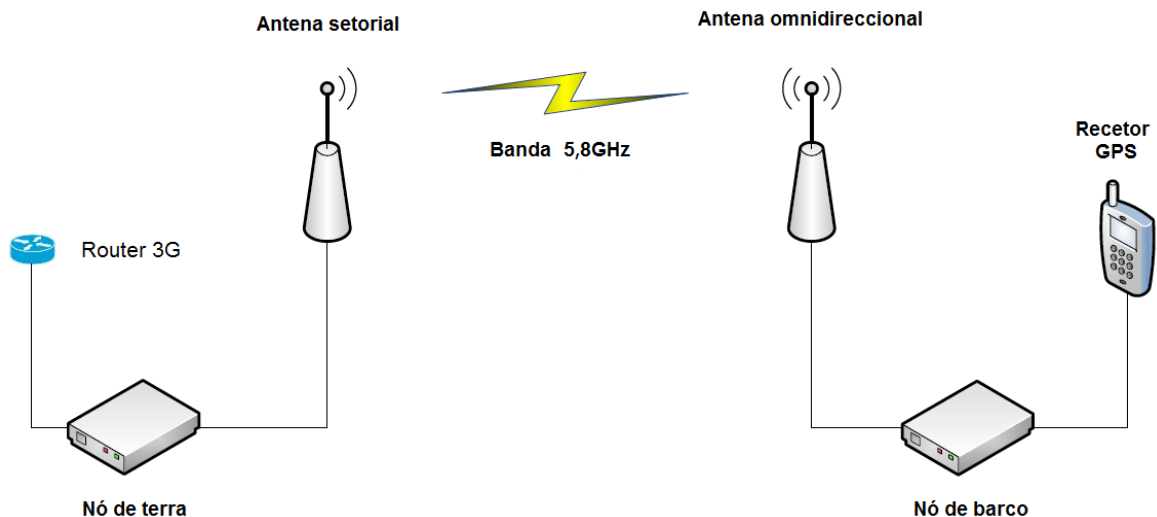
- *Block Acknowledgement*: Permite reduzir o tempo de espera, pois o emissor envia um conjunto de pacotes e só espera pela confirmação no final do envio, enquanto que nas normas precedentes o emissor fica à espera da confirmação de chegada do pacote após o envio de cada um deles [22];
- *Frame Aggregation*: Permite aumentar o débito ao utilizar apenas um cabeçalho para um conjunto de pacotes em vez de utilizar um cabeçalho por cada pacote de informação a transmitir, tal como acontece em normas precedentes [22][22].

# 3. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Neste capítulo é exposto todo o processo de montagem do protótipo necessário à avaliação experimental efetuada, indicando o *hardware*, *software* e respectivas configurações.

## 3.1. TOPOLOGIA DE REDE

Na Figura 9 está detalhada a topologia de rede utilizada para a realização dos testes práticos.



**Figura 9 Topologia de rede utilizada**

O *router* 3G assegura o acesso do nó de terra à Internet para que seja possível aceder-lhe remotamente, dispendo também de Wi-Fi com a norma IEEE 802.11n a operar nos 2,4 GHz caso o acesso 3G esteja indisponível. Ao nó de barco é possível aceder quando a ligação usando a banda dos 5,8 GHz está funcional, através do nó de terra. O recetor GPS (Global Positioning System) encontra-se ligado ao nó de barco para fornecer as coordenadas no instante em que são solicitadas.

### 3.2. HARDWARE

Para a elaboração do protótipo escolheu-se uma placa Alix.3d3, do fabricante PC Engines, igual à que se ilustra na Figura 10, cujo processador é baseado numa arquitetura x86.



**Figura 10 Placa Alix.3d3**

O sistema operativo, dados e aplicações necessárias encontram-se armazenados numa unidade Flash USB (Universal Serial Bus) devido ao seu baixo custo e requisitos necessários.

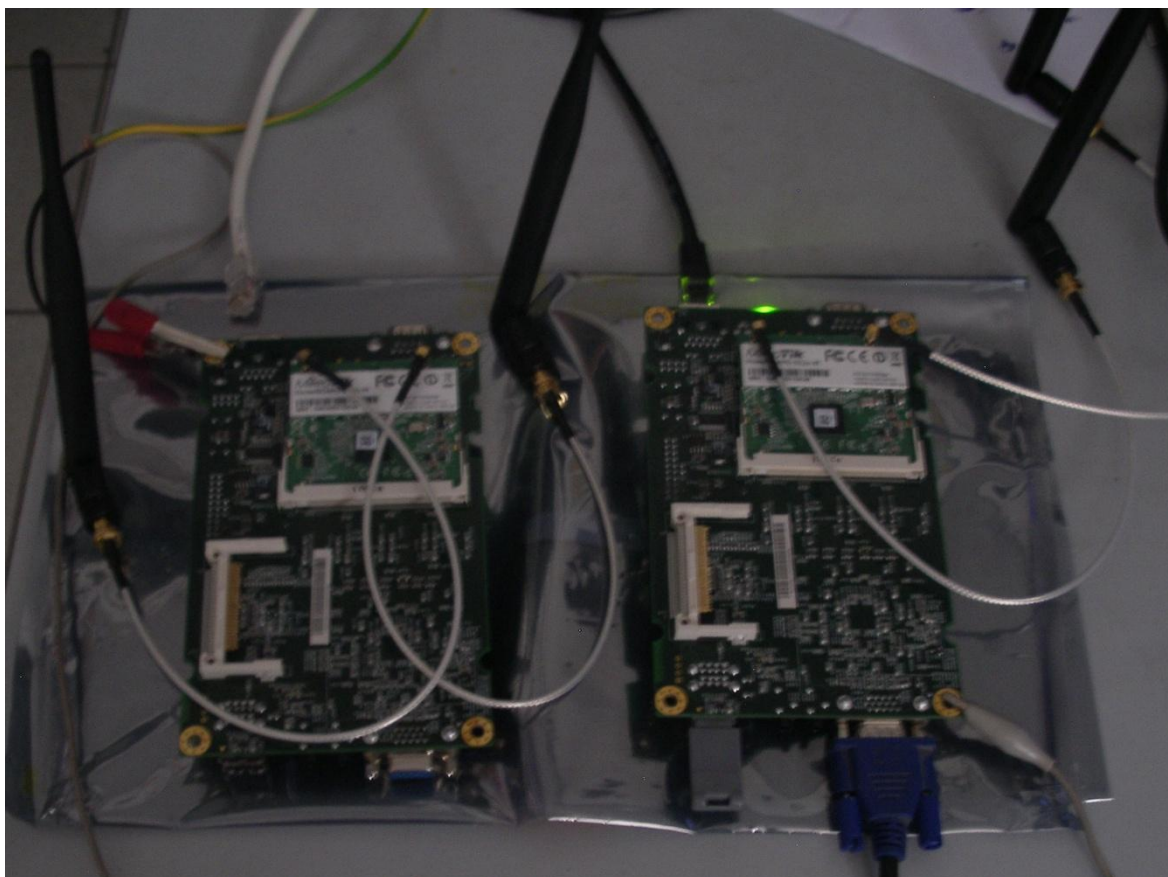
A fim de realizar comunicações Wi-Fi, foi utilizada a placa RouterBOARD R52n-M, do fabricante MikroTik, como a que se encontra na Figura 11. Esta tem uma potência máxima de transmissão de 21 dBm e tem uma sensibilidade de receção de -95 dBm, em ambos os casos utilizando o esquema de codificação mais simples da norma 802.11n a 5,8 GHz. Suporta duas antenas, suporta a técnica MIMO e gasta 1,95 W no máximo [28].



**Figura 11 Placa RouterBOARD R52n-M**

Para a realização do primeiro teste, foram construídos dois nós, tendo cada nó duas antenas omnidireccionais, como demonstrado na Figura 12.

Para se registar a posição do barco, utilizou-se um recetor GPS da marca GlobalSat, modelo BU-353, que tem uma interface USB, tal como aparece na Figura 13 e na Figura 26.



**Figura 12 Montagem do equipamento para realizar primeiros testes**

Tendo em conta as condições adversas presentes no mar e na costa, foi necessário colocar o equipamento numa caixa estanque para que o equipamento não sofresse danos. Tal foi possível deixando apenas os conectores das antenas e de rede expostos às adversidades atmosféricas do exterior, tal como demonstrado na Figura 13. Como experimentalmente se verificou que o recetor GPS não recebia sinal dentro da caixa, foi necessário colocá-lo num suporte fora da caixa, garantindo que o mesmo ficasse protegido e fosse facilmente montado no mastro do barco. De referir que todos os conectores metálicos foram protegidos para que sofressem o mínimo de danos possíveis durante as experiências.



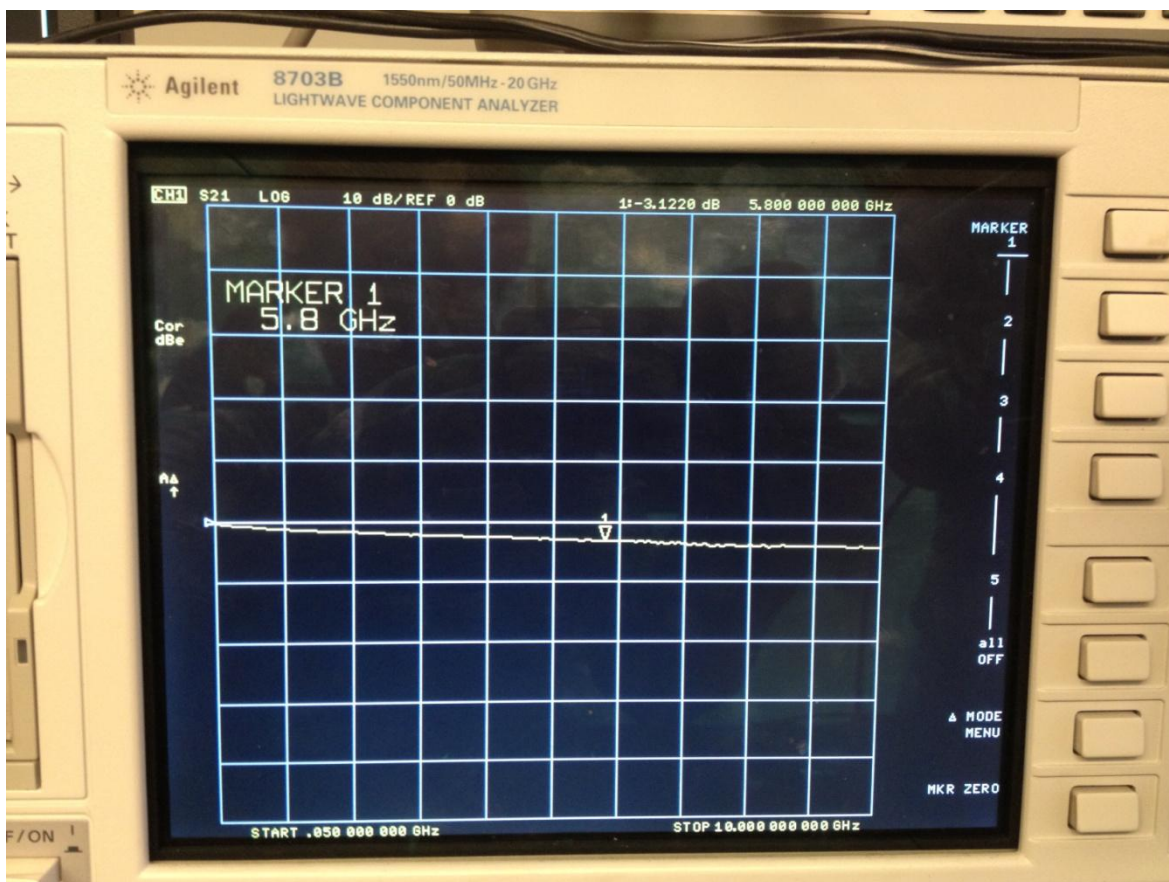
**Figura 13 Montagem GPS fora da caixa no nó de barco**

Entretanto foi realizada uma pesquisa sobre quais os cabos e antenas necessários para complementar o equipamento de testes já disponível. Para o nó de terra escolheu-se uma antena sectorial com 16 dBi de ganho,  $120^\circ$  de abertura a  $-6$  dB, com polarizações horizontal e vertical e um mínimo de 22 dB de separação entre elas, sendo esta antena da marca Ubiquiti, modelo AM-5G16-120, com dois conectores rp-sma (Reverse Polarity - SubMiniature version A) na parte de trás. Os diagramas de radiação referentes a esta antena encontram-se no Anexo B.

Para o nó do barco escolheu-se uma antena omnidireccional com 10 dBi de ganho, com polarizações horizontal e vertical e um mínimo de 25 dB de separação entre elas, sendo esta antena da marca Ubiquiti, modelo AMO-5G10, com dois conectores rp-sma na parte de baixo. Os diagramas de radiação referentes a esta antena podem ser consultados no Anexo C.

Para efetuar a ligação entre os cabos exteriores e as placas Wi-Fi, mantendo a caixa estanque, foi necessário colocar dois *pigtails*, como se ilustra na Figura 13, em que a atenuação de cada um deles é de aproximadamente 0.389 dB.

Para ligar a antena à caixa do barco, escolheu-se um cabo da marca TP-Link, modelo TL-ANT24PT3, de 3 metros. Como não vem especificado o valor da perda total do cabo em dB para a frequência de operação do equipamento, foi necessário medir no equipamento *lightwave component analyzer*, tendo-se obtido um valor de 3.12 dB, conforme mostra a Figura 14. Tendo em conta que a antena tem dois conectores referentes às duas polarizações, foram adquiridos dois cabos.



**Figura 14** Medição da atenuação de cabo de 3 metros a 5,8 GHz

Para ligar a antena à caixa de terra, escolheu-se um cabo de apenas 1 metro. Como não vem especificado o valor da perda total do cabo em dB para a frequência de operação do equipamento, foi necessário medir novamente a atenuação, sendo o valor de 1.16 dB, conforme mostra a Figura 15. Tendo em conta que a antena tem dois conectores referentes às duas polarizações, foram adquiridos dois cabos.

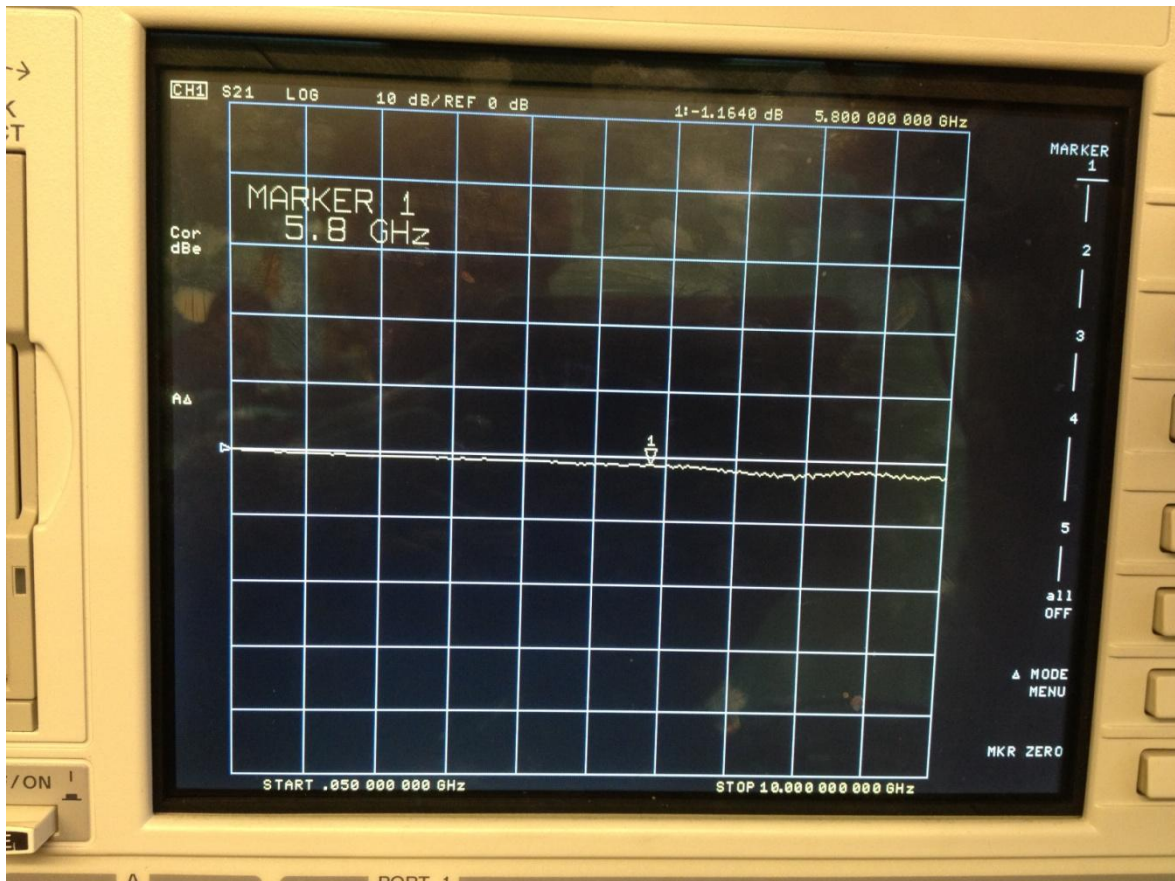


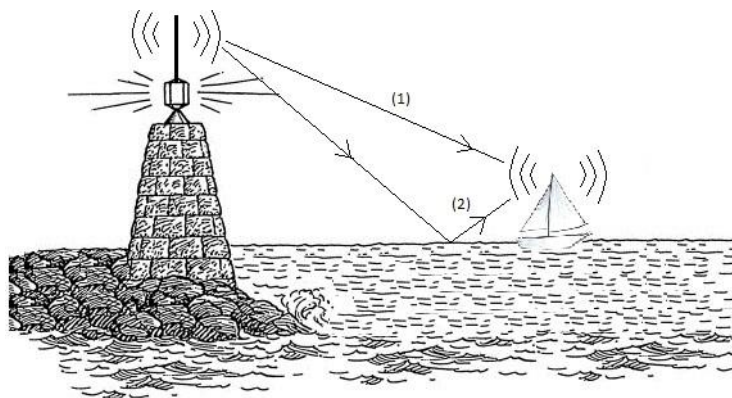
Figura 15 Medição da atenuação de cabo de 1 metro a 5,8 GHz

### 3.3. CÁLCULOS TEÓRICOS

Nesta secção são apresentados todos os cálculos de suporte à avaliação experimental realizada, o estudo dos modelos de propagação, bem como os limites mínimos e máximos teóricos.

#### 3.3.1. MODELO DE 2 RAIOS

A fim de se determinar a distância máxima possível de comunicação e perceber a variação do sinal em função da distância, utilizou-se o modelo de 2 raios, apresentado no Capítulo 2, pois é o mais aproximado do cenário onde se realizam os testes, como ilustrado na Figura 16.



**Figura 16 Modelo dois raios, onde existe o raio direto (1) e o raio refletido (2)**

Para a elaboração dos cálculos, transmitindo de terra para o barco, consideraram-se os seguintes valores para os parâmetros do modelo:

**Tabela 3 Valores considerados para efetuar cálculos teóricos**

Potência de emissão $P_t$	20 dBm
Ganho da antena de terra $G_t$	16 dBi
Perda total nos cabos e conectores em terra $L_{ct}$	1,549 dB
Sensibilidade de receção para o débito mínimo (MCS0) $S_r$	-95 dBm
Ganho da antena de barco $G_r$	10 dBi
Perda total nos cabos e conectores no barco $L_{cr}$	3,509 dB
Altura da antena de terra $h_t$	20 metros
Altura da antena de barco $h_r$	8 metros
Margem de segurança	6 dB
Frequência de operação $f$	5,8 GHz

A altura da antena de terra corresponde a uma possível altura de um farol, edifício ou estrutura para colocação de antenas em relação ao nível do mar, enquanto que a altura da antena do barco é a altura à qual a antena é montada numa embarcação de pesca em relação ao nível do mar.

A seguinte equação, já apresentada na secção 2.3.2, permite calcular o valor da atenuação [19] para uma determinada distância  $d$  entre o emissor e o recetor, considerando uma altura da antena de transmissão  $h_t$ , uma altura da antena de receção  $h_r$  e um comprimento de onda  $\lambda$ :

$$\text{Atenuação} = 10 \log \left( \frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2} \left( 2 \sin \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} \right)^2 \right) \quad (1)$$

A fim de se calcular a distância máxima de operação, tendo em conta a margem de segurança, foi necessário converter a frequência de operação  $f$  em comprimento de onda  $\lambda$ , através da seguinte fórmula:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

A constante  $c$ , referente à velocidade da luz, tem o valor de  $2,98 \times 10^8$  m/s, substituindo na fórmula (2) temos:

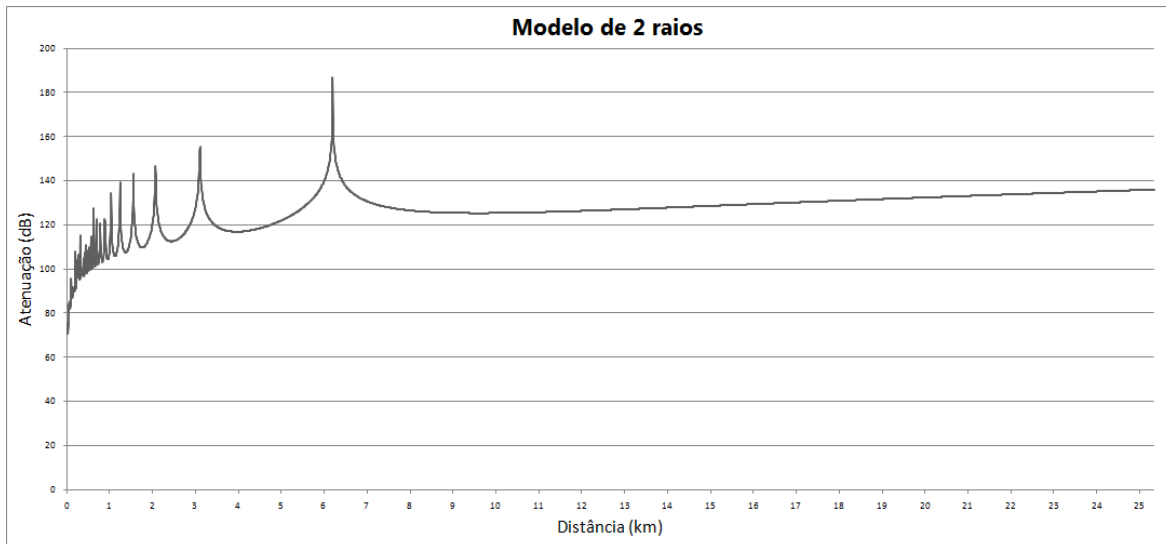
$$\lambda = \frac{2,98 \times 10^8}{5,8 \times 10^9} = 0,052 \text{ m}$$

A fórmula seguinte permite saber qual a máxima atenuação possível no sistema:

$$\begin{aligned} \text{Atenuação máxima} &= Pt - Lct + Gt - (Sr + Lcr - Gr) \\ &= 20 - 1,549 + 16 - 95 + 3,509 - 10 = 135,942 \text{ dB} \end{aligned}$$

A fim de desenhar o gráfico presente na Figura 17 com a atenuação em função da distância, utilizou-se a fórmula (1) que calcula a atenuação de acordo com o modelo de dois raios. Foi determinada a distância máxima possível de comunicação, sendo de aproximadamente 16757 metros e 25327 metros, com e sem margem de segurança, respetivamente.

Tendo em conta que a superfície da Terra não é plana, foi necessário calcular qual a altura de desnível em função da distância de superfície percorrida. Tal foi obtido de [29] e convertido para o sistema métrico, dando cerca de 11,11 cm / km.



**Figura 17** Gráfico da atenuação do sinal de acordo com o modelo de 2 raios

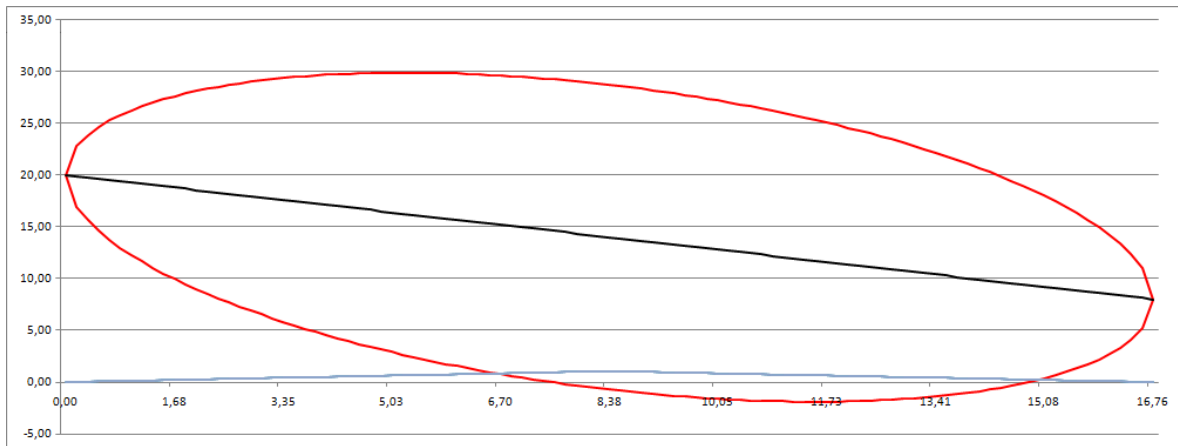
### 3.3.2. ZONAS DE FRESNEL

Para efetuar este cálculo, consideraram-se os seguintes valores para os diferentes parâmetros necessários à definição da zona de *Fresnel*:

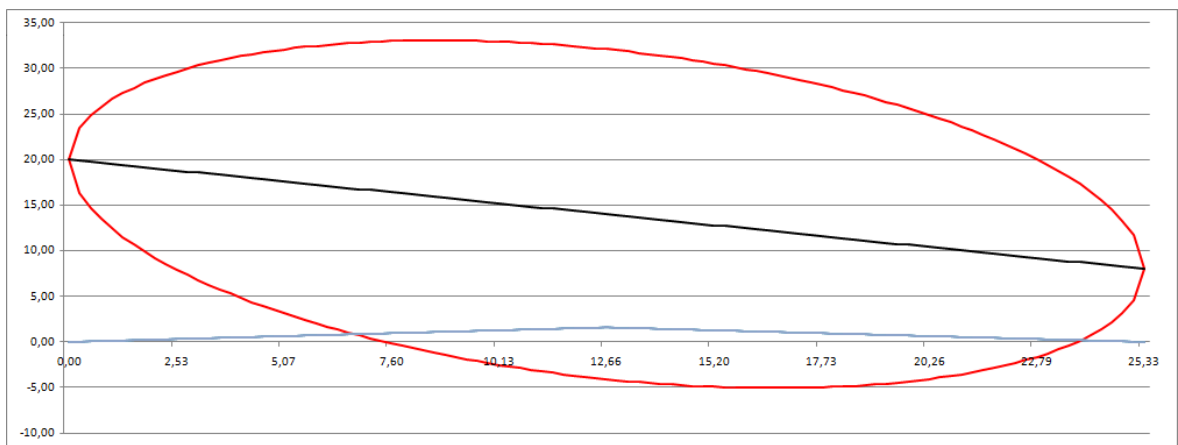
**Tabela 4** Valores considerados para efetuar cálculos da zona de Fresnel

Altura da antena de terra $h_t$	20 metros
Altura da antena de barco $h_r$	8 metros
Frequência de operação $f$	5,8 GHz
Distância máxima de comunicação com margem segurança	16757 metros
Distância máxima de comunicação sem margem segurança	25327 metros
Superfície da água sem objetos a flutuar ou acima do nível de água que causem obstruções	-

Nas figuras seguintes está representada a primeira zona de *Fresnel* pela elipse a vermelho, o trajeto do raio direto representado pela linha preta e a superfície da Terra a azul.



**Figura 18 Gráfico da primeira zona de Fresnel para 16757 metros**



**Figura 19 Gráfico da primeira zona de Fresnel para 25327 metros**

Após uma breve análise dos gráficos presentes na Figura 18 e na Figura 19, conclui-se que a potência de sinal recebida nos dois casos é fortemente afetada pela obstrução da primeira zona de *Fresnel*. Como tal, estas distâncias não serão alcançadas.

### **3.4. SOFTWARE**

Para a realização de testes, em cada nó foi utilizado o sistema operativo OpenWRT, versão 12.09-rc1, otimizado para correr em sistemas com reduzida capacidade de processamento e de armazenamento, volátil e não volátil, contendo as funcionalidades necessárias à execução do conjunto de testes detalhados na presente Tese. Inicialmente foi utilizada uma versão deste sistema operativo que está em constante desenvolvimento mas tendo em conta que se encontraram vários problemas que poderiam afetar os testes, optou-

se por utilizar uma versão estável. Essa versão foi descarregada [31], descomprimida e então copiada para um disco Flash USB utilizando o comando

```
dd if=./openwrt-x86-generic-combined-ext4.img of=/dev/sdb
```

onde a imagem continha a estrutura de partições e respetivos dados, daí copiar-se a imagem para o disco /dev/sdb.

O sistema operativo e respetivas funcionalidades podem ser configurados através de um portal ou por linha de comandos SSH (Secure Shell), como demonstrado na Figura 20 e na Figura 21, respetivamente, sendo que até se definir uma palavra passe para o utilizador *root*, apenas se consegue aceder ao portal.

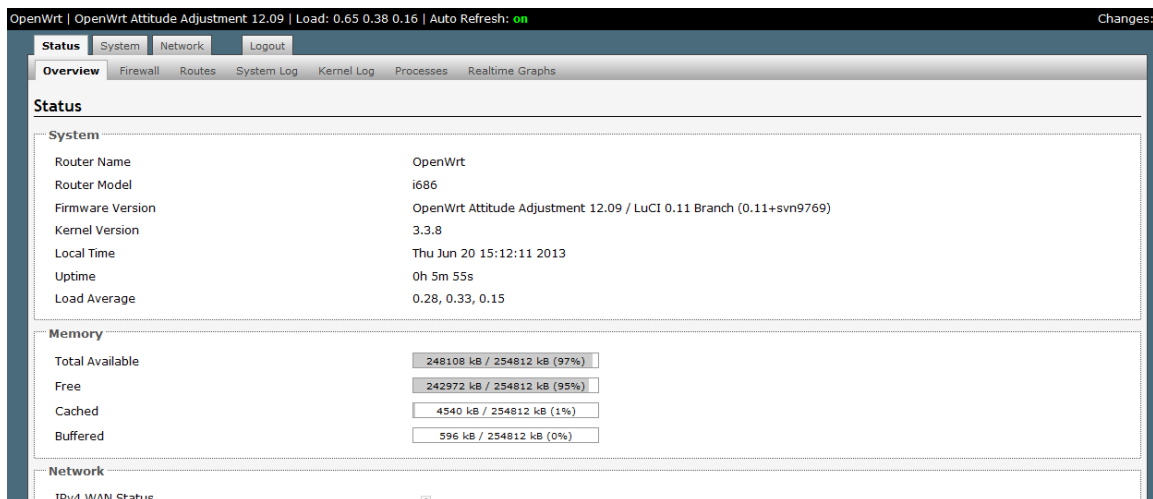


Figura 20 Ecrã inicial do portal de configuração

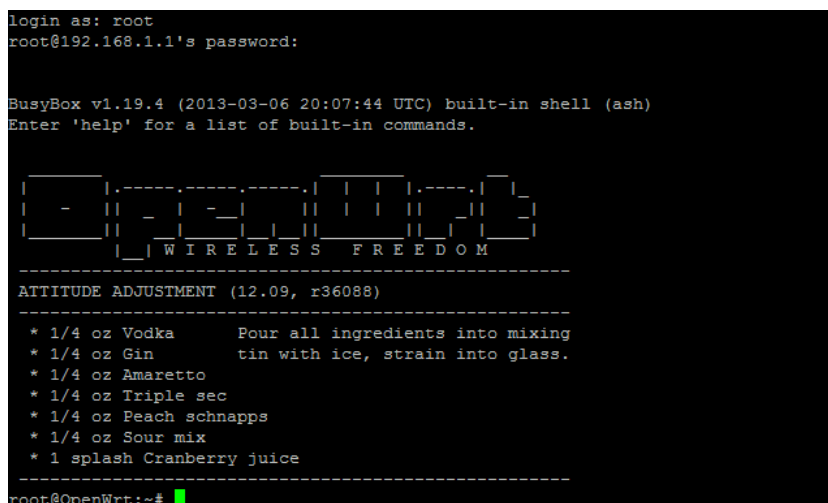
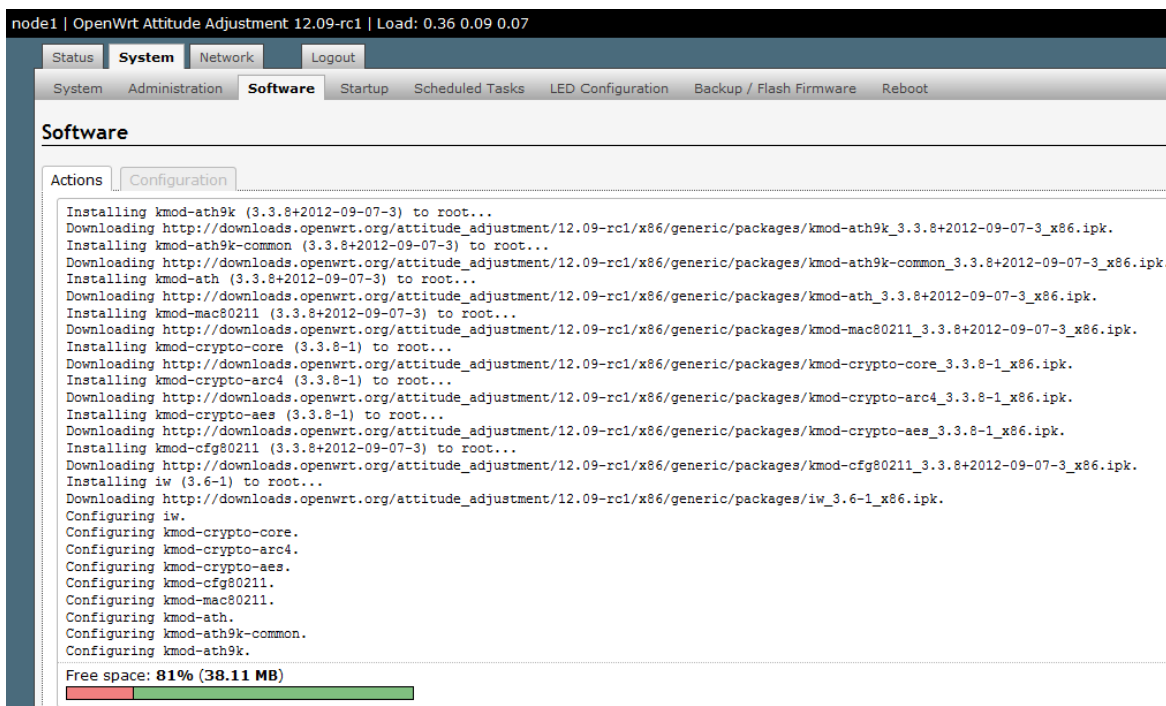


Figura 21 Ecrã inicial da linha de comandos

Para realizar os testes, tendo por base a placa Wi-Fi presente na Figura 11, foi necessário instalar o *kernel module* ath9k, versão 3.3.8+2012-09-07-3 e respectivas dependências, como demonstrado na Figura 22. De seguida foi necessário instalar o *kernel module* hostapd e reiniciar o sistema para proceder às configurações referentes ao Wi-Fi.



```
node1 | OpenWrt Attitude Adjustment 12.09-rc1 | Load: 0.36 0.09 0.07
System Administration Software Startup Scheduled Tasks LED Configuration Backup / Flash Firmware Reboot
Software
Actions Configuration
Installing kmod-ath9k (3.3.8+2012-09-07-3) to root...
Downloading http://downloads.openwrt.org/attitude_adjustment/12.09-rc1/x86/generic/packages/kmod-ath9k_3.3.8+2012-09-07-3_x86.ipk.
Installing kmod-ath9k-common (3.3.8+2012-09-07-3) to root...
Downloading http://downloads.openwrt.org/attitude_adjustment/12.09-rc1/x86/generic/packages/kmod-ath9k-common_3.3.8+2012-09-07-3_x86.ipk.
Installing kmod-ath (3.3.8+2012-09-07-3) to root...
Downloading http://downloads.openwrt.org/attitude_adjustment/12.09-rc1/x86/generic/packages/kmod-ath_3.3.8+2012-09-07-3_x86.ipk.
Installing kmod-mac80211 (3.3.8+2012-09-07-3) to root...
Downloading http://downloads.openwrt.org/attitude_adjustment/12.09-rc1/x86/generic/packages/kmod-mac80211_3.3.8+2012-09-07-3_x86.ipk.
Installing kmod-crypto-core (3.3.8-1) to root...
Downloading http://downloads.openwrt.org/attitude_adjustment/12.09-rc1/x86/generic/packages/kmod-crypto-core_3.3.8-1_x86.ipk.
Installing kmod-crypto-arc4 (3.3.8-1) to root...
Downloading http://downloads.openwrt.org/attitude_adjustment/12.09-rc1/x86/generic/packages/kmod-crypto-arc4_3.3.8-1_x86.ipk.
Installing kmod-crypto-aes (3.3.8-1) to root...
Downloading http://downloads.openwrt.org/attitude_adjustment/12.09-rc1/x86/generic/packages/kmod-crypto-aes_3.3.8-1_x86.ipk.
Installing kmod-cfg80211 (3.3.8+2012-09-07-3) to root...
Downloading http://downloads.openwrt.org/attitude_adjustment/12.09-rc1/x86/generic/packages/kmod-cfg80211_3.3.8+2012-09-07-3_x86.ipk.
Installing iw (3.6-1) to root...
Downloading http://downloads.openwrt.org/attitude_adjustment/12.09-rc1/x86/generic/packages/iw_3.6-1_x86.ipk.
Configuring iw.
Configuring kmod-crypto-core.
Configuring kmod-crypto-arc4.
Configuring kmod-crypto-aes.
Configuring kmod-cfg80211.
Configuring kmod-mac80211.
Configuring kmod-ath.
Configuring kmod-ath9k-common.
Configuring kmod-ath9k.
Free space: 81% (38.11 MB)
```

Figura 22 Ecrã após instalação do *kernel module* referente à placa Wi-Fi

Relativamente às configurações Wi-Fi optou-se por utilizar a norma 802.11n operando na faixa de frequência dos 5,8 GHz, pois permite maiores débitos face à norma 802.11a nas mesmas condições de sinal recebido e suporta MIMO. Foi selecionado o modo Ad-Hoc para que as atuais e futuras experiências realizadas sobre este equipamento pudessem ocorrer com o mínimo de alterações possíveis, pois nesta fase podem-se encontrar problemas que rapidamente são resolvidos tendo em conta a simplicidade da montagem, tanto a nível de *hardware* como a nível de *software*. Para um primeiro teste foi utilizada o canal 149 (5,745 GHz), 20 MHz de largura de banda e a potência de transmissão nos 20 dBm.

Para que ambos os nós comuniquem após serem ligados, foi necessário atribuir um nome à rede *mesh* e um BSSID (Basic Service Set Identifier), comum aos dois nós e a futuros nós que possam vir a ser ligados.

De acordo com a norma 802.11n, o tempo de espera por uma confirmação de chegada de pacote ao destino (*ACK timeout*) e o tempo de espera para o envio de uma nova trama foram estabelecidos tendo em conta que a distância entre um emissor e um recetor seria de cerca de 300 metros. Tendo por base as distâncias máximas calculadas teoricamente, foi necessário reajustar essa distância para 20 km. Esta foi configurada no ficheiro `/config/wireless`, cujos tempos de espera foram ajustados automaticamente pelo driver da placa Wi-Fi. Aumentando os tempos de espera, o débito binário vai diminuir, pois efetivamente é transmitida menos informação no mesmo intervalo de tempo.

Finalizada a configuração relativa à conectividade entre equipamentos, instalaram-se os programas definidos para realizar testes, como o caso do *iperf*, que é um gerador de tráfego que trabalha sobre TCP (Transmission Control Protocol) ou UDP (User Datagram Protocol), que permite saber o débito máximo que uma determinada aplicação pode utilizar, tendo sido utilizada a versão 2.0.5-1. Outra aplicação instalada foi o *iwinfo* que permite retirar informações sobre o estado da ligação, como mostrado na Figura 25.

De seguida, tratou-se de configurar o recetor GPS para saber a posição do barco ao efetuar os testes. Para este funcionar foi necessário instalar a *package* `gpsd`, `kmod-usb-serial-pl2303`, `gpsd-clients` e respetivas dependências. Após reiniciar o sistema, verificou-se que o sistema se encontrava em pleno funcionamento sem nenhuma configuração adicional ao invocar o comando `cgps`, abrindo em modo de texto uma janela que contém os vários dados. Como não era possível gravar os dados diretamente para ficheiro devido à constante mudança dos dados apresentados, recorreu-se ao comando

```
gpspipe -W -n 5
```

que tira pelo menos um ponto de coordenadas e sai para a linha de comandos, e cuja saída pode ser gravada diretamente para ficheiro.

Partindo deste *software*, o equipamento de cada um dos nós registou a informação relativa a tráfego TCP e UDP gerado, variação no atraso na entrega de pacotes, perda de pacotes, débito da ligação, potência de transmissão, potência do sinal recebido e a intensidade do ruído. No caso do nó de barco, também foi registada a posição do barco com recurso ao GPS, para que se possa medir a distância aproximada entre o barco e o nó de terra.

Para que esta informação fosse registada, foi necessário elaborar um script que executa as seguintes tarefas de 2 em 2 minutos:

- Terminar a execução de todas as instâncias do programa *iperf* abertas;
- Efetuar um *ping* de 2 iterações ao outro nó para que a ligação Wi-Fi fique pronta a realizar os testes;
- Retirar as coordenadas atuais e gravar para ficheiro;
- Executar o programa *iwinfo* para registar em ficheiro o estado da ligação, intensidade do sinal recebido, ruído e potência de transmissão, gravando para ficheiro essas informações;
- Executar *iperf* em modo cliente, modo UDP, a gerar 7 Mbit/s de tráfego, durante 50 segundos, informação que na receção é gravada para um ficheiro;
- Após 48 segundos do início da execução do ponto anterior, retira as coordenadas nesse instante e grava-as num ficheiro, executando depois o programa *iwinfo* para registar em ficheiro o estado da ligação, intensidade do sinal recebido, ruído e potência de transmissão, gravando num ficheiro toda a informação recolhida;
- Após 2 segundos da execução do ponto anterior, volta a executá-lo novamente;
- Executar o *iperf* em modo cliente, modo TCP, durante 50 segundos, gravando a informação num ficheiro;
- Após 48 segundos do início da execução do ponto anterior, retira as coordenadas nesse instante e grava-as em ficheiro, executando depois o programa *iwinfo* para registar em ficheiro o estado da ligação, intensidade do sinal recebido, ruído e potência de transmissão, gravando em ficheiro essas informações;
- Após 2 segundos da execução do ponto anterior, volta executá-lo novamente;
- Efetuar um *ping* ao outro nó com 10 iterações e gravar para ficheiro;

- Finalmente retirar as coordenadas nesse instante, gravando-as em ficheiro, executando depois o programa *iwinfo* para registar em ficheiro o estado da ligação, intensidade do sinal recebido, ruído e potência de transmissão, gravando para ficheiro essas informações e aguardar;

Partindo do algoritmo descrito anteriormente, elaborou-se o script de registo de testes de barco para terra, presente no Anexo A.

Na Figura 23 está o fluxograma de suporte ao algoritmo anterior.

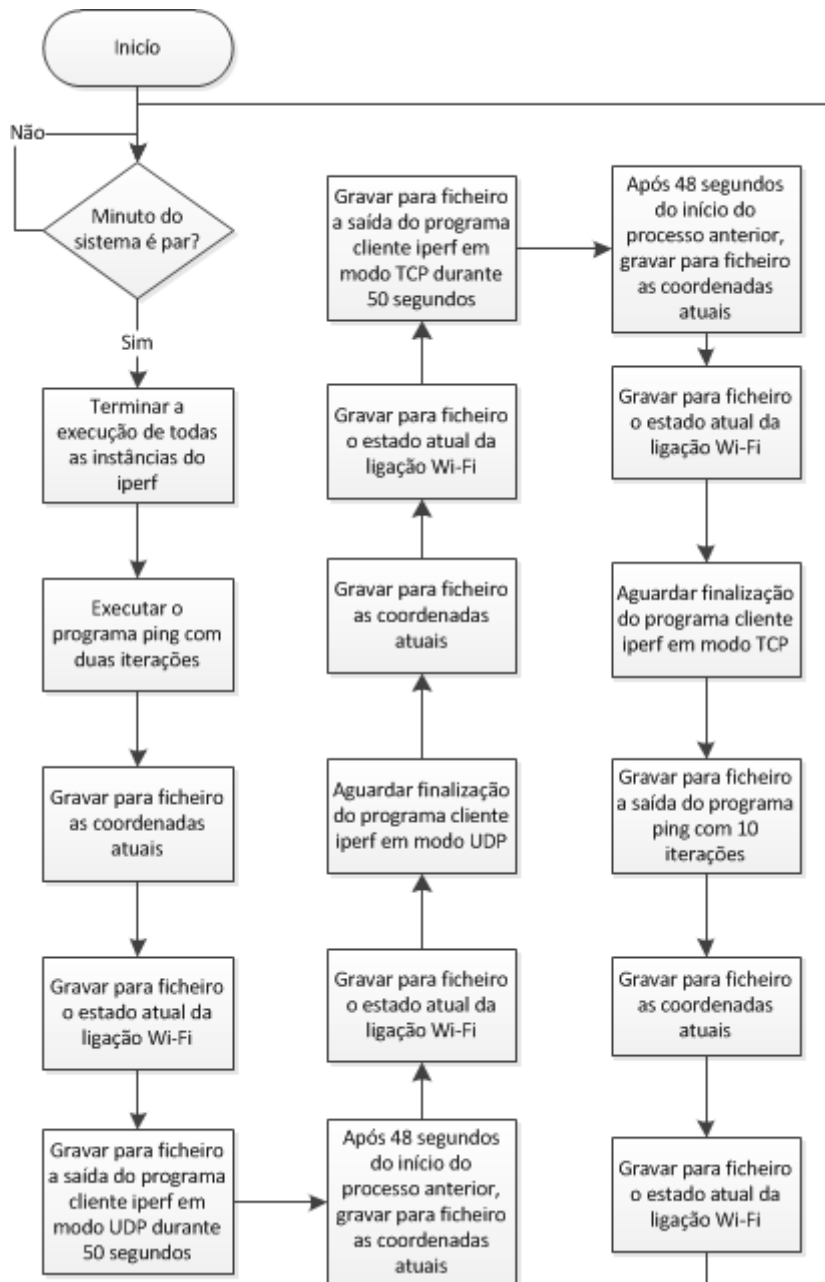
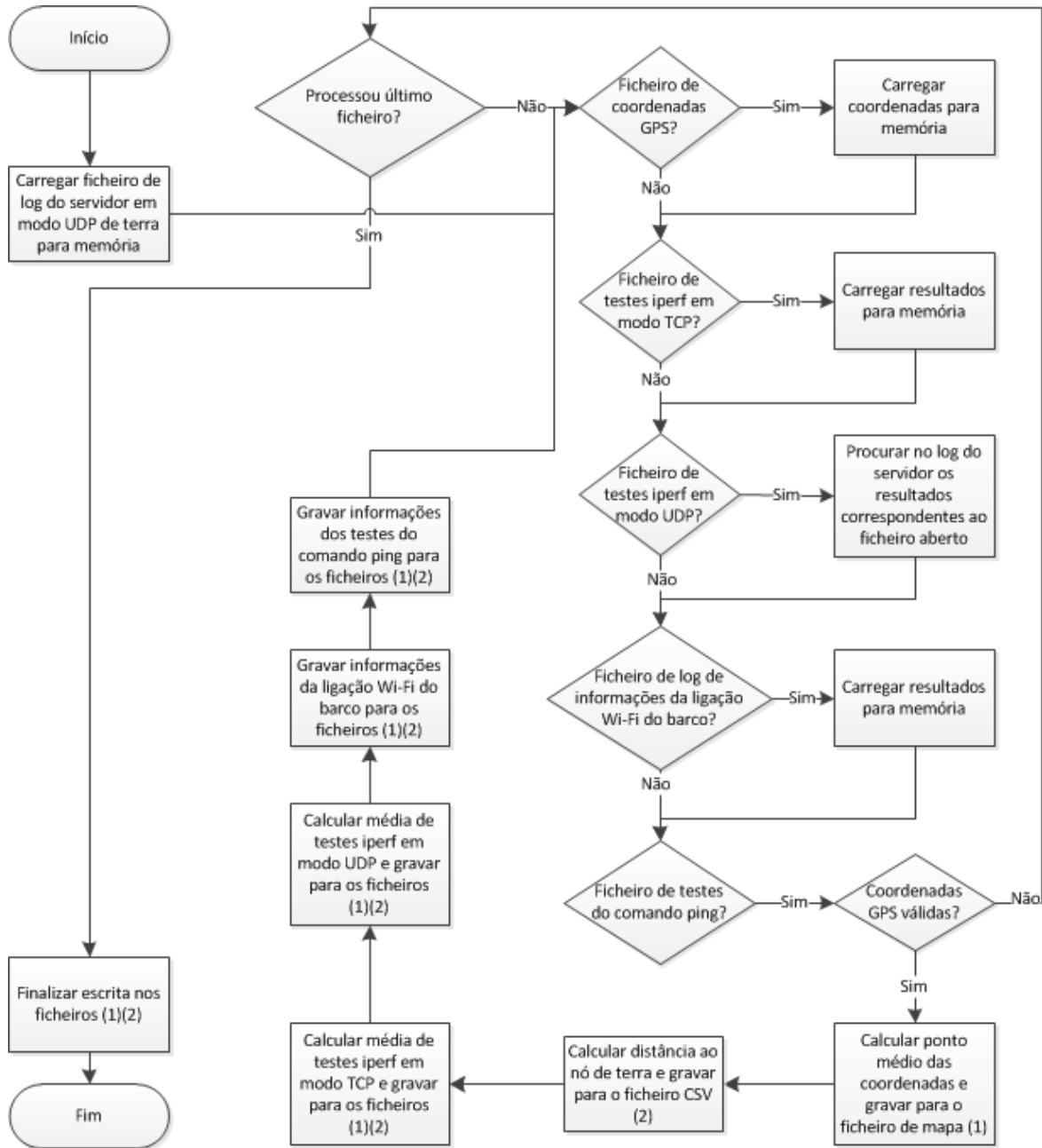


Figura 23 Fluxograma referente ao script de recolha de dados

Tendo em vista a facilidade no tratamento dos dados, foi elaborado um programa na linguagem de programação Java, partindo do fluxograma presente na Figura 24.



**Figura 24 Fluxograma referente ao processamento dos ficheiros com os resultados dos testes**

Este programa gera dois ficheiros, o ficheiro (1) de extensão KML (*Keyhole Markup Language*) e o ficheiro (2) de extensão CSV (*comma-separated values*). Um exemplo do conteúdo do ficheiro KML com 3 medições pode ser encontrado no Anexo E, aberto com o programa Google Earth. Relativamente ao ficheiro CSV, uma linha de exemplo

1500;4221238,011;4693718,802;1,312976744;20;20;-91;100;3,355

onde por ordem, separado por ponto e vírgula, temos:

- Distância ao nó de terra em metros;
- Média de débito gerado com iperf em modo TCP em bit por segundo;
- Média de débito gerado com iperf em modo UDP em bit por segundo;
- Média do *jitter* do débito gerado com iperf em modo UDP em milissegundos;
- Potência de transmissão de terra em dBm;
- Potência de transmissão do barco em dBm;
- Potência de sinal recebido no barco em dBm;
- Percentagem de pacotes recebidos na execução do ping;
- Média do RTT (Round-Trip Time) na execução do ping em milissegundos.

Finalmente, por uma questão de facilidade no acesso ao equipamento de terra, configurou-se um *router* e um acesso 3G e tendo em conta que a ligação de cada vez que era estabelecida, obtinha um novo IP público, foi necessário recorrer a um serviço gratuito de DNS (Domain Name System) dinâmico. Para tal funcionar, foi instalado o pacote `luci-app-ddns`, versão 0.11+svn9422-1.

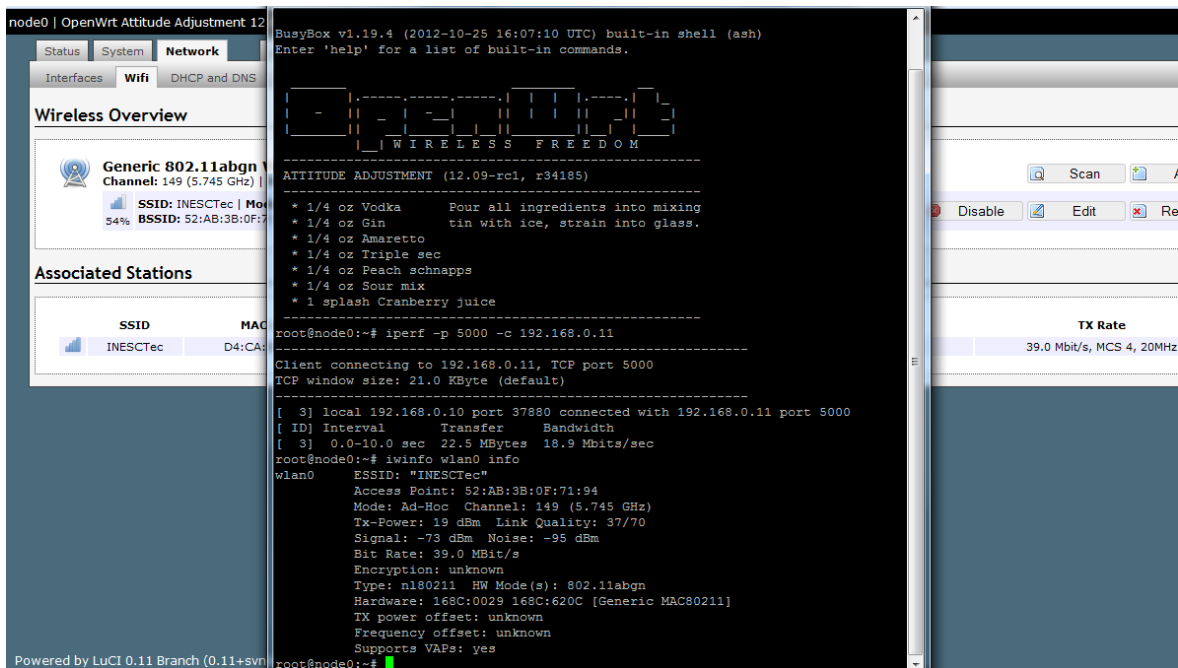
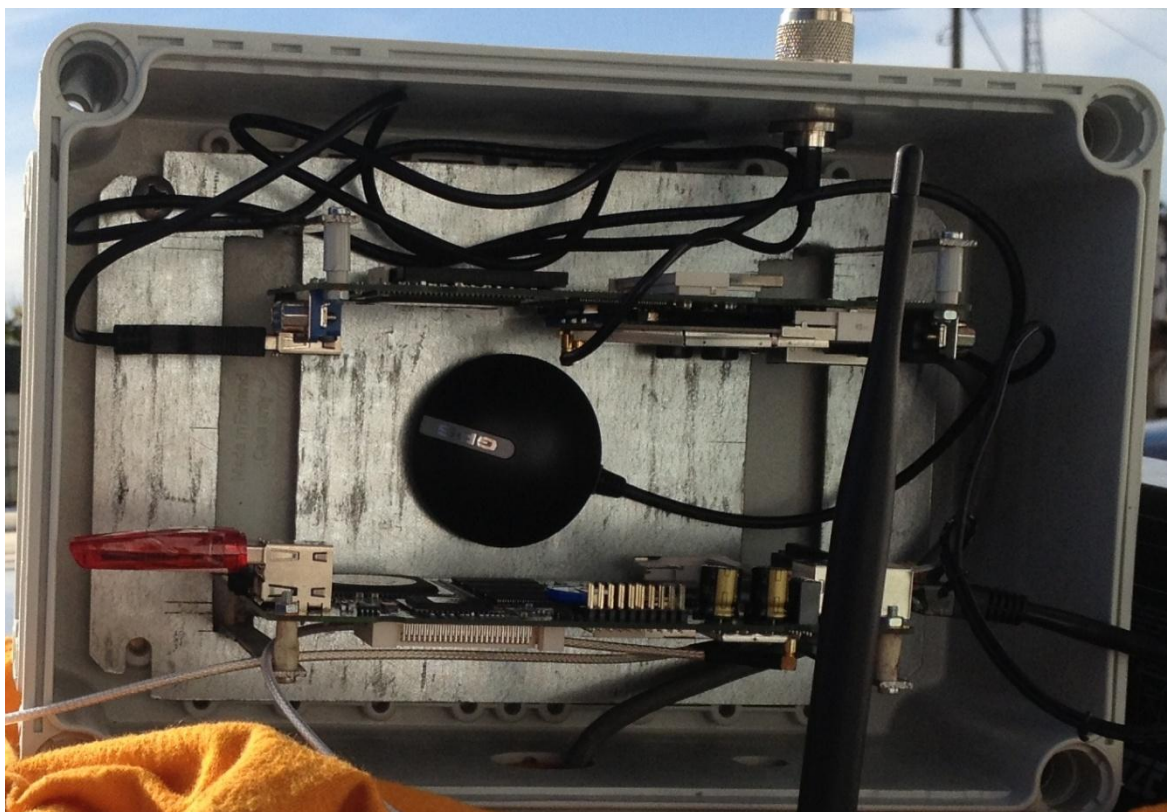


Figura 25 Screenshot do iperf e iwinfo

No Anexo D são mostrados os ficheiros de configuração da ligação Wi-Fi e de rede de cada um dos nós.

### 3.5. MONTAGEM DO EQUIPAMENTO

A fim de garantir que a experiência efetuada no âmbito desta tese pudesse ser realizada em conjunto com outra idêntica que utiliza a norma 802.11b/g na frequência dos 768 MHz, foi necessário adaptar uma caixa de forma a acomodar as duas placas, e a assegurar que a substituição de componentes fosse fácil, tal como mostra a Figura 26.



**Figura 26 Fixação das placas na caixa estanque**

Desta forma, a caixa depois de fechada pode ser montada em ambiente marítimo ou em terra, tendo o cuidado de proteger os conectores metálicos das condições atmosféricas mais adversas. Um exemplo de montagem encontra-se na Figura 27, estando a caixa fechada e pronta a funcionar em ambiente marítimo.



**Figura 27** Fixação caixa estanque em mastro

### **3.6. TESTES LABORATORIAIS EM AMBIENTE TERRESTRE**

Para a realização da primeira experiência fora do edifício em longa distância, o equipamento relativo ao nó fixo, que ficará em terra, foi montado numa caixa conforme se ilustra na Figura 28 e colocado para testes no terreno conforme a Figura 29.

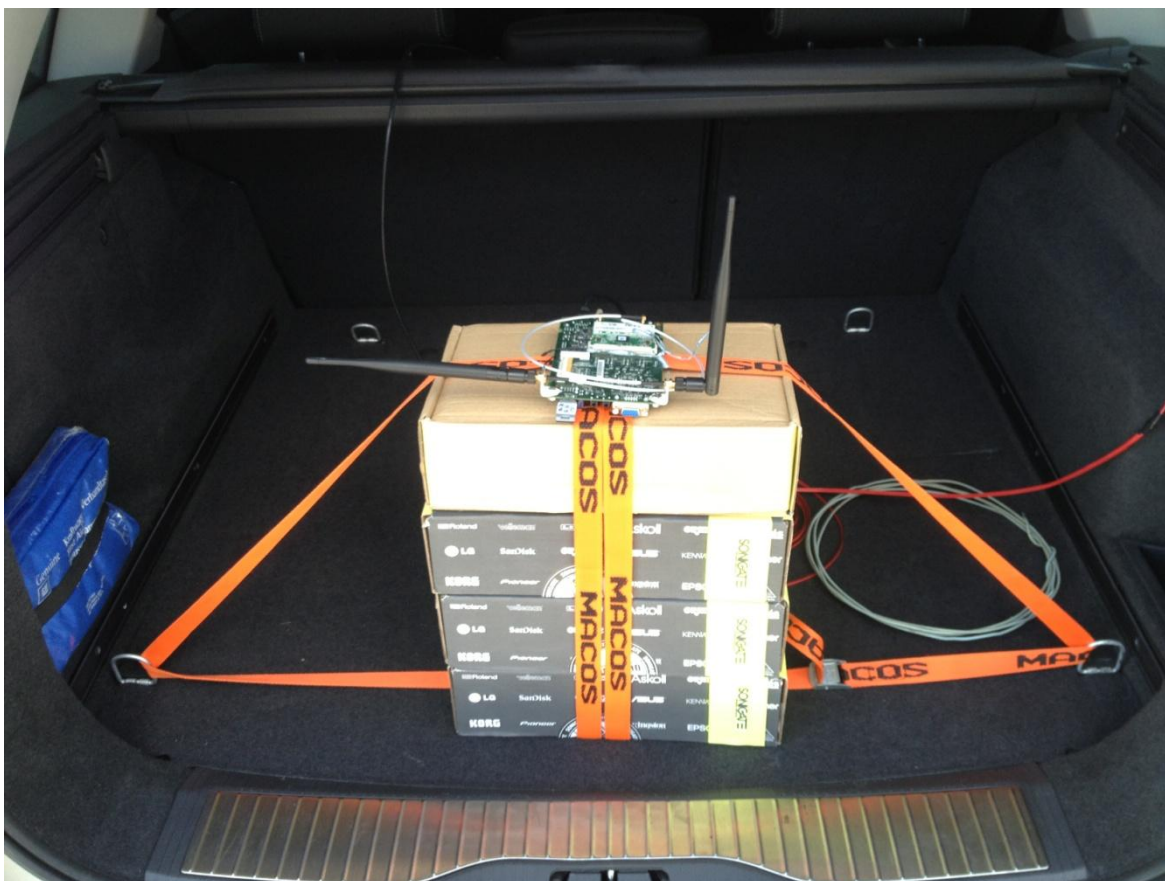


**Figura 28 Montagem do nó de terra**



**Figura 29 Colocação do nó de terra no terreno**

Para simular o nó do barco, o equipamento foi colocado na bagageira de um carro, conforme a Figura 30.



**Figura 30 Montagem do nó de barco na bagageira do carro**

Os testes realizados levaram aos resultados obtidos na Figura 25, sendo que as condições eram ideais para a propagação da frequência utilizada pois não existia nevoeiro ou chuva.

De seguida, para testar a robustez de todo o sistema, para detetar e corrigir falhas, foi colocado o nó de terra no topo do edifício do INESC TEC, no Porto, e outro nó numa viatura, onde ambos em termos de condições seriam uma aproximação aos locais onde seriam instalados em definitivo para as experiências no terreno.

Nesta fase foram testados os scripts, o que é executado no nó de terra e o que é executado no nó do barco, em que este último é executado em três locais distintos tal como se ilustra na Figura 31.



**Figura 31** Localizações dos equipamentos

Os testes foram realizados a partir dos 3 pontos referidos na Figura 31, em que a viatura era estacionada nesses locais, o equipamento era montado no tejadilho da viatura como demonstrado na Figura 32 e só depois o equipamento era ligado à alimentação para se realizarem os testes a partir de cada um desses locais. O nó de terra está sempre ligado no decorrer de todos os testes.



**Figura 32 Equipamento montado no tejadilho da viatura**

A distância, do ponto 1 ao edifício do INESC TEC é de cerca de 60 metros, do ponto 2 de 370 metros e do ponto 3 de 1275 metros.

Posteriormente foi montado na viatura o equipamento referente ao nó de barco, cuja antena foi montada de acordo com o demonstrado na Figura 33. Tal possibilitou testar a robustez de todo o sistema, pois o equipamento esteve ligado durante toda a viagem de passagem pelos 3 pontos definidos na Figura 31 em vez de ligar o equipamento apenas nesses 3 pontos. Dessa forma, o equipamento estaria sujeito a perdas de conectividade em espaços de tempo variáveis devido a obstruções de linha de vista ou a inclinação da antena impedir que o ganho dela fosse o necessário para comunicar ou até detetar sinal. Em cada um desses três pontos a viatura esteve parada não só para realizar os testes de Wi-Fi nos 5,8 GHz, sobre a qual se debruça esta tese, como também se realizaram testes com outro equipamento nos 768 MHz, relativa a outra tese.



**Figura 33 Montagem de antena omnidirecional na viatura**

Na Figura 34 é apresentada a montagem do equipamento referente ao nó de terra no topo do edifício do INESC TEC que ficou ligado durante a realização destes testes.



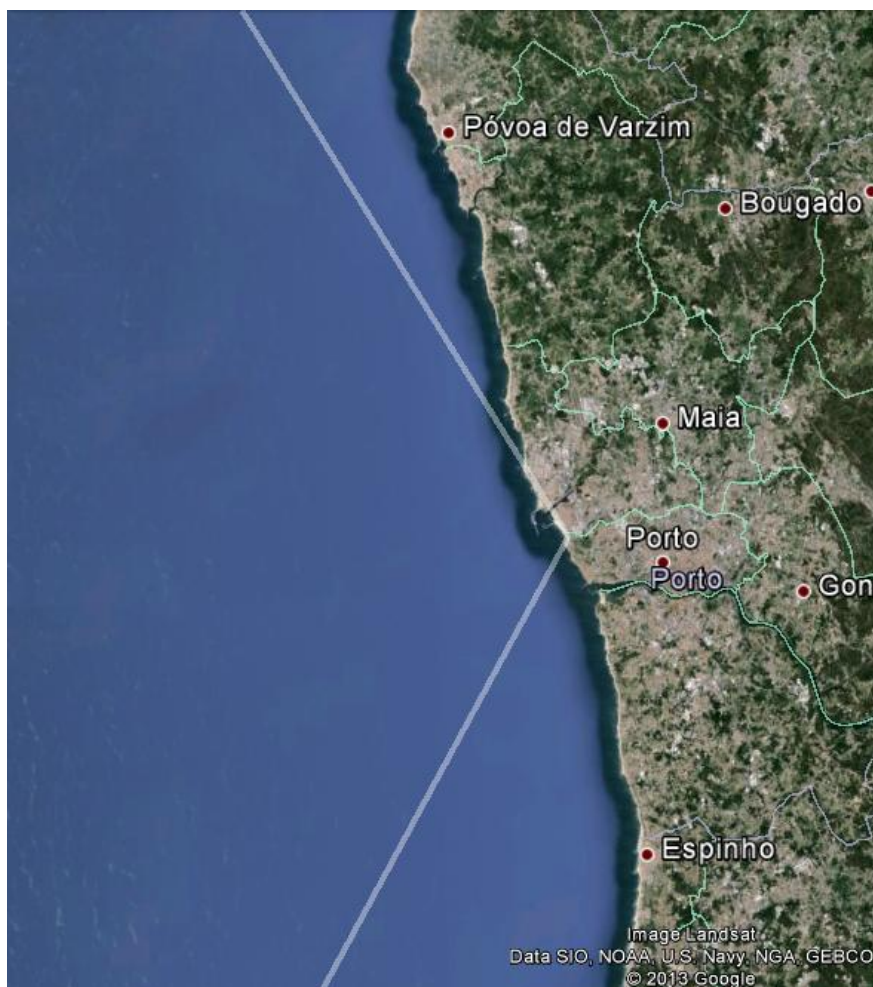
**Figura 34 Montagem da caixa e antena sectorial**

Finalmente, foi montado o equipamento no cenário de testes definitivo, onde foi utilizado o equipamento referente ao nó de terra no topo do Edifício Transparente, como demonstrado na Figura 35.



**Figura 35 Montagem do nó de terra no topo do edifício transparente**

A antena sectorial foi montada com orientação a  $270^\circ$  oeste, de forma a cobrir praticamente toda a linha de costa da região do Porto, pois este é um dos locais onde se prevê que o barco de pesca vá navegar. A antena tem  $120^\circ$  de abertura, tendo  $-6$  dB em relação ao ganho máximo de  $16$  dBi no pior caso, o que permite que de acordo com a instalação feita, a antena tenha um ganho máximo de  $10$  dBi na orientação  $210^\circ$  sudoeste e  $330^\circ$  noroeste, tal como demonstrado na Figura 36 pelas duas linhas brancas.



**Figura 36** Abertura da antena montada em terra a -6 dB

O equipamento foi alimentado por um conversor AC/DC PoE (Power over Ethernet) com saída a 18 V DC, sendo este alimentado pelo edifício. Tendo em conta o calor, além da parte transparente das caixas ter sido tapada, instalou-se um relógio elétrico para ligar o equipamento por volta das 21h30 e desligar por volta das 12h30, pois o barco sai para pescar à noite, não havendo necessidade deste estar ligado fora desse horário.

De modo a permitir acesso remoto a este nó, foi instalado um *router* que fornecia acesso à Internet via 3G e, recorrendo ao NAT (Network Address Translation), foi possível aceder ao serviço SSH e ao portal HTTP (Hypertext Transfer Protocol) disponíveis no nó de terra. Este *router* ficou configurado como ponto de acesso Wi-Fi nos 2,4 GHz.

No barco foi montado o respetivo nó, conforme se ilustra na Figura 37, onde foi utilizada a antena omnidirecional, que se encontra montada abaixo da antena dos 768 MHz

relativa à experiência da outra Tese e a caixa com o equipamento ativo fixa na base do mastro onde as antenas estão fixadas. De salientar que o diagrama de radiação desta antena sofre alterações nas duas polarizações no plano horizontal, sendo que o mastro onde a antena está montada ofuscará o sinal emitido/recebido quando este se encontra a bloquear a linha de vista com a antena de terra.

O equipamento foi alimentado a 12V DC presente a bordo, apenas disponível quando o barco estava em manutenção ou em operação.



**Figura 37** Montagem do nó de barco



# 4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

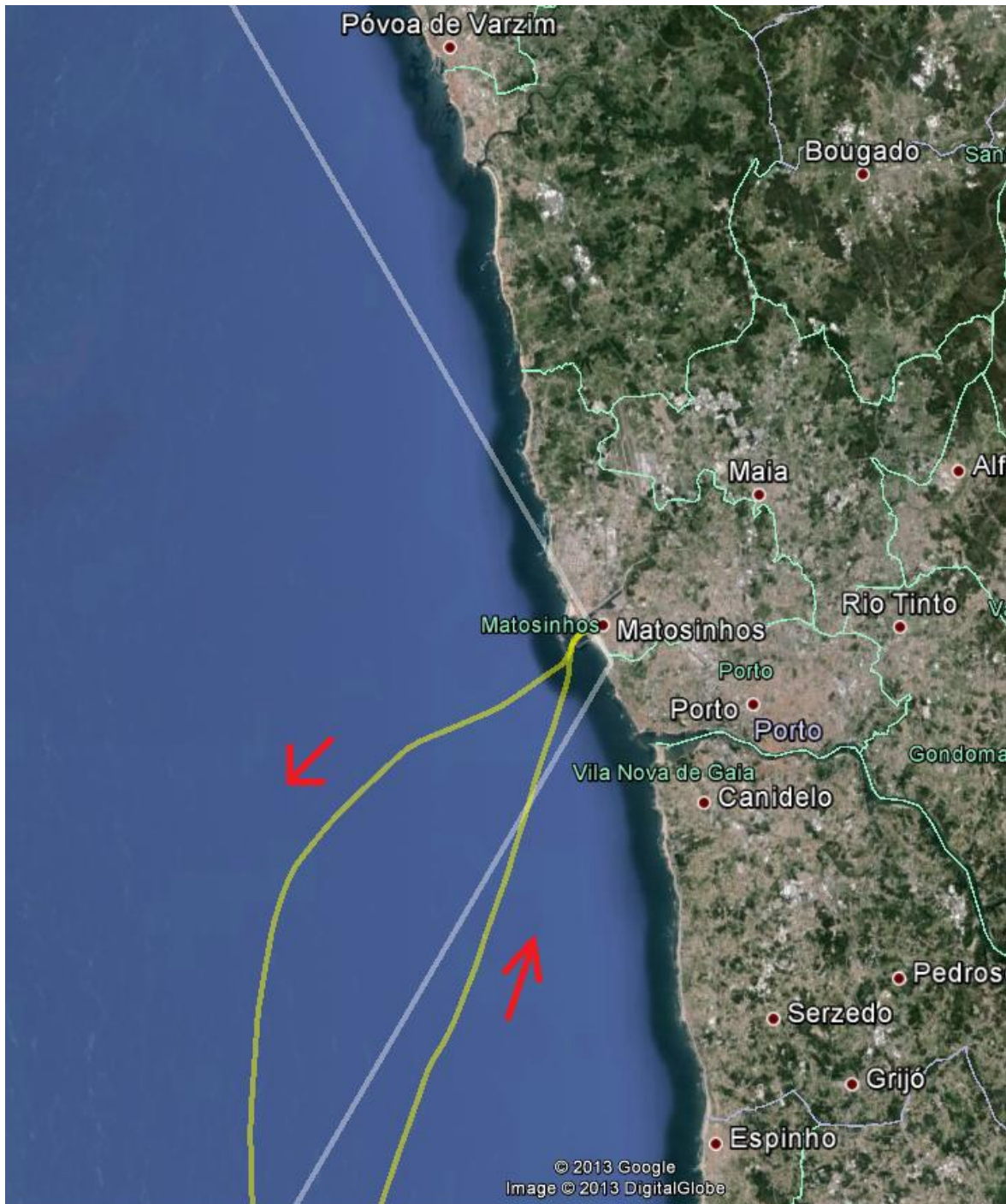
Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos em ambiente marítimo para comunicações Wi-Fi na banda dos 5,8 GHz entre a embarcação e a estação em terra.

## **4.1. EMBARCAÇÃO DE PESCA AO LARGO DO PORTO**

De modo a aproximar a experiência do ambiente real, utilizou-se um barco de pesca durante a sua atividade e sem qualquer restrição de percurso, em que o equipamento realizou o conjunto de testes definidos e registou os respetivos resultados. Na Figura 38 está marcado a amarelo o percurso seguido pela embarcação que deu origem aos resultados mostrados mais à frente.

### **4.1.1. CONDIÇÕES DE TESTE**

O barco de pesca abandonou o porto de Matosinhos por volta das 03:00 e regressou por volta das 09:22, hora local.

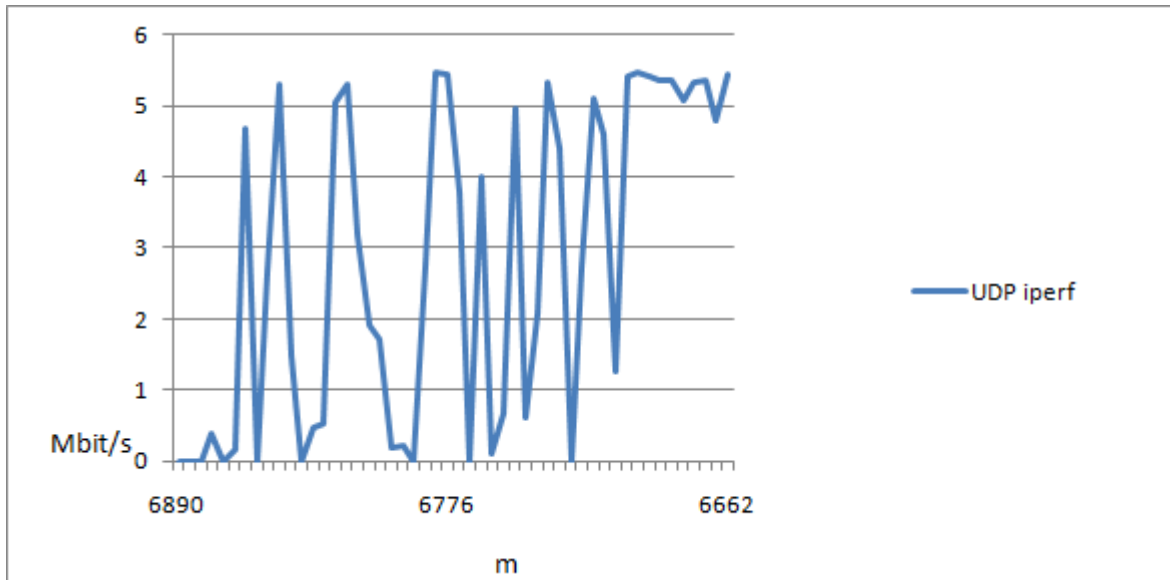


**Figura 38** Percurso do barco de pesca

De acordo com a informação recolhida no portal WindGURU [32], durante o período de tempo e na zona onde o barco navegou, não choveu, a ondulação esteve inicialmente nos 0,8 metros, tendo decrescido para 0,7 metros durante a madrugada. O período da vaga esteve estável nos 5 segundos durante a experiência, a temperatura ambiente medida na costa esteve em torno dos 10° C e surgiu nebulosidade no regresso, sendo cerca de 9% a 15%.

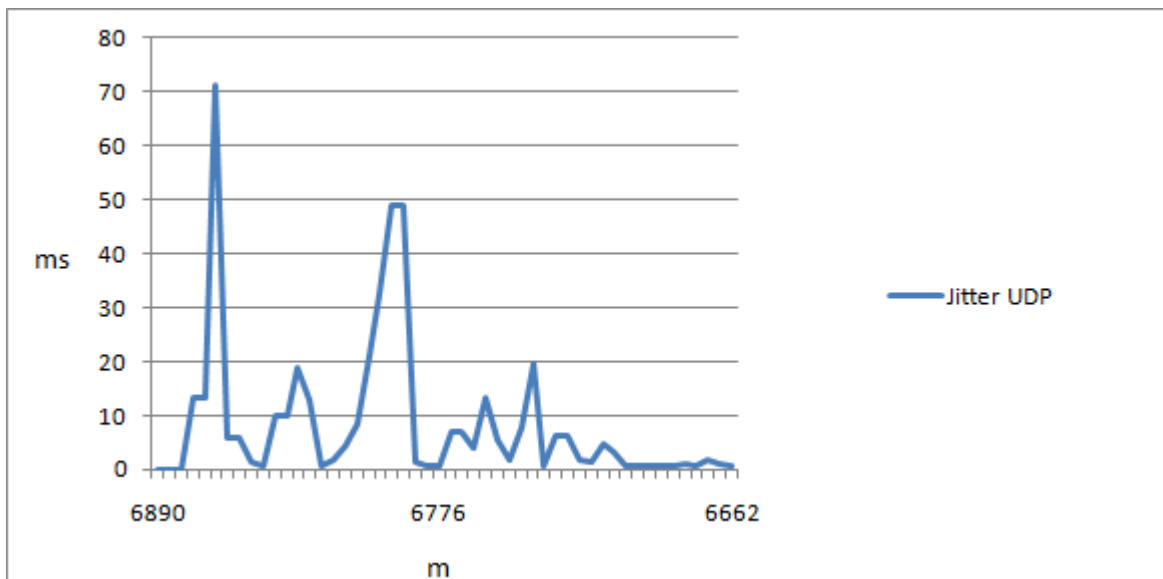
#### 4.1.2. INFORMAÇÃO RECOLHIDA NOS TESTES

De seguida na Figura 39, Figura 40, Figura 41 e na Figura 42 são mostrados os gráficos relativos a um intervalo de distâncias, em que o barco está de regresso ao porto, onde as condições de comunicação estão instáveis. Estes gráficos foram criados apenas com base nos dados recolhidos pelo script.



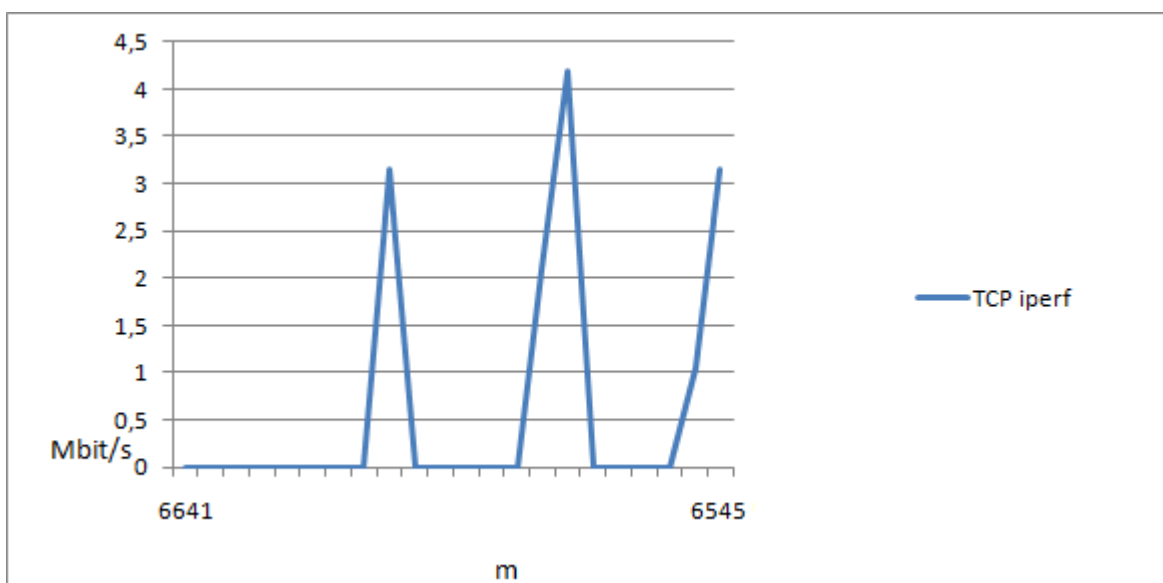
**Figura 39 Débito em modo UDP em função da distância no regresso**

Na Figura 39 podemos observar o gráfico relativo ao débito instantâneo em modo UDP na viagem de regresso. Na aproximação o débito é baixo pois apenas algumas tramas ao nível físico chegam ao destino ou cuja confirmação de chegada é recebida no barco, tendo algumas delas sido retransmitidas como se verifica pela análise do gráfico presente na Figura 40. Isso acontece devido ao facto de a agitação marítima alterar constantemente a posição do barco e consequentemente a antena de barco perder a conectividade com a antena de terra devido à baixa abertura que esta tem no plano vertical.



**Figura 40 Jitter em função da distância no regresso**

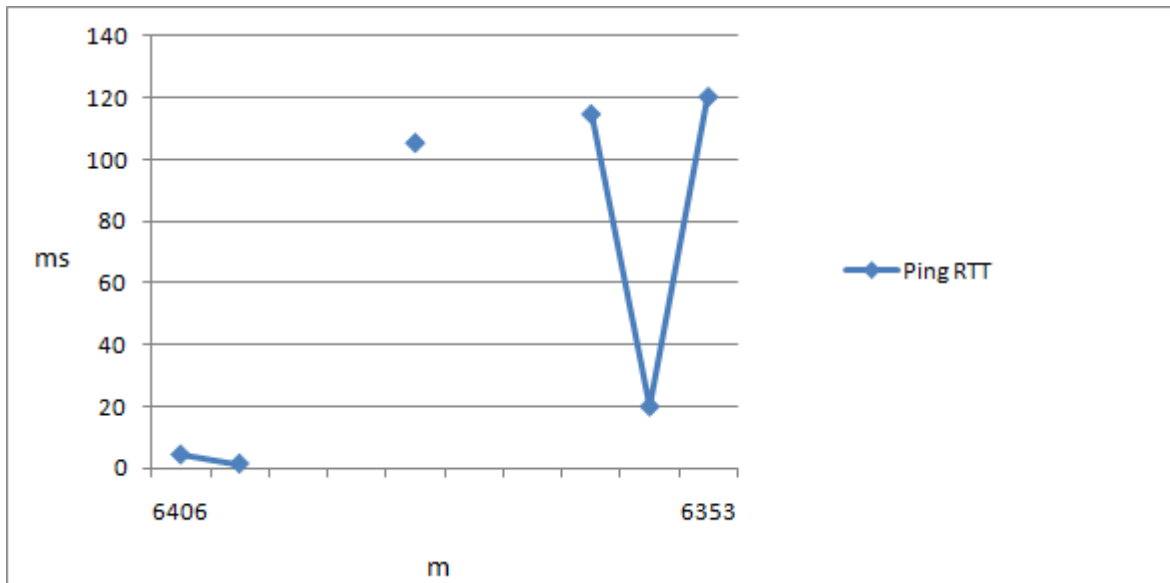
Na Figura 40 podemos observar o gráfico relativo ao *jitter* instantâneo na entrega de pacotes UDP no regresso. Aqui verifica-se a tendência para uma estabilização das comunicações quando mais perto de costa, tal como é ilustrado na Figura 39.



**Figura 41 Débito em modo TCP em função da distância no regresso**

Na Figura 41 podemos observar o gráfico relativo ao débito TCP no regresso. Como neste caso é necessário confirmar a entrega de pacotes, o débito resultante é nulo ou bastante baixo pois apenas alguns pacotes foram entregues e a confirmação da receção foi recebida pelo emissor. Mais uma vez, isto acontece devido ao facto de a agitação marítima

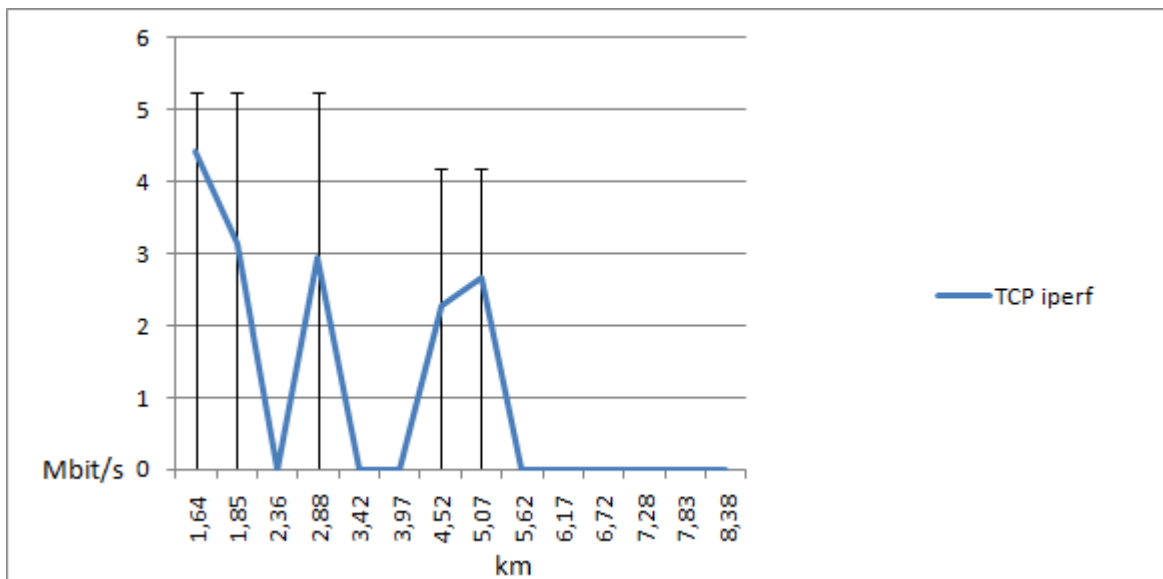
alterar constantemente a posição do barco e consequentemente a antena de barco perder a conectividade com a antena de terra devido à baixa abertura que esta tem no plano vertical.



**Figura 42 Tempo de ida e volta ao nó de terra em função da distância no regresso**

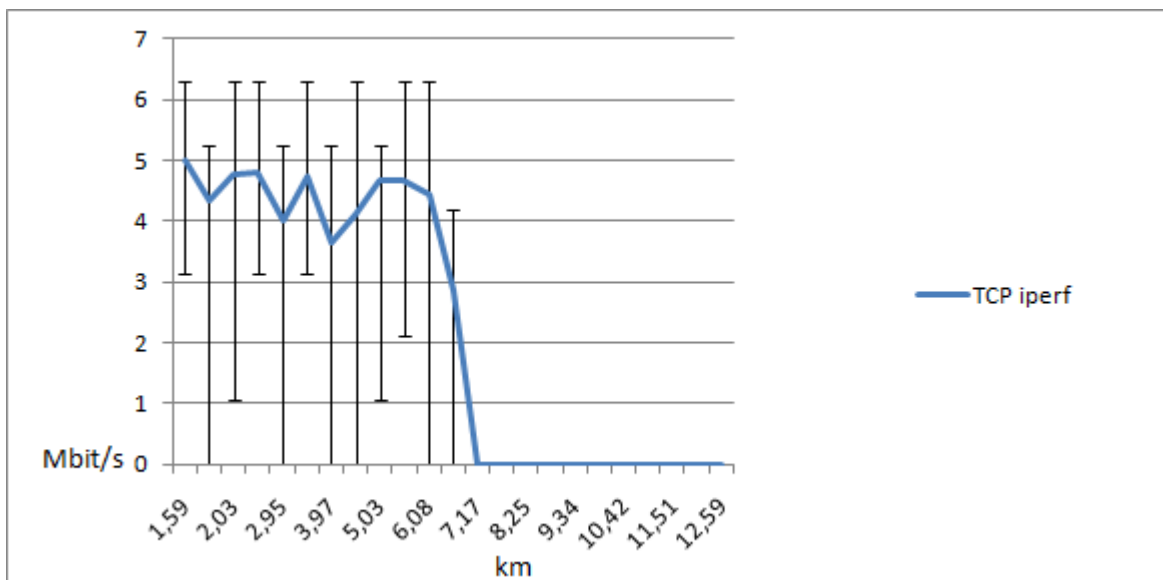
Na Figura 42 podemos observar o gráfico relativo ao RTT no regresso. Apenas 6 pacotes, de 10, são entregues, tendo chegado metade deles com um atraso bastante significativo, o que indicia mais uma vez um aumento de retransmissões ao nível físico devido à instabilidade da ligação neste conjunto de distâncias.

De seguida são apresentados os gráficos relativos às informações recolhidas, sendo a Figura 43, a Figura 45, a Figura 47, a Figura 49, a Figura 51 e a Figura 53 relativas à saída do porto. Relativamente ao regresso, temos a Figura 44, a Figura 46, a Figura 48, Figura 50, Figura 52 e a Figura 54. Estes gráficos foram criados com base nos dados recolhidos pelo script, agrupando os intervalos de distâncias mais significativos da experiência. Cada ponto corresponde a um intervalo de distâncias, que contém o valor médio, valor mínimo e máximo obtido, exceto a Figura 51 e a Figura 52.



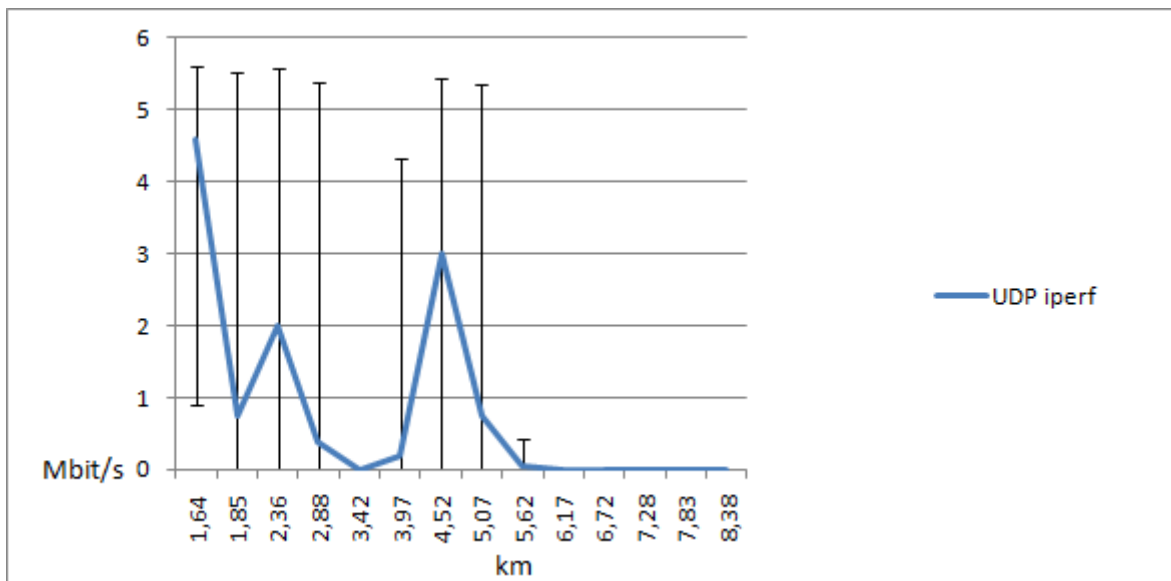
**Figura 43 Média de débitos em modo TCP em função da distância na saída**

Na Figura 43 podemos observar o gráfico relativo às médias de débitos TCP na saída, ocorrendo uma forte oscilação no débito. Confrontando com o gráfico apresentado na Figura 53, esta variação é motivada pelo facto de o sinal detetado estar próximo da sensibilidade da placa Wi-Fi e a constante agitação marítima provocar perdas momentâneas de ligação.



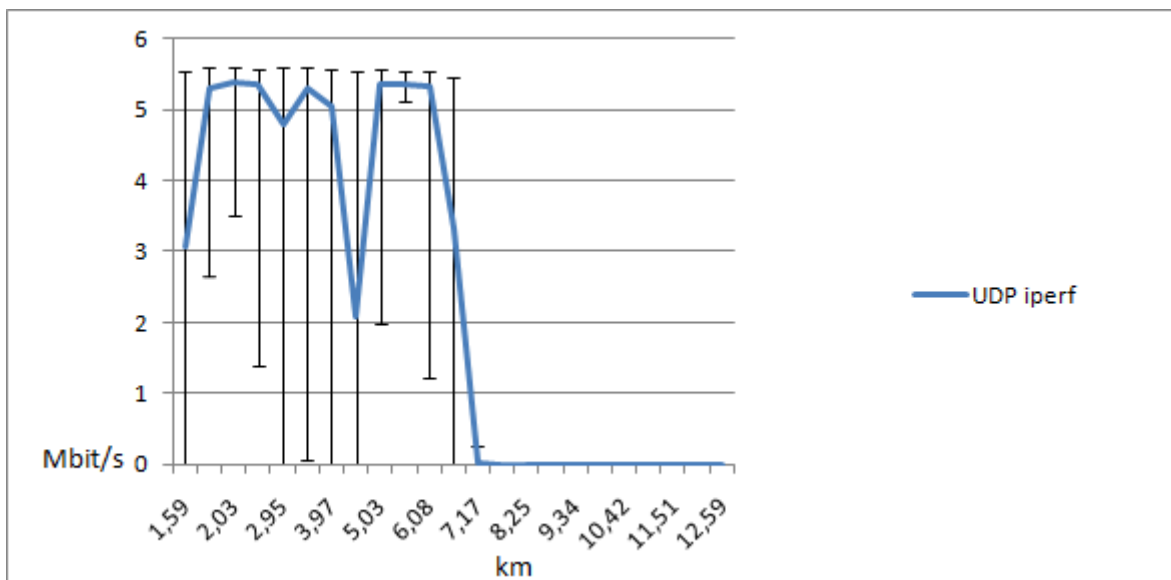
**Figura 44 Média de débitos em modo TCP em função da distância no regresso**

Na Figura 44 podemos observar o gráfico relativo à média de débitos TCP no regresso, ocorrendo uma ligeira oscilação no débito, estando próximo do débito máximo possível.

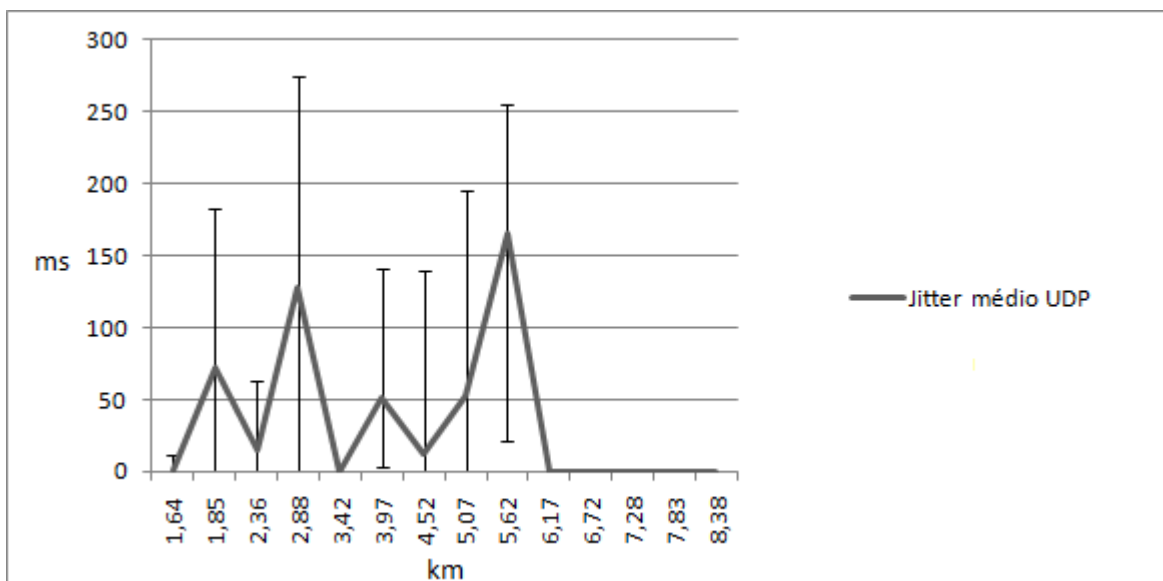


**Figura 45 Média de débitos em modo UDP em função da distância na saída**

Na Figura 45 e na Figura 46 observa-se a mesma tendência de instabilidade na saída e estabilidade no regresso, tal como verificado na Figura 43 e na Figura 44 respetivamente. No regresso, por volta dos 5 km, ocorre uma alteração momentânea no tráfego UDP recebido, motivado por uma quebra momentânea de sinal durante a geração deste tipo de tráfego.

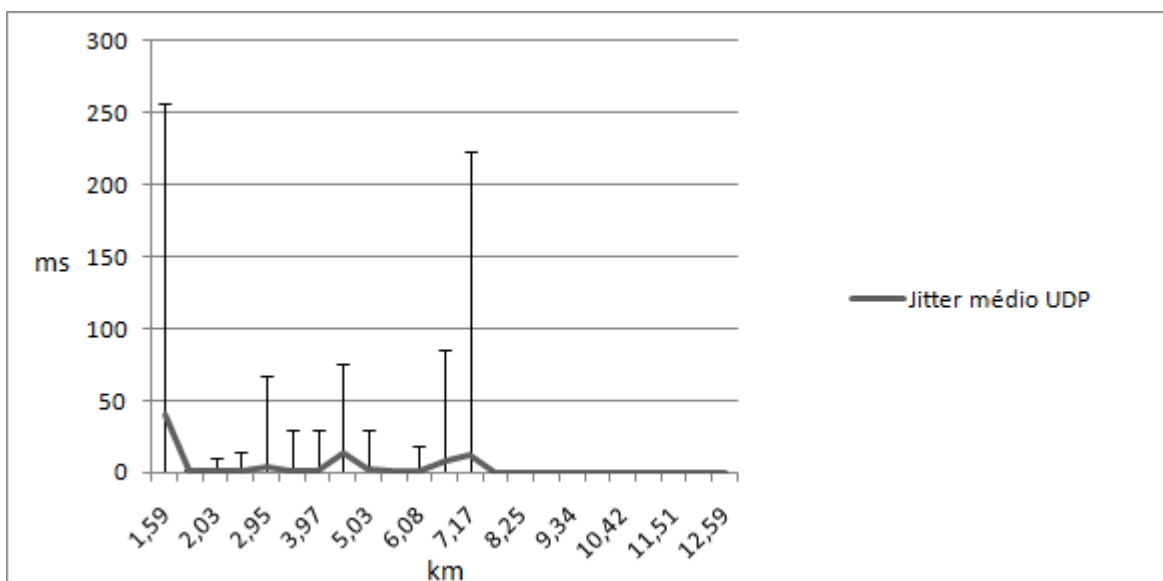


**Figura 46 Média de débitos em modo UDP em função da distância no regresso**



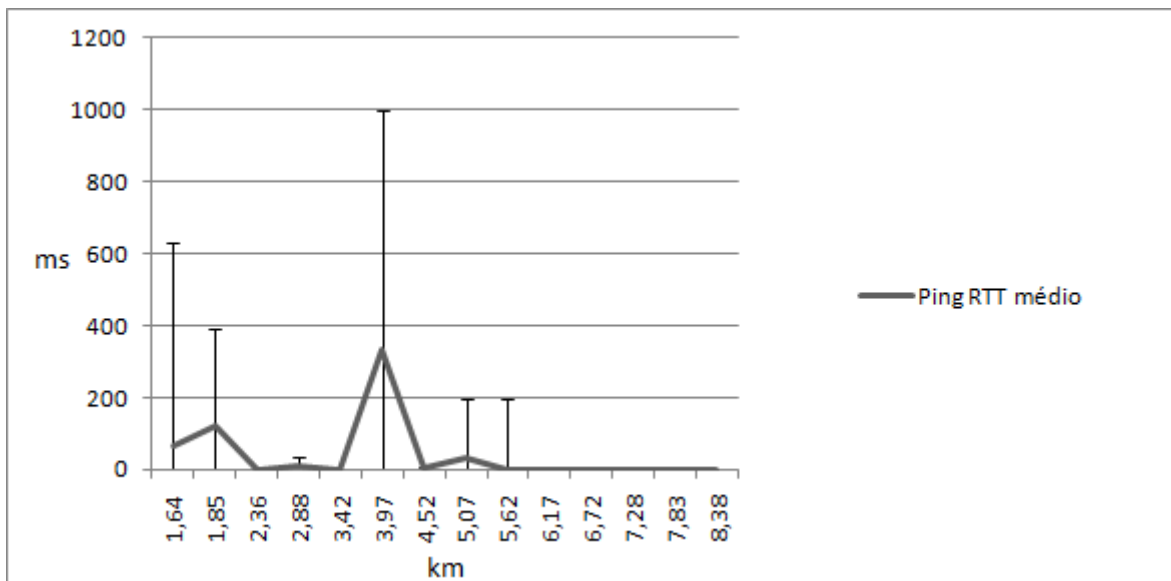
**Figura 47 Média de tempos de jitter em função da distância na saída**

Na Figura 47 demonstra-se o gráfico relativo ao *jitter* médio na geração de pacotes UDP. Os valores são elevados, o que indicia que estão a ocorrer retransmissões devido à instabilidade da ligação Wi-Fi. Tal é observado na Figura 53 pela proximidade do sinal em relação à sensibilidade da placa Wi-Fi.



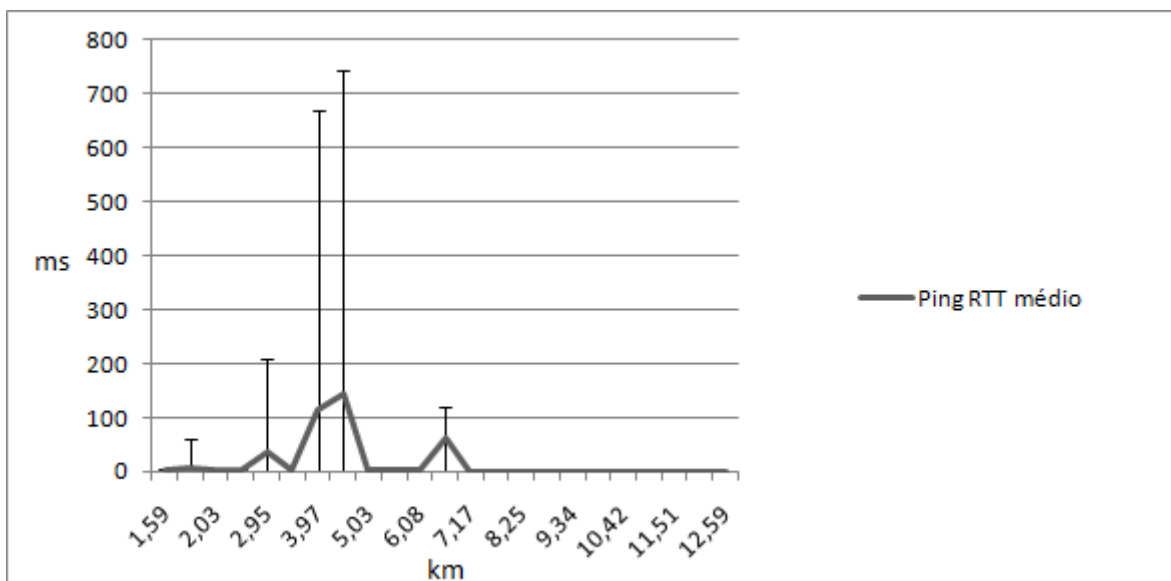
**Figura 48 Média de tempos de jitter em função da distância no regresso**

A Figura 48 é referente ao regresso, cujo valor médio se mantém relativamente baixo, ocorrendo um pico junto à costa devido ao forte impacto que a ondulação tem no barco para esta distância de comunicação, durante a execução deste teste.



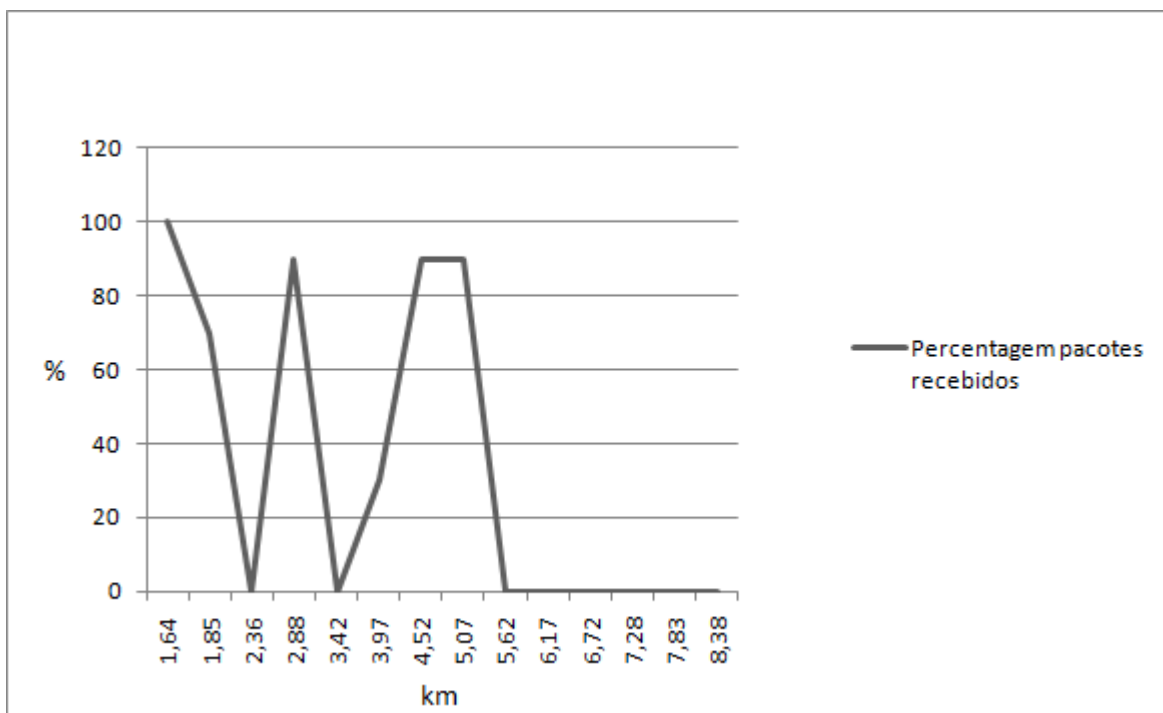
**Figura 49 Média de tempos de RTT em função da distância na saída**

Na Figura 49 ilustra-se o gráfico relativo ao RTT médio na saída. Tal como na Figura 47, aqui se evidencia a instabilidade das comunicações verificada neste percurso.



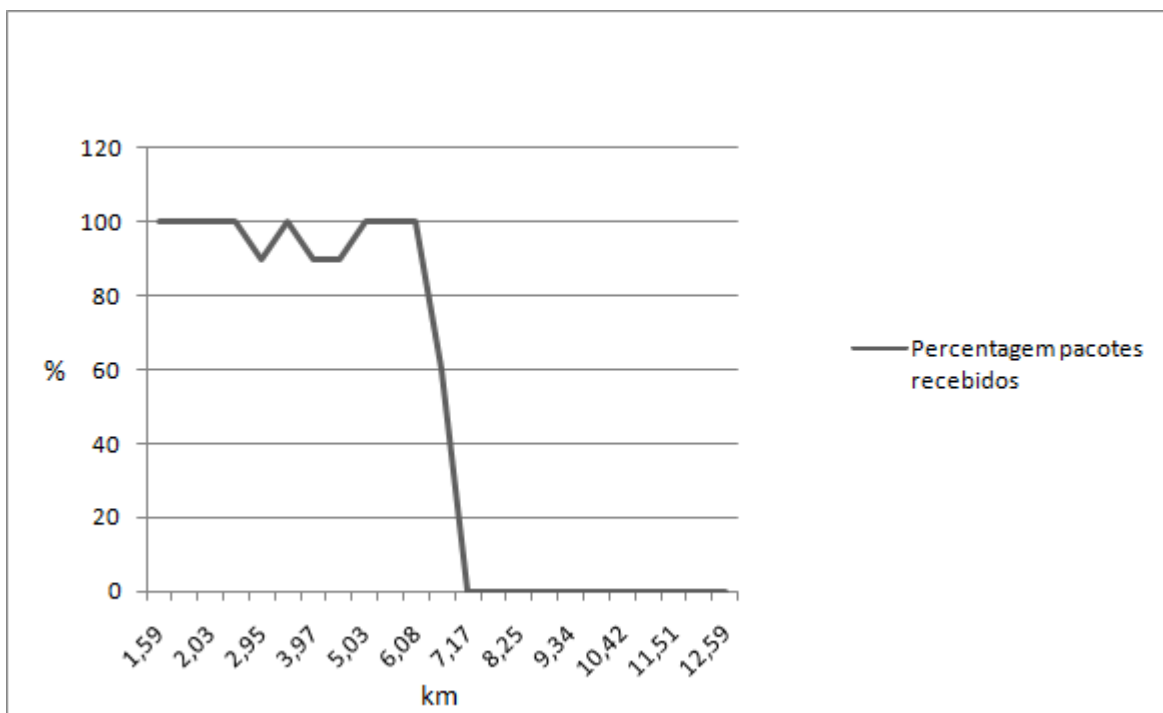
**Figura 50 Média de tempos de RTT em função da distância no regresso**

Na Figura 50 encontra-se o gráfico relativo ao RTT no regresso. Os valores são geralmente baixos, ocorrendo momentaneamente uns picos que denunciam retransmissões. Este teste é realizado após a conclusão da geração de tráfego UDP e que de acordo com a Figura 46, para a mesma distância, mostra que o débito foi menor, motivado por uma perda momentânea de sinal.



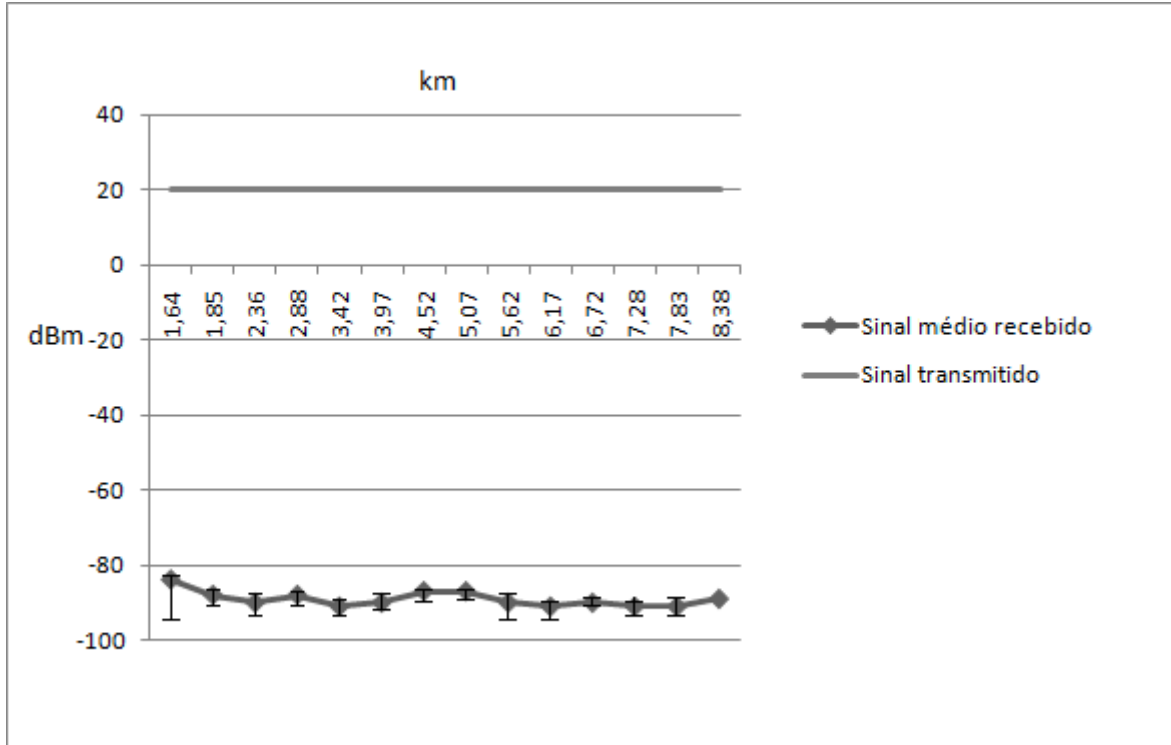
**Figura 51 Percentagem de pacotes recebidos em função da distância na saída**

Na Figura 51 podemos observar o gráfico relativo à percentagem de pacotes recebidos na saída. Tal como já observado na Figura 43 e na Figura 45, a instabilidade verificada é reforçada com a fraca percentagem de pacotes recebidos, tendo sido de 100% apenas quando o barco se encontrava junto ao porto.



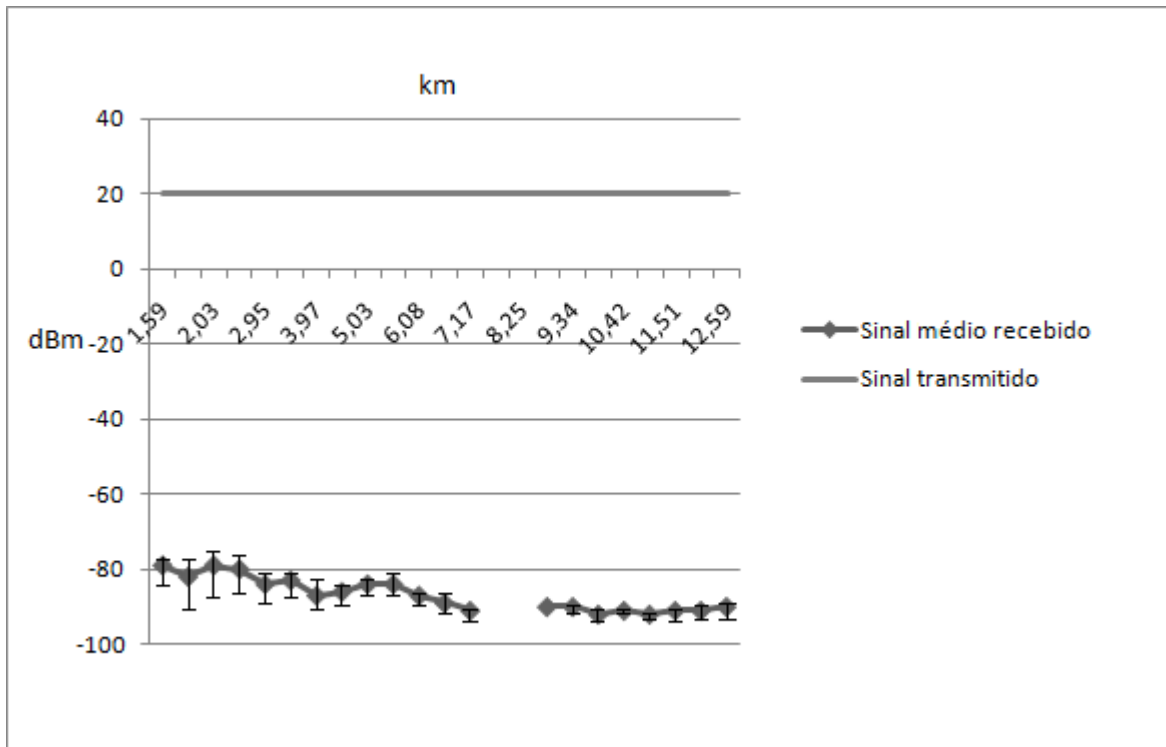
**Figura 52 Percentagem de pacotes recebidos em função da distância no regresso**

Na Figura 52 podemos observar o gráfico relativo à percentagem de pacotes recebidos no regresso. O gráfico denuncia uma ligação estável no decorrer deste teste, tendo-se perdido alguns pacotes até cerca dos 7 km de distância, onde deixou de ser possível ocorrerem comunicações.



**Figura 53 Potência de sinal enviado de terra e recebido no barco em função da distância na saída**

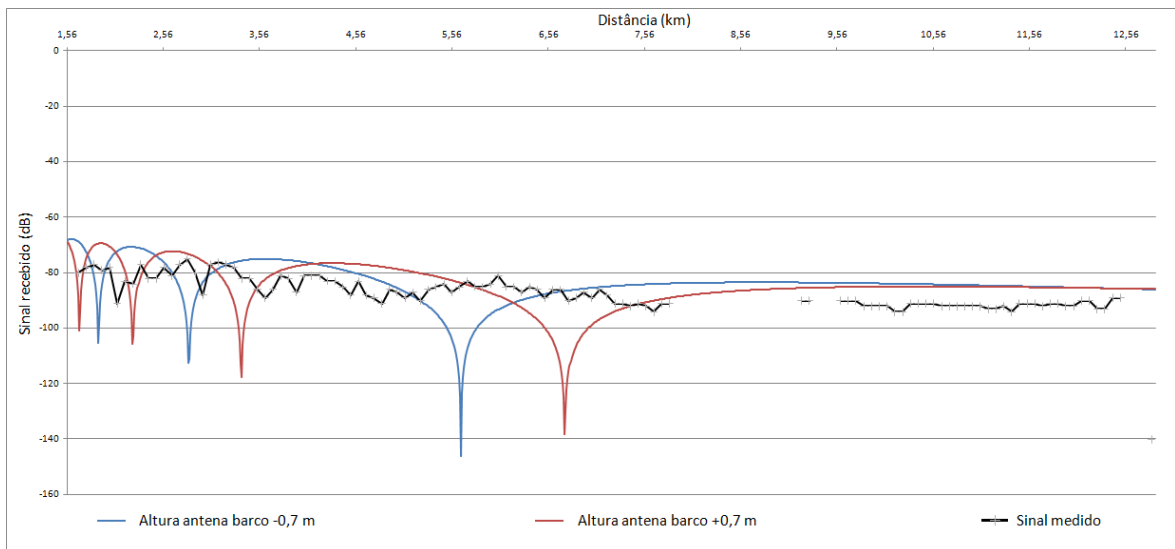
Na Figura 53 podemos observar o gráfico relativo à potência de sinal recebido na placa Wi-Fi do barco e potência de sinal emitida de terra durante a saída. A potência de sinal recebida é baixa pois o trajeto descrito pelo barco na saída faz com que o mastro do barco, que é de ferro, não permita linha de vista entre a antena do barco e a de terra e atenua o sinal.



**Figura 54 Potência de sinal enviado de terra e recebido no barco em função da distância no regresso**

Na Figura 54 podemos observar o gráfico relativo à potência de sinal recebido na placa Wi-Fi do barco e potência de sinal emitida, tanto de terra, como do barco durante o regresso. As potências de sinal de transmissão são iguais nos dois casos, sendo de 20 dBm durante o trajeto de regresso. Como existe linha de vista entre as antenas de terra e de barco, o sinal recebido está dentro do esperado, dependendo da altura a que o barco se encontra do nível do mar, como mostrado na Figura 55.

Na Figura 55 são mostradas as intensidades de sinal que se espera receber caso o barco esteja 0,7 metros mais baixo ou mais alto que o considerado na Figura 17 e o respetivo sinal recebido que foi medido durante os testes em função da distância.



**Figura 55 Modelo de 2 raios ajustado à ondulação e respetivo sinal medido no regresso**

O sinal deixa de ser detetado a partir de cerca dos 12,5 km, muito próximo dos 14 km calculados no subcapítulo 3.3.2. À medida que o barco se aproxima de terra, a intensidade do sinal recebido não segue nenhuma das curvas calculadas, pois em cada medida amostrada, considerou-se que o barco está dentro do intervalo de -0,7 metros a 0,7 metros de altura em relação ao nível da água. Uma análise mais precisa deste valor requeria um recetor GPS com uma precisão superior devendo, no entanto, deve ser objeto de trabalho futuro.

#### 4.1.3. CONCLUSÕES

A partir dos resultados experimentais obtidos foi possível perceber que a agitação marítima, por mínima que seja, se traduz numa quebra momentânea no serviço. Quando o barco está afastado a distâncias superiores a 6.5 km do nó de terra no regresso, oscila entre 0.7 metros e -0.7 metros, durando 2.5 segundos, fazendo com que a antena esteja alinhada para terra com o ganho máximo e as condições de comunicação serem ótimas mas no instante de tempo seguinte a antena desalinhar e o sinal degradar-se, traduzindo-se numa redução da qualidade do serviço ou levando mesmo à interrupção das comunicações.

Esta distância diminui para cerca de 5 km quando o barco sai para a pesca, pois a colocação da antena omnidirecional no barco impede que nesta situação tenha linha de vista para com a estação de terra pois encontra-se parcialmente ou totalmente obstruída pelo mastro onde esta se encontra fixa, que é de ferro.

Na situação de saída e abaixo dos 5 km nota-se alguma instabilidade nas comunicações, devido ao oscilar dos débitos TCP e UDP, perda de pacotes e oscilações elevadas nos tempos RTT e de *jitter*, face aos resultados obtidos no regresso, onde mais uma vez o mastro está a influenciar os resultados.

Tendo em conta que existem navios em circulação na zona onde decorreram os testes, a ausência de sinal dos 7430 metros aos 8596 metros e dos 9054 metros aos 9122 metros é fortemente motivada pelo movimento de um navio, pois o sinal é bloqueado ou atenuado o suficiente para que não seja detetado.

Finalizando, o principal objetivo da presente tese foi atingido pois verificou-se que a ligação Wi-Fi em ambiente marítimo é viável até cerca de 7 km da linha de costa, nas referidas condições.

## **4.2. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL AO LARGO DE SESIMBRA**

Surgiu uma oportunidade de realizar testes noutra local, cujas condições eram um pouco diferentes das abordadas nas duas secções anteriores, em conjunto com a Marinha Portuguesa e a unidade de robótica do INESC TEC.

Os testes decorreram ao largo da costa de Sesimbra, a cerca de 1,5 km da praia.

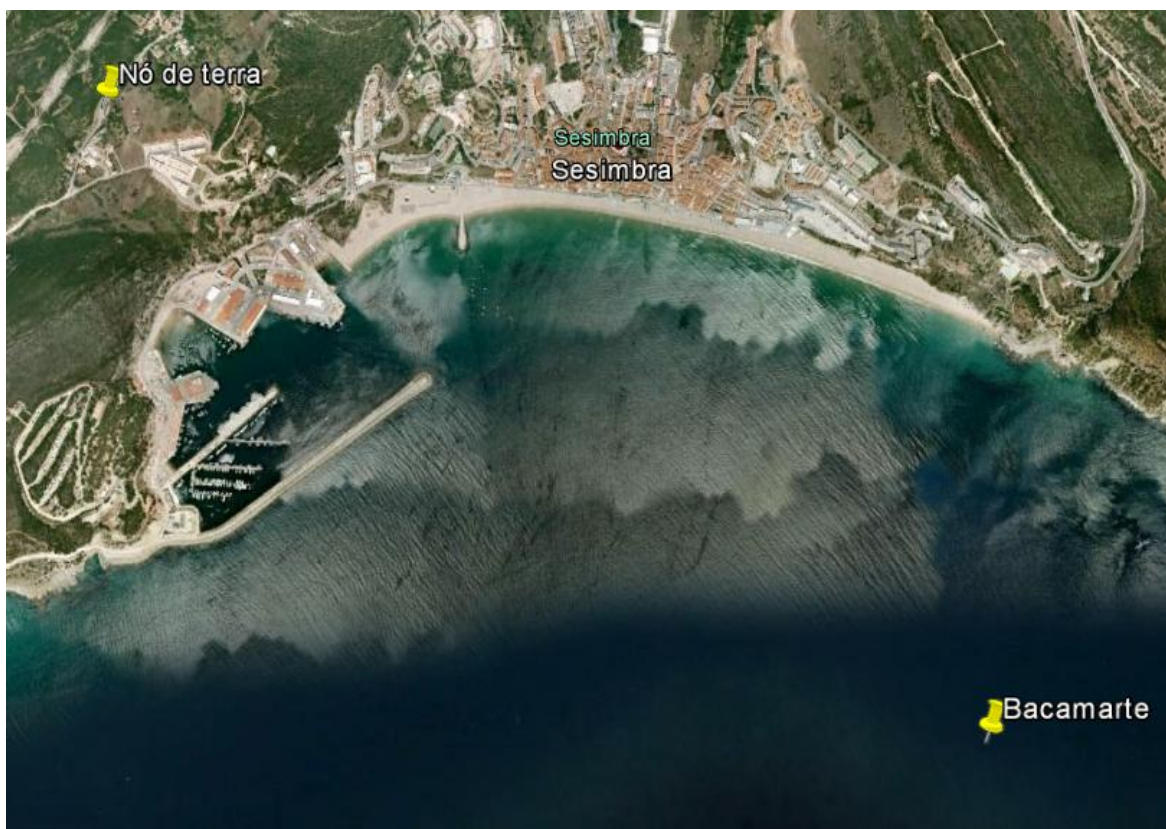


Figura 56 Posição do nó de terra e do nó de barco em Sesimbra

#### 4.2.1. CONDIÇÕES

De acordo com a informação recolhida no portal WindGURU [32], durante o período de tempo e na zona onde o barco esteve ancorado, não choveu nem estava nevoeiro, a ondulação esteve em torno dos 1,9 metros, o período da vaga esteve estável nos 8 segundos, a temperatura ambiente medida na costa esteve em torno dos 33° C.

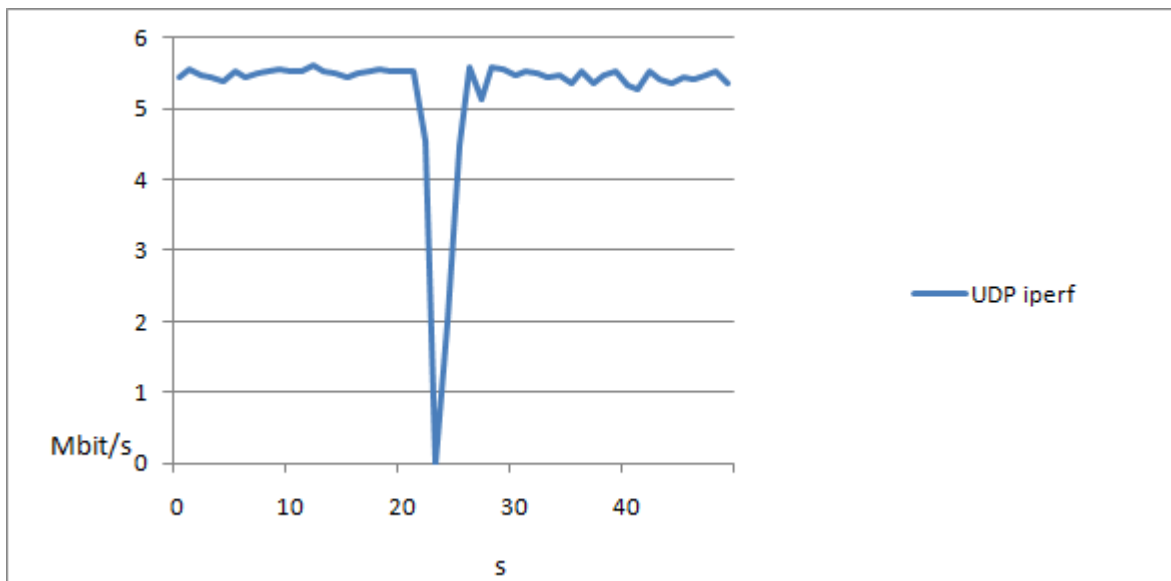
O equipamento ficou com as configurações da primeira experiência, apenas tendo sido incluídas as configurações nas tabelas de encaminhamento dos nós de barco e de terra a fim de encaminhar o tráfego gerado numa câmara IP instalada na embarcação para o cliente de visualização de vídeo presente em terra a correr num computador portátil. A altura da antena no barco situou-se nos 10 metros e em terra a cerca de 126 metros em relação ao nível do mar, como se ilustra na montagem da Figura 57, não estando fixa mas segura num tripé. O barco, de nome “Bacamarte”, encontrava-se ancorado na posição definida na Figura 56, podendo estar entre 30 e 50 metros desse ponto. Este barco tem cerca de 3 vezes o tamanho do barco utilizado na primeira experiência.



**Figura 57 Montagem da antena de terra para realização de testes**

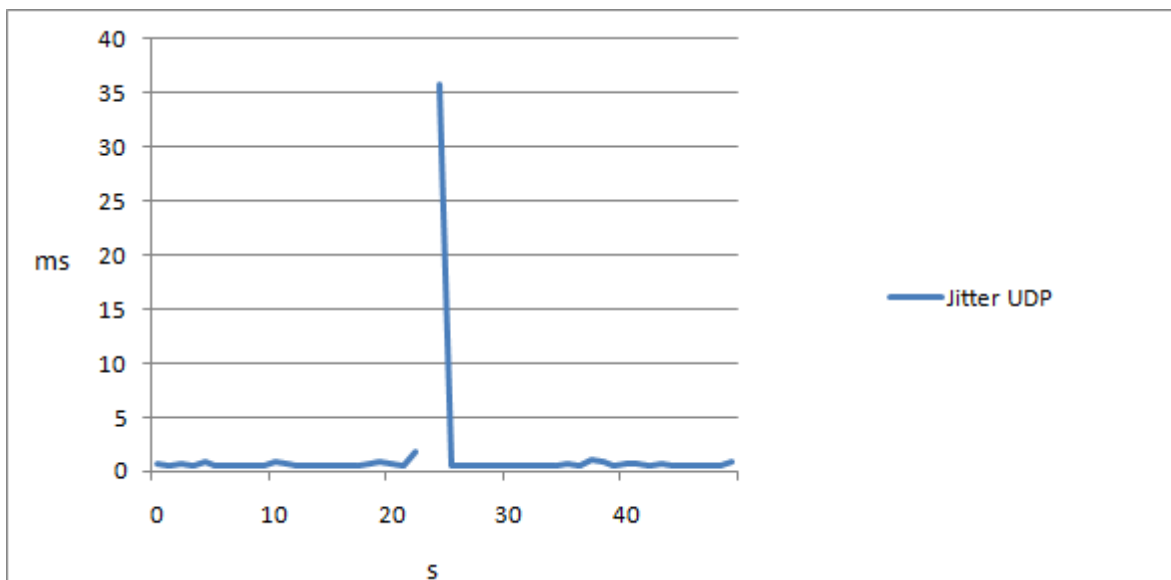
#### **4.2.2. GERAÇÃO DE TRÁFEGO**

Também foram realizados testes baseados na geração de tráfego aleatório como ocorrido na primeira experiência. Na Figura 58, Figura 59, Figura 60 e Figura 61 são apresentados os resultados obtidos a partir da geração de tráfego aleatório. A intensidade de sinal recebido situou-se nos -87 dBm no decorrer deste conjunto de testes.



**Figura 58 Débito em modo UDP ao longo do tempo**

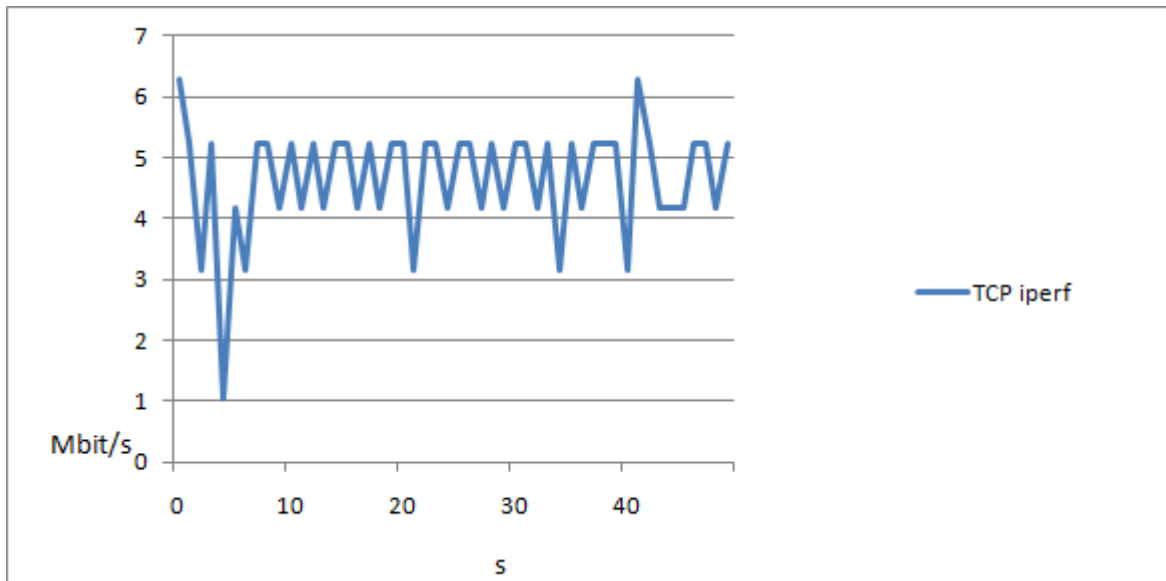
Na Figura 58 podemos observar o gráfico relativo ao débito UDP. Devido à distância de comunicação e à boa colocação das antenas de barco e de terra, o débito está muito próximo do máximo possível. Durante uns instantes ocorreu uma perda de sinal que se traduziu num débito nulo e num consequente *jitter* elevado face ao normal, tal como observado na Figura 59.



**Figura 59 Jitter ao longo do tempo**

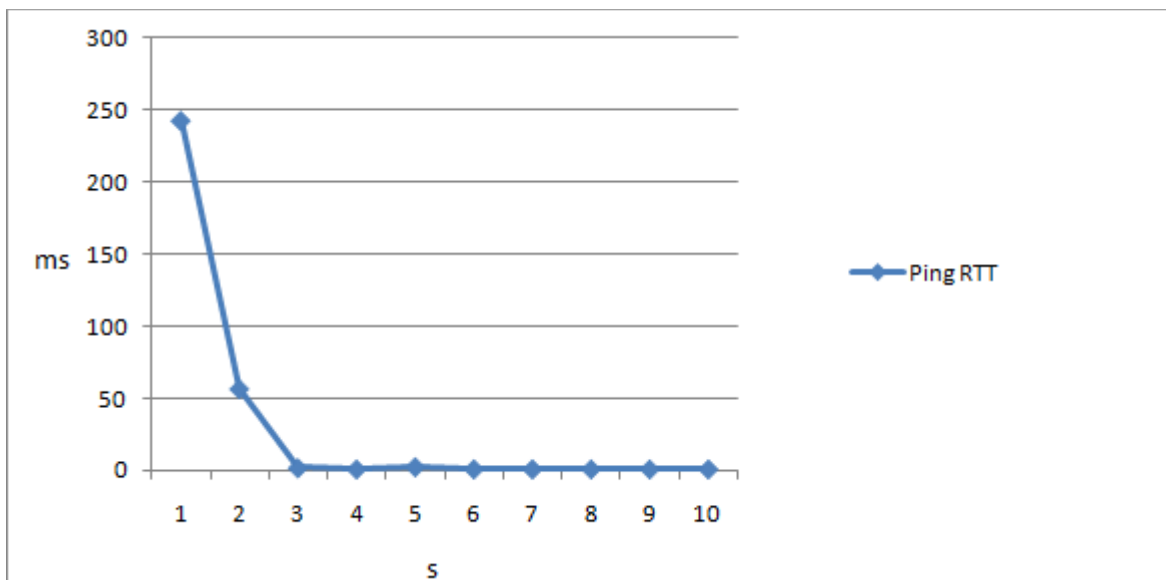
Na Figura 59 podemos observar o gráfico relativo ao *jitter* resultante da geração de tráfego UDP. Como era de esperar, o *jitter* mantém-se próximo de 0 ms pois estas condições de comunicação são melhores que as enfrentadas na experiência anterior, pois

não só a distância de comunicação é cerca de metade, como o impacto da agitação marítima foi menor.



**Figura 60 Débito em modo TCP ao longo do tempo**

Na Figura 60 podemos observar o gráfico relativo ao débito TCP. Como é de esperar, o tráfego recebido é menor que em modo UDP. Existe uma oscilação no tráfego recebido no decorrer de todo o teste pois o barco encontra-se em movimento e devido a isso existiram pacotes cuja confirmação de entrega não foi recebida.



**Figura 61 Tempo de ida e volta ao nó de barco ao longo do tempo**

Na Figura 61 podemos observar o gráfico relativo ao RTT. Mais uma vez, a partir dos 3 segundos inclusive, os resultados estão dentro do esperado devido às favoráveis

condições de comunicação. Nos primeiros 2 segundos deste teste o *ping* tem um valor bastante alto devido ao facto de o driver da placa se encontrar em modo adormecido, tendo saído deste modo durante este período.

#### 4.2.3. TRANSMISSÃO DE VÍDEO

O vídeo foi transmitido sobre IP em modo UDP, como acontece noutros sistemas de videovigilância, videochamada ou videoconferência. Na Figura 62 apresenta-se um fotograma retirado da captura de vídeo realizada no computador portátil em terra. Durante a sua transmissão, apenas durante uns instantes a imagem pára por completo e volta novamente ao normal, de forma não periódica, em que não se nota qualquer desfiguração ou introdução de macro blocos na imagem.



Figura 62 Fotograma de vídeo recebido

#### 4.2.4. CONCLUSÕES

Tendo em conta a proximidade entre o nó de terra e de barco e o tamanho da embarcação, todos os resultados obtidos estão dentro do esperado, pois a agitação do barco é mínima, o que se traduz numa estabilidade da antena e conseqüente estabilidade nas comunicações. Mesmo assim, o débito TCP não se mantém constante ao longo do tempo e o débito UDP sofre uma quebra momentânea. Esta quebra é devida a algum objeto que bloqueie temporariamente o sinal na antena colocada no barco. Também acontece nos valores de tempo de ida e volta (RTT), o início com um elevado tempo estabilizando num

valor ótimo. No caso do vídeo as paragens momentâneas podem ser justificadas com o facto de a antena de terra não estar a apontar para o barco apenas nesses intervalos de tempo.

#### **4.3. SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE VÍDEO PARA VIGILÂNCIA MARÍTIMA**

No âmbito da participação no 3º Fórum do Mar em Maio de 2013, onde foram apresentados os resultados presentes na Secção 4.1, diversas entidades tiveram interesse na experiência realizada, destacando-se o interesse por parte de uma empresa de depuração de bivalves com interesse na videovigilância de uma instalação *offshore*. Como tal, foi feita uma demonstração, onde o equipamento referente ao nó de terra referido na Secção 4.1 foi deslocado para o topo do edifício da Estação Litoral da Aguda (Figura 63) e montado conforme se ilustra na Figura 64. O equipamento referente ao nó de barco foi instalado noutro barco que esteve a cerca de 9 km da estação de terra. A experiência decorreu durante a tarde.



**Figura 63 Estação Litoral da Aguda [33]**



**Figura 64 Montagem equipamento terra**

#### **4.3.1. CONDIÇÕES DE TESTE**

De acordo com a informação recolhida no portal WindGURU [32], durante o período de tempo e na zona onde o barco navegou, não choveu, a ondulação esteve em torno dos 1,2 metros, o período da vaga esteve estável nos 8 segundos, a temperatura ambiente medida na costa esteve em torno dos 19° C e a nebulosidade situava-se nos 94%.

As potências de transmissão máximas foram alteradas para 24 dBm em terra e para 21 dBm no nó de barco, o *bitrate* foi alterado para automático bem como o uso de uma *spatial stream* ou duas, utilizou-se 40 MHz de largura de banda nos canais 161 e 165. A antena utilizada no barco não estava fixa a ele, estava fixa numa ripa de madeira, tendo sido esta segura à mão e foram feitos esforços no sentido de garantir que a antena ficasse perpendicular ao plano tangente à superfície da água, encontrando-se esta a cerca de 2,5 metros da superfície da água. Foram feitas configurações nas tabelas de encaminhamento dos nós de barco e de terra a fim de encaminhar o tráfego gerado na câmara IP do barco

para o cliente de visualização de vídeo presente em terra a correr num computador portátil. Também neste caso o vídeo foi transmitido sobre IP (Internet Protocol) em modo UDP.

#### **4.3.2. TRANSMISSÃO DE VÍDEO**

Após observação das várias amostras de vídeo, foram recolhidos os fotogramas presentes na Figura 65 e na Figura 66, onde o primeiro fotograma demonstra como o fluxo de vídeo se encontrava a funcionar, estavam reunidas as condições mínimas para transmitir dados e o segundo fotograma demonstra quando se perdia informação na ligação ou mesmo se perdia conectividade. O vídeo era recebido de forma fluida durante um ou dois segundos, degradando-se lentamente até não receber imagem, voltando gradualmente até ficar novamente fluido e assim sucessivamente, denotando o impacto que a ondulação tinha na transmissão do vídeo para terra.



**Figura 65** Fotograma de vídeo recebido em boas condições



**Figura 66** Fotograma de vídeo recebido com erros devido a informação perdida na ligação

### **4.3.3. CONCLUSÕES**

Nesta secção foi demonstrada uma aplicação real de transmissão de vídeo, que permitiu ter uma ideia exata de uma aplicação prática do sistema de comunicações marítimas implementado. Na receção dos vídeos ficou claro o impacto que a ondulação tem na transmissão de vídeo.

Para melhorar a fluidez do vídeo recebido era necessário colocar a antena num ponto mais elevado do barco e se possível recorrer a um mecanismo de estabilização da antena tendo em conta a pequena dimensão do barco, pois qualquer agitação marítima por mínima que fosse tinha um impacto direto na receção do vídeo.



## 5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Com este trabalho foi possível implementar uma solução baseada numa tecnologia de baixo custo, operando numa banda isenta de licença, até ao momento desenvolvida para curtas distâncias. Esta opera em ambiente marítimo efetuando comunicações de longa distância, rivalizando com soluções comerciais que têm licenças de utilização associadas. Os resultados obtidos mostram que é possível estabelecer comunicações ponto-a-ponto até cerca de 7 km da costa, com pelo menos 1 Mbit/s de débito, podendo o alcance aumentar utilizando potências de transmissão superiores. Desta forma, aplicações informáticas, que não sejam muito sensíveis ao atraso, poderão usufruir desta ligação. Podem igualmente ser realizadas conversações de voz através do serviço VoIP ou até mesmo videochamada ou videoconferência, pois não só o sistema permite larguras de banda suficientes para comportar esses serviços, como o atraso é baixo, comparativamente com um acesso satélite.

Tendo por base o trabalho desenvolvido na presente tese, como trabalho futuro pode-se explorar o seguinte:

- Definir um local para colocar a antena omnidirecional onde fique totalmente livre de obstáculos, pois melhoraria significativamente os resultados obtidos na situação em que o barco está a afastar-se da costa;
- Com recurso a uma frota de barcos pesqueiros, como é o caso dos existentes na cooperativa Propeixe, é possível utilizá-los como nós participantes numa rede *mesh*, em que cada um deles retransmite o sinal do nó adjacente para outro nó, aumentando a cobertura do serviço e criar redundância na ligação, pois também poderão ser utilizadas várias estações em terra para difundir o sinal;
- Com mais recursos, pode-se estudar a hipótese de se utilizarem três antenas sectoriais colocadas no mastro do barco, recorrendo a um *splitter* por polarização para usar o mesmo equipamento ativo, que com a ajuda de um servomotor por antena controlado por um micro controlador, ajuste individualmente a inclinação de cada uma em relação ao mastro. Tendo em conta que facilmente se consegue saber qual a antena que está com maior ganho num determinado instante em relação à antena montada em terra, esta seria selecionada para se ajustar à inclinação ótima em relação à antena de terra e as restantes duas seriam ajustadas para permitir condições de comunicação ótimas com barcos próximos. A utilização deste sistema permite que as antenas sectoriais tenham maior ganho ao reduzir a abertura vertical, pois não é necessária uma grande abertura para comunicar e inclusive diminui a hipótese de um raio refletido na superfície da água proveniente de terra seja absorvido pela antena e cause os efeitos destrutivos e construtivos conhecidos no modelo de dois raios. O inverso não acontece pois o raio nem sequer chega a sair da antena sectorial do barco com intensidade suficiente para causar os referidos efeitos na antena de terra, sendo estes dois cenários possíveis apenas quando o barco se encontra perto da costa;
- A utilização de uma antena omnidirecional com técnica *beamforming* no topo de um mastro no barco permite direcionar a máxima potência possível para a antena de terra e para as antenas de embarcações limítrofes caso necessitem de comunicar;

- Outro ponto a abordar será a aquisição de placas Wi-Fi com maior sensibilidade e/ou que tenham uma potência de emissão superior ao utilizar mais largura de banda ou ao utilizar esquemas de codificação mais complexos que se traduzam num aumento do débito para a mesma distância, não excedendo os limites legais de EIRP, tentando manter o baixo custo de toda a solução.

## Referências

- [1] QUADRO NACIONAL DE ATRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS, 23 de Novembro de 2012.  
[http://www.anacom.pt/streaming/qnaf2010\\_2011\\_20junho2012.pdf?contentId=1129525&field=ATTACHED\\_FILE](http://www.anacom.pt/streaming/qnaf2010_2011_20junho2012.pdf?contentId=1129525&field=ATTACHED_FILE).
- [2] J.C. Reyes-Guerrero, M. Bruno, Luis A. Mariscal. Buoy-to-ship experimental measurements over sea at 5.8 GHz near urban environments. Dept. of Computer Languages and Systems, Nautical Science Faculty, University of Cadiz, Puerto Real, Spain.
- [3] José Carlos Reyes-Guerrero, Luis Antonio Mariscal. Experimental Time Dispersion Parameters of Wireless Channels over Sea at 5.8 GHz. Dept. of Computer Languages and Systems, Nautical Science Faculty, University of Cadiz, Puerto Real, Spain.
- [4] Rob Flickenger, Steve Okay, Ermanno Pietrosemoli, Marco Zennaro e Carlo Fonda. Very Long Distance Wi-Fi Networks. EUA, Venezuela e Itália.
- [5] IALA Maritime Radio Communications Plan Edition 2, AISM, 10, rue des Gaudiness, 78100, St Germain en Laye, France.
- [6] Fritz Bekkadal. Future Maritime Communications Technologies. Otto Nielsens veg 10, NO-7052 Trondheim, Norway.
- [7] EN 302 502 V1.1.1 (2006-11), European Telecommunications Standards Institute.
- [8] Inmarsat - Mobile Satellite Safety & Operational Communications Services – Maritime, 8 de Janeiro de 2013.  
<http://www.inmarsat.com/sectors/maritime/index.htm>.
- [9] Rosario G. Garroppo, Stefano Giordano, Davide Iacono e Luca Tavanti. Experimental and simulation analysis of a WiMAX system in an emergency marine scenario. Department of Information Engineering, University of Pisa, Italy.
- [10] TMN / voz móvel, banda larga móvel e venda de telemóveis, 8 de Janeiro de 2013.  
<http://www.tmn.pt/portal/site/tmn>.
- [11] Empresas | Optimus, 8 de Janeiro de 2013. <http://www.optimus.pt/empresas/>.
- [12] Vodafone Portugal – telemóveis, Internet, televisão, 8 de Janeiro de 2013.  
<http://www.vodafone.pt/main/particulares/>.
- [13] SCADA VHF/UHF RADIO MODEM, 16 de Janeiro de 2013.  
<http://www.sutron.com/products/UHF-VHFradio1249.htm>.
- [14] YoungBum Kim, JongHun Kim, YuPeng Wang, KyungHi Chang. Application Scenarios of Nautical Ad-hoc Network for Maritime Communications. Inha University, 253 Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Republic of Korea.

- [15] Hanwu WANG, Weijia JIA, Geyong MIN. Effective Channel Exploitation in IEEE 802.16j Networks for Maritime Communications. 2011 31st International Conference on Distributed Computing Systems.
- [16] Rosario G. Garroppo, Stefano Giordano, Davide Iacono. Experimental and Simulation Study of a WiMAX system in the sea port scenario. Dept. of Information Engineering, University of Pisa, ITALY.
- [17] Eric E. Johnson. HF Radio Mesh Networks. IEEE.
- [18] J. Joe, S. K. Hazra, S. H. Toh, W. M. Tan, J. Shankar. 5.8 GHz Fixed WiMAX Performance in A Sea Port Environment. Institute for Infocomm Research, 21 Heng Mui Keng Terrace, Singapore 119613, Singapore.
- [19] Chee-Wei Ang and SuWen. Signal strength sensitivity and its effects on routing in maritime wireless networks. Pages 192 – 199, Piscataway, NJ, USA, 2008.
- [20] Alex Macmillan, Mahesh K. Marina, Jhair Tocancipa Triana. Slow Frequency Hopping for Mitigating Tidal Fading on Rural Long Distance Over-Water Wireless Links.
- [21] Yvon-Marie Le Roux, Jacky Ménard, Claude Toquin, Jean-Pierre Jolivet, Fabien Nicolas. Experimental measurements of propagation characteristics for maritime radio links. Institut Télécom - Télécom Bretagne, UMR CNRS 3192 Lab-STICC, Brest, France.
- [22] 802.11n Primer, <http://www.airmagnet.com/assets/whitepaper/WP-802.11nPrimer.pdf>.
- [23] Radio Mobile - RF propagation simulation software - Fresnel zones, 3 de Janeiro de 2013. [http://radiomobile.pe1mew.nl/?Calculations:Propagation\\_calculation:Fresnel\\_zones](http://radiomobile.pe1mew.nl/?Calculations:Propagation_calculation:Fresnel_zones).
- [24] Global Microwave Systems, Inc. - Portable Microwave Solutions, 3 de Janeiro de 2013. [http://www.cobham.com/static/GMS%20Calc%20Files/calc\\_define.asp](http://www.cobham.com/static/GMS%20Calc%20Files/calc_define.asp).
- [25] Building future networks with MIMO and OFDM, 16 de Janeiro de 2013. [http://connectedplanetonline.com/wireless/technology/mimo\\_ofdm\\_091905/](http://connectedplanetonline.com/wireless/technology/mimo_ofdm_091905/).
- [26] Guido R. Hiertz, Dee Denteneer, Lothar Stibor, Yunpeng Zang, Xavier Pérez Costa, Bernhard Walke. The IEEE 802.11 Universe. IEEE Communications Magazine, January 2010.
- [27] CWNP | 802.11n Guard Intervals (GI), 7 de Janeiro de 2013. [http://www.cwnp.com/cwnp\\_wifi\\_blog/802-11n-guard-intervals-gi/](http://www.cwnp.com/cwnp_wifi_blog/802-11n-guard-intervals-gi/).
- [28] RouterBOARD R52n-M, 8 de Janeiro de 2013. <http://routerboard.com/pdf/172/R52n-M.pdf>.
- [29] Straight, Level, and the Curvature of the Earth | Math Encounters Blog, 3 de Janeiro de 2013. <http://mathscinotes.wordpress.com/2010/11/16/straight-level-and-the-curvature-of-the-earth/>.

- [30] Lambros Lambrinos, Costas Djouvas. Creating a maritime wireless mesh infrastructure for real-time applications. Department of Communication and Internet Studies, Cyprus University of Technology, Limassol, Cyprus.
- [31] OpenWRT 12.09 RC1, 8 de Janeiro de 2013. [http://downloads.openwrt.org/attitude\\_adjustment/12.09-rc1/x86/generic/openwrt-x86-generic-combined-ext4.img.gz](http://downloads.openwrt.org/attitude_adjustment/12.09-rc1/x86/generic/openwrt-x86-generic-combined-ext4.img.gz).
- [32] WindGURU, 3 de Abril de 2013. <http://www.windguru.cz/>.
- [33] ELA, 15 de Maio de 2013. <http://www.fundacao-ela.pt/>.







## Anexo A. Script de registo de testes de barco para terra

```
#!/bin/sh
# nada passado por parametro na linha de
comandos
# testes do nó 1 para o nó 0, barco para terra

m0=00
m2=02
m4=04
m6=06
m8=08
m10=$((m0+10))
m12=$((m0+12))
m14=$((m0+14))
m16=$((m0+16))
m18=$((m0+18))
m20=$((m0+20))
m22=$((m0+22))
m24=$((m0+24))
m26=$((m0+26))
m28=$((m0+28))
m30=$((m0+30))
m32=$((m0+32))
m34=$((m0+34))
m36=$((m0+36))
m38=$((m0+38))
m40=$((m0+40))
m42=$((m0+42))
m44=$((m0+44))
m46=$((m0+46))
m48=$((m0+48))
m50=$((m0+50))
m52=$((m0+52))
m54=$((m0+54))
m56=$((m0+56))
m58=$((m0+58))
while [ 1 ]
do
    #sleep 60 #usar para nao repetir os
mesmos testes no mesmo minuto
    minuto_act=`date +%M`
    while [[ "$minuto_act" != "$m0" &&
"$minuto_act" != "$m2" && "$minuto_act" != "$m4"
&& "$minuto_act" != "$m6" && "$minuto_act" !=
"$m8" && "$minuto_act" != "$m10" && "$minuto_act"
!= "$m12" && "$minuto_act" != "$m14" &&
"$minuto_act" != "$m16" && "$minuto_act" !=
"$m18" && "$minuto_act" != "$m20" &&
"$minuto_act" != "$m22" && "$minuto_act" !=
```

```

"$m24" && "$minuto_act" != "$m26" &&
"$minuto_act" != "$m28" && "$minuto_act" !=
"$m30" && "$minuto_act" != "$m32" &&
"$minuto_act" != "$m34" && "$minuto_act" !=
"$m36" && "$minuto_act" != "$m38" &&
"$minuto_act" != "$m40" && "$minuto_act" !=
"$m42" && "$minuto_act" != "$m44" &&
"$minuto_act" != "$m46" && "$minuto_act" !=
"$m48" && "$minuto_act" != "$m50" &&
"$minuto_act" != "$m52" && "$minuto_act" !=
"$m54" && "$minuto_act" != "$m56" &&
"$minuto_act" != "$m58" ]]
do
    sleep 1
    minuto_act=`date +%M`
    #break
done
#executar tudo o que e' preciso executar
data_act=`date +%m-%d-%H-%M`
killall -9 iperf

#init.WLAN
ping -w 2 192.168.0.10

GetCoordinates=$(gpspipe -w -n 5 | grep -m 1 TPV
| cut -d, -f4,6-8,13)
echo -e $(echo $GetCoordinates | cut -d, -f3 |
cut -d: -f2),"$(echo $GetCoordinates | cut -d, -
f4 | cut -d: -f2) >> /logs/$data_act.gps
iwinform wlan0 info >> /logs/$data_act.iwinform

#iperf UDP
iperf -p 5001 -c 192.168.0.10 -u -b 7M -t 50 >
/logs/$data_act.iperfu &
sleep 48
#for i in 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32
33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48
49 50
#do
GetCoordinates=$(gpspipe -w -n 5 | grep -m 1 TPV
| cut -d, -f4,6-8,13)
echo -e $(echo $GetCoordinates | cut -d, -f3 |
cut -d: -f2),"$(echo $GetCoordinates | cut -d, -
f4 | cut -d: -f2) >> /logs/$data_act.gps
iwinform wlan0 info >> /logs/$data_act.iwinform
sleep 2
#done

#sleep 1

GetCoordinates=$(gpspipe -w -n 5 | grep -m 1 TPV
| cut -d, -f4,6-8,13)
echo -e $(echo $GetCoordinates | cut -d, -f3 |
cut -d: -f2),"$(echo $GetCoordinates | cut -d, -
f4 | cut -d: -f2) >> /logs/$data_act.gps

```

```

iuserinfo wlan0 info >> /logs/$data_act.iuserinfo

#iperf TCP
iperf -p 5000 -c 192.168.0.10 -t 50 -i 1 >
/logs/$data_act.iperf &
sleep 48
#for i in 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32
33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48
49 50
#do
GetCoordinates=$(gpspipe -w -n 5 | grep -m 1 TPV
| cut -d, -f4,6-8,13)
echo -e $(echo $GetCoordinates | cut -d, -f3 |
cut -d: -f2)", "$(echo $GetCoordinates | cut -d, -
f4 | cut -d: -f2) >> /logs/$data_act.gps
iuserinfo wlan0 info >> /logs/$data_act.iuserinfo
sleep 2
#done

#sleep 1

GetCoordinates=$(gpspipe -w -n 5 | grep -m 1 TPV
| cut -d, -f4,6-8,13)
echo -e $(echo $GetCoordinates | cut -d, -f3 |
cut -d: -f2)", "$(echo $GetCoordinates | cut -d, -
f4 | cut -d: -f2) >> /logs/$data_act.gps
iuserinfo wlan0 info >> /logs/$data_act.iuserinfo

#ping
ping -w 10 192.168.0.10 > /logs/$data_act.ping

#for i in 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
#do
GetCoordinates=$(gpspipe -w -n 5 | grep -m 1 TPV
| cut -d, -f4,6-8,13)
echo -e $(echo $GetCoordinates | cut -d, -f3 |
cut -d: -f2)", "$(echo $GetCoordinates | cut -d, -
f4 | cut -d: -f2) >> /logs/$data_act.gps
iuserinfo wlan0 info >> /logs/$data_act.iuserinfo
#sleep 1
#done

#FIM DE executar tudo o que e' preciso executar
done

```

# Anexo B. Diagramas de radiação da antena sectorial

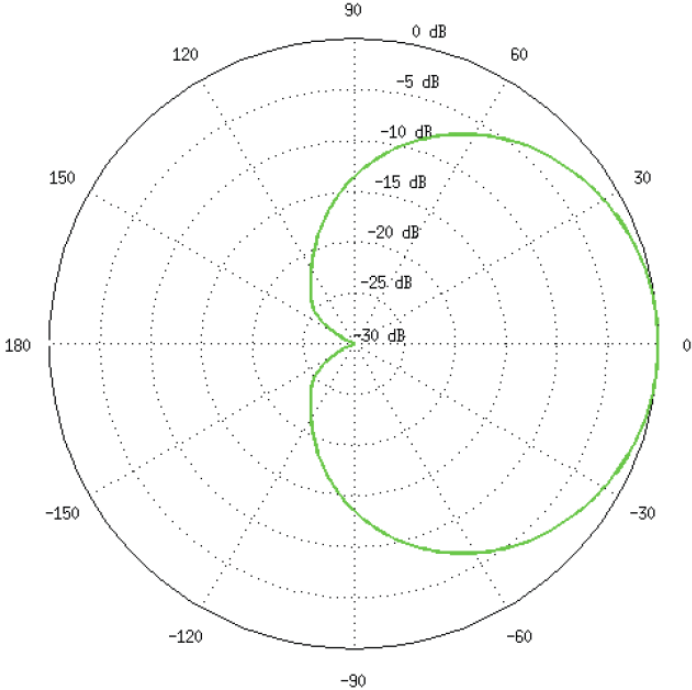


Diagrama de radiação da polarização vertical no plano horizontal da antena sectorial

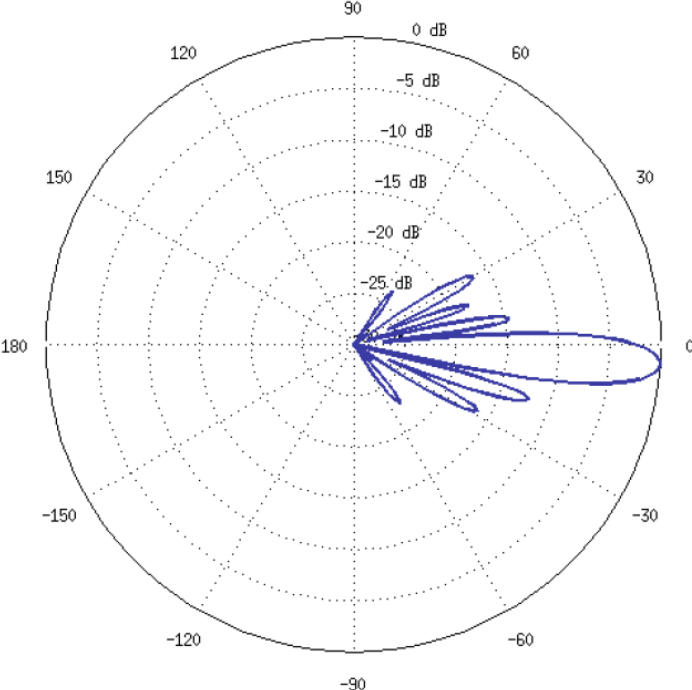


Diagrama de radiação da polarização vertical no plano vertical da antena sectorial

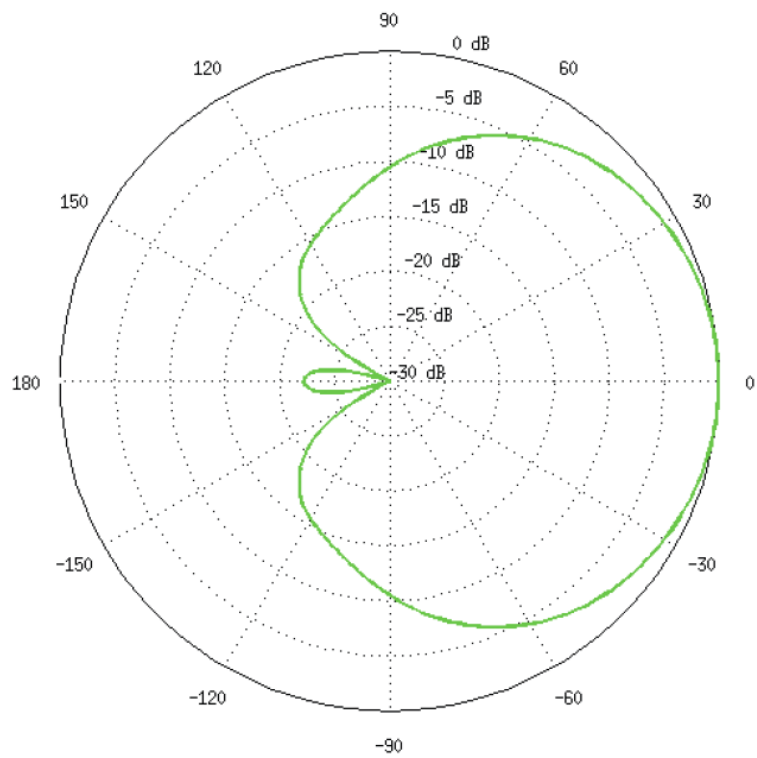


Diagrama de radiação da polarização horizontal no plano horizontal da antena sectorial

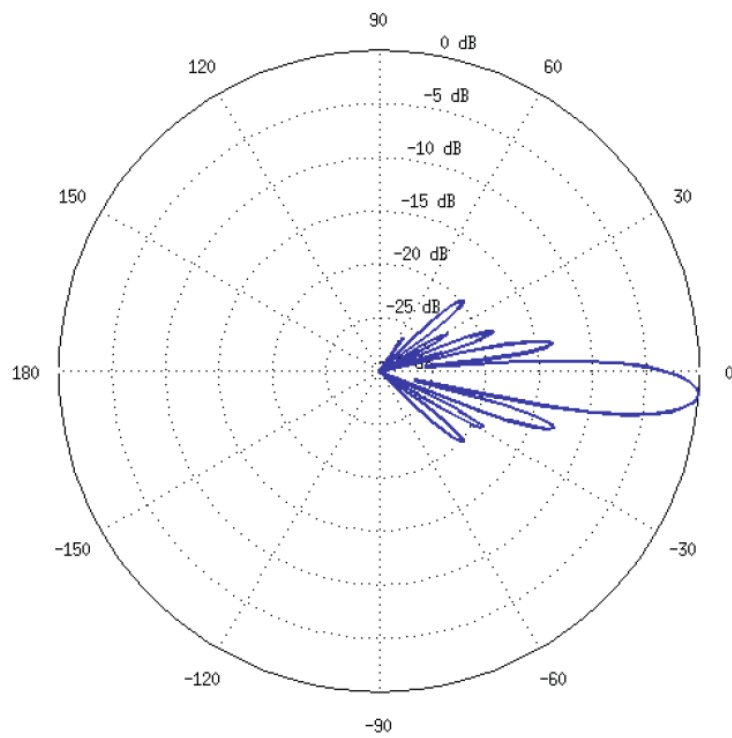


Diagrama de radiação da polarização horizontal no plano vertical da antena sectorial

# Anexo C. Diagramas de radiação da antena omnidirecional

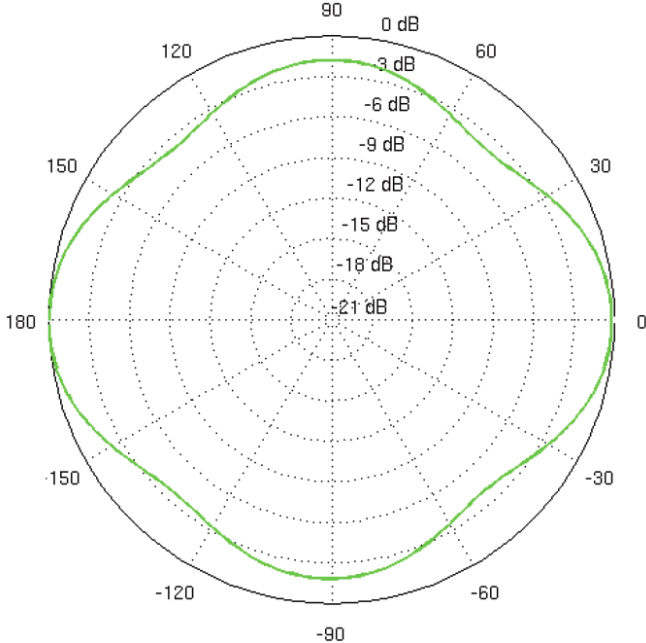


Diagrama de radiação da polarização vertical no plano horizontal da antena omnidirecional

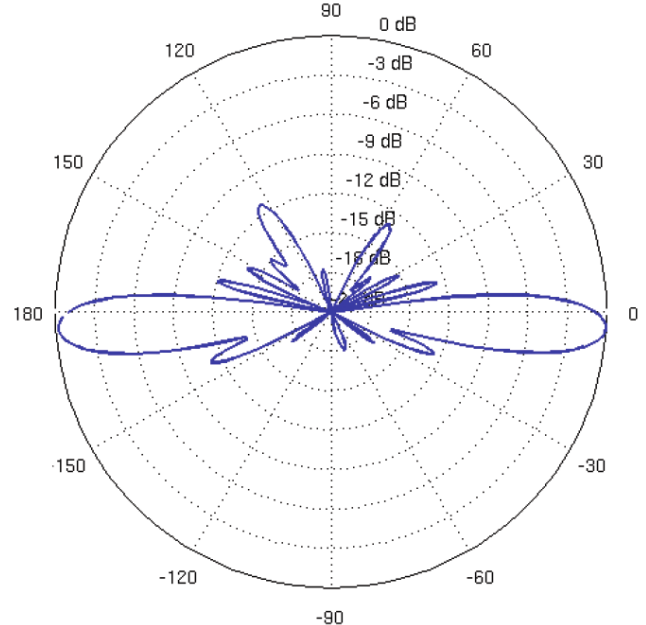


Diagrama de radiação da polarização vertical no plano vertical da antena omnidirecional

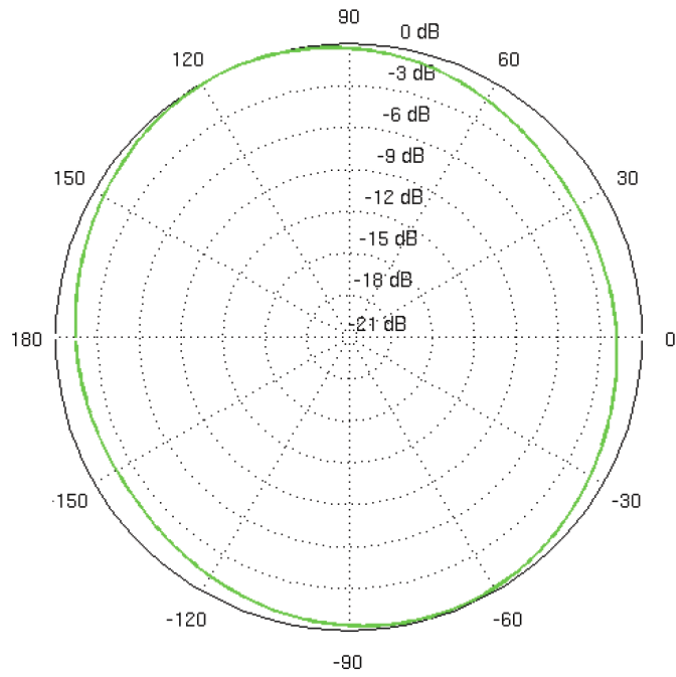


Diagrama de radiação da polarização horizontal no plano horizontal da antena omnidirecional

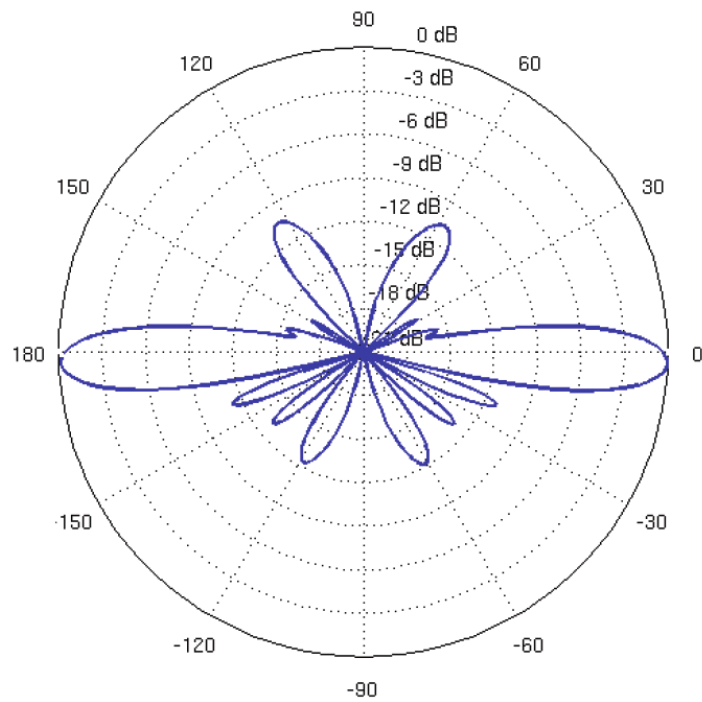


Diagrama de radiação da polarização horizontal no plano vertical da antena omnidirecional

## Anexo D. Ficheiros de configuração de cada nó

### Nó de terra, configuração Wi-Fi:

```
config Wi-Fi-device 'radio0'
  option type 'mac80211'
  option macaddr '00:0c:42:66:33:33'
  option hwmode '11na'
  option htmode 'HT20'

  option country 'US'
  option channel '161'
  option txpower '20'
  option distance '20000'

config Wi-Fi-iface
  option device 'radio0'
  option encryption 'none'
  option ssid 'INESCTec'
  option mode 'adhoc'
  option bssid '52:AB:3B:0F:71:94'
  option network 'WLAN'
```

### Nó de terra, configuração de rede:

```
config interface 'loopback'
  option ifname 'lo'
  option proto 'static'
  option ipaddr '127.0.0.1'
  option netmask '255.0.0.0'

config interface 'lan'
  option ifname 'eth0'
  option proto 'static'
  option netmask '255.255.255.0'
  option ipaddr '192.168.1.50'
  option gateway '192.168.1.1'
  option dns '192.168.1.1'

config interface 'WLAN'
  option _orig_ifname 'wlan0'
  option _orig_bridge 'false'
  option proto 'static'
  option ipaddr '192.168.0.10'
  option netmask '255.255.255.0'
```

### Nó de barco, configuração Wi-Fi:

```
config Wi-Fi-device 'radio0'
  option type 'mac80211'
  option macaddr '00:0c:42:66:33:33'
  option hwmode '11na'
```

```
option htmode 'HT20'

option country 'US'
option channel '161'
option txpower '20'
option distance '20000'

config Wi-Fi-iface
option device 'radio0'
option encryption 'none'
option ssid 'INESCTec'
option mode 'adhoc'
option bssid '52:AB:3B:0F:71:94'
option network 'WLAN'
```

### Nó de barco, configuração de rede:

```
config interface 'loopback'
option ifname 'lo'
option proto 'static'
option ipaddr '127.0.0.1'
option netmask '255.0.0.0'

config interface 'lan'
option ifname 'eth0'
option proto 'static'
option netmask '255.255.255.0'
option ipaddr '192.168.1.51'

config interface 'WLAN'
option _orig_ifname 'wlan0'
option _orig_bridge 'false'
option proto 'static'
option ipaddr '192.168.0.11'
option netmask '255.255.255.0'
```

## Anexo E. Exemplo de ficheiro KML

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<kml xmlns="http://www.opengis.net/kml/2.2">
  <Document>
    <Placemark>
      <name>12/04/2013 17:22 GMT(04-12-17-
22.*)</name>
      <Point>
        <coordinates>-
8.595447343,41.180143195,0</coordinates>
      </Point>
      <description>TCP iperf: 0.0-10.2 sec 6.13
MBytes 5.05 Mbits/sec
      UDP iperf: 0.0-10.0 sec 1.25 MBytes 1.05
Mbits/sec 0.127 ms 0/ 893 (0%)
      ping: 10 packets transmitted, 10 packets
received, 0% packet loss, round-trip min/avg/max
= 1.312/2.064/7.553 ms
      iwinfo: Tx-Power: 19 dBm Link Quality: 34/70,
Signal: -76 dBm Noise: -95 dBm, Bit Rate: 6.5
MBit/s</description>
    </Placemark>
    <Placemark>
      <name>12/04/2013 17:02 GMT(04-12-17-
02.*)</name>
      <description>TCP iperf: 0.0-10.0 sec 5.88
MBytes 4.91 Mbits/sec
      UDP iperf: 0.0-10.0 sec 1.25 MBytes 1.05
Mbits/sec 0.032 ms 0/ 893 (0%)
      ping: 10 packets transmitted, 10 packets
received, 0% packet loss, round-trip min/avg/max
= 1.341/1.510/2.871 ms
      iwinfo: Tx-Power: 19 dBm Link Quality: 31/70,
Signal: -79 dBm Noise: -95 dBm, Bit Rate: 6.5
MBit/s</description>
      <Point>
        <coordinates>-
8.593715006,41.191289199,0</coordinates>
      </Point>
    </Placemark>
    <Placemark>
      <name>12/04/2013 16:47 GMT(04-12-16-
47.*)</name>
      <description>TCP iperf: 0.0-10.1 sec 6.13
MBytes 5.09 Mbits/sec
      UDP iperf: 0.0-10.6 sec 1.25 MBytes 994
Kbits/sec 0.066 ms 0/ 893 (0%)
      ping: 10 packets transmitted, 10 packets
received, 0% packet loss, round-trip min/avg/max
= 1.309/2.162/7.429 ms
```

```
iwinfo: Tx-Power: 19 dBm Link Quality: 36/70,  
Signal: -74 dBm Noise: -95 dBm, Bit Rate: 6.5  
MBit/s</description>  
<Point>  
<coordinates>-  
8.590048916,41.183432437,0</coordinates>  
</Point>  
</Placemark>  
</Document>  
</kml>
```

Resultado no programa Google Earth:

