

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



# Localização por intermédio de *iBeacons*

**Ricardo Germano dos Reis**

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor Armando Jorge Miranda de Sousa

Co-orientador: Doutor Filipe Neves dos Santos

25 de Julho de 2017



# Resumo

A autonomia de um robô móvel depende fortemente da sua capacidade de localização. No contexto da vinha de encosta (ex. Vinhas do Douro) os sistemas de localização comumente utilizados baseiam-se em sistemas de posicionamento global por satélite (GNSS, que inclui o GPS, Galileo, GLONASS). Estes sistemas tendem a falhar devido às obstruções ao sinal de satélite. Isto é um reflexo dos altos valores das máscaras de visibilidade impostas pela vegetação e montanhas. A utilização de tecnologias complementares para localização permite aprimorar a precisão e auxiliar os algoritmos de localização, assegurando a redundância, robustez e qualidade do resultado dos algoritmos em momentos de ausência de sistemas GNSS. Considerando a tendência da agricultura de precisão, onde tudo é monitorizado com sensores "in-situ", a utilização dos sinais emitidos por sensores baseados em tecnologia *Bluetooth* afigura-se como uma potencial solução para auxílio à localização. A presente dissertação partindo deste pressuposto e utilizando marcadores (*ibeacons*) existentes no mercado faz um estudo aprofundado do desempenho/precisão/exatidão desta abordagem para estimação de distâncias entre marcadores e robô considerando o RSSI. A melhor função transferência, distância em função RSSI, e ótima parametrização são dois pontos críticos para melhor desempenho. Este trabalho apresenta e analisa os impactos da temperatura, humidade e orientação nesta função de transferência, gera uma base de dados para avaliação de futuros algoritmos, e avalia a vantagem da incorporação desta abordagem num sistema de localização.



# Abstract

The autonomy of a mobile robot depends heavily on its locating ability. In the context of hillside vineyards (such as Douro vineyards) the most commonly used localization systems are based on global satellite positioning systems (GNSS, which includes GPS, Galileo, GLONASS). These systems tend to fail due to obstructions to the satellite signal. This is a consequence of the high values of the visibility masks imposed by the vegetation and mountains. The use of complementary technologies for localization allows to improve the accuracy and to assist the localization algorithms, ensuring the redundancy, robustness and quality of the result of the algorithms in moments of absence of GNSS systems. Considering the trend of precision agriculture, where everything is monitored with in-situ sensors, the use of the signals emitted by sensors based on Bluetooth technology appears as a potential solution for localization aid. The present dissertation, based on this assumption and using markers (ibeacons) available in the market, makes an in-depth study of the performance / precision / accuracy of this approach for estimation of distances between markers and robot considering RSSI. The best transfer function, distance depending on RSSI, and optimum parameterization are two critical points to achieve better performance. This work presents and analyzes the impacts of temperature, humidity and orientation on this transfer function, generates a database for evaluation of future algorithms, and evaluates the advantage of incorporating this approach into a localization system.



# Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus. Acredito fortemente que Deus tem representado um papel importante na minha vida, e a Ele devo muito dos meus sucessos.

Em segundo lugar queria agradecer aos meus pais. Sei o esforço que por mim fizeram e agradeço o voto de confiança e todo o apoio que nunca hesitaram em me conceder.

Quero agradecer ao professor Armando Jorge Sousa, meu orientador, pois foi um docente que frequentemente me apoiou nesta jornada académica na FEUP, orientou-me ao longo desta dissertação e sempre me proporcionou os seus conselhos e amizade.

Um agradecimento especial ao Dr. Filipe Neves dos Santos, meu coorientador. Apesar de apenas o conhecer desde o começo desta dissertação, foi alguém que me ajudou de forma incansável, a quem o apoio e amizade não poderia deixar de agradecer.

Quero agradecer à minha namorada, Joana, com quem partilhei esta jornada académica com momentos de felicidade mas também muitos de dificuldade e esforço. Agradeço ainda todo o apoio e auxílio prestado no desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço aos meus avós porque me apoiam desde pequeno e têm um papel de grande importância na minha vida. A eles devo muito da minha formação pessoal e todo o apoio incondicional que ao longo dos anos me prestaram.

Agradeço à minha tia Raquel e prima Alexandra por me terem acolhido quando vim estudar para o Porto e proporcionado apoio nos momentos difíceis desta jornada.

Agradeço também à mãe da minha namorada, Manuela, porque esteve sempre presente nestes últimos anos e sempre fez sentir o seu apoio.

Por fim, agradeço a toda a minha família e amigos que apesar de não se encontrarem diretamente referidos, a eles muito devo por todos os bons momentos e auxílio prestado ao longo dos anos.

Ricardo Reis





*“Pray, and let God worry.”*

Martin Luther



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento . . . . .	1
1.2	Motivação e Objetivos . . . . .	1
1.3	Estrutura da Dissertação . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Protocolos <i>Bluetooth</i></b>	<b>5</b>
2.1	Introdução . . . . .	5
2.2	<i>Bluetooth Low Energy</i> . . . . .	5
2.3	<i>iBeacon</i> . . . . .	6
2.3.1	Mercado de <i>iBeacons</i> . . . . .	7
2.4	Resumo . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Localização</b>	<b>9</b>
3.1	Introdução . . . . .	9
3.2	Técnicas de Auxílio à Estimação de Localização . . . . .	9
3.2.1	RSSI . . . . .	9
3.2.2	Ângulo de Incidência . . . . .	10
3.2.3	Tempo de Voo . . . . .	10
3.2.4	Filtros . . . . .	11
3.2.5	<i>Fingerprinting</i> . . . . .	11
3.2.6	Células . . . . .	11
3.3	Análise Bibliográfica . . . . .	11
3.4	Indicadores de Desempenho . . . . .	14
3.5	Resumo e Conclusões . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Sistema de Localização</b>	<b>17</b>
4.1	Introdução . . . . .	17
4.2	<i>Software</i> . . . . .	17
4.2.1	ROS . . . . .	17
4.2.2	Desenvolvimento em ROS . . . . .	19
4.2.3	Desenvolvimento em Matlab . . . . .	23
4.3	<i>Hardware</i> . . . . .	23
4.3.1	Raspberry Pi . . . . .	23
4.3.2	<i>Dongles</i> USB . . . . .	24
4.3.3	<i>iBeacons</i> . . . . .	27
4.3.4	Sensor temperatura e humidade . . . . .	28
4.4	Configurações dos testes . . . . .	29
4.4.1	Teste 1 . . . . .	29

4.4.2	Teste 2 . . . . .	31
4.4.3	Teste 3 . . . . .	31
4.4.4	Teste 4 . . . . .	33
4.4.5	Validação . . . . .	35
4.5	Resumo . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>37</b>
5.1	Introdução . . . . .	37
5.2	Câmara Anecóica vs Exterior . . . . .	37
5.2.1	Câmara Anecóica . . . . .	37
5.2.2	Exterior . . . . .	38
5.2.3	Comparação . . . . .	41
5.3	Variação da Elevação . . . . .	44
5.3.1	Resultados em Elevação . . . . .	44
5.3.2	Comparação . . . . .	46
5.4	Diferença entre <i>iBeacons</i> . . . . .	46
5.5	Humidade e Temperatura . . . . .	46
5.5.1	Humidade . . . . .	49
5.5.2	Comparação . . . . .	49
5.6	Horizontal vs Vertical . . . . .	50
5.6.1	Posição Horizontal . . . . .	53
5.6.2	Comparação . . . . .	53
5.6.3	Ajuste da Curva . . . . .	53
5.7	Variação da Orientação . . . . .	56
5.7.1	Comparação . . . . .	56
5.8	Estimação da posição dos <i>iBeacons</i> . . . . .	61
5.9	Resumo . . . . .	62
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>67</b>
6.1	Conclusões . . . . .	67
6.2	Trabalho Futuro . . . . .	68
	<b>Referências</b>	<b>69</b>

# Lista de Figuras

2.1	Banda de frequência e canais do Bluetooth Low Energy . . . . .	6
2.2	Formato de uma trama iBeacon . . . . .	7
4.1	Formato da mensagem i beacon.msg . . . . .	19
4.2	Exemplo de output intermédio do script. . . . .	20
4.3	Exemplo de output no formato i beacon.msg. . . . .	21
4.4	Formato da mensagem temp_humidity . . . . .	22
4.5	Publicação do tópico temp_humidity . . . . .	22
4.6	Exemplar da Raspberry Pi 3 model B . . . . .	24
4.7	Exemplares de <i>dongles</i> USB utilizados . . . . .	25
4.8	Placas de circuitos para os <i>dongles</i> USB utilizados . . . . .	25
4.9	Padrão de radiação de uma antena MIFA nos diferentes eixos X, Y e Z. . . . .	26
4.10	Padrão de radiação teórico de uma antena MIFA . . . . .	27
4.11	Placa de circuito de um <i>beacon</i> Kontakt.io . . . . .	27
4.12	Padrão de radiação de um <i>beacon</i> Kontakt.io . . . . .	28
4.13	Ligação entre sensor DTH22 e Raspberry Pi . . . . .	29
4.14	Posição das antenas USB . . . . .	30
4.15	Esquema do procedimento do primeiro teste. . . . .	30
4.16	Configuração utilizada no primeiro teste. . . . .	30
4.17	Configuração utilizada no segundo teste. . . . .	31
4.18	Esquema do procedimento do terceiro teste. . . . .	32
4.19	Posição das antenas no terceiro teste (a) posição vertical e (b) posição horizontal. . . . .	33
4.20	Configuração utilizada no terceiro teste. . . . .	33
4.21	Esquema do procedimento do quarto teste (a) vista lateral e (b) vista superior. . . . .	34
4.22	Configuração utilizada no quarto teste. . . . .	34
4.23	Configuração utilizada a bordo do Agrov16. . . . .	35
5.1	Medidas de RSSI em relação a distância na câmara anecóica para as antenas 0-3. . . . .	38
5.2	Valores médios de RSSI na câmara anecóica . . . . .	39
5.3	Valores médios de RSSI na câmara anecóica . . . . .	40
5.4	Medidas de RSSI em relação a distância no exterior para as antenas 0-3. . . . .	41
5.5	Valores médios de RSSI e desvio padrão no exterior . . . . .	42
5.6	Valores médios de RSSI em relação a distância no exterior para as antenas 0-3. . . . .	43
5.7	Valores médios de RSSI para as antenas 1-3 em elevação . . . . .	45
5.8	Valores médios de RSSI para as antenas 1-3 a diferentes elevações . . . . .	47
5.9	Valores médios de RSSI para as antenas 1-3 utilizando diferentes <i>iBeacons</i> . . . . .	48
5.10	Dados de temperatura e humidade no primeiro dia. . . . .	49
5.11	Dados de temperatura e humidade no segundo dia. . . . .	50

5.12	Valores médios de RSSI para as antenas 1-3 com humidade superior . . . . .	51
5.13	Valores médios de RSSI com diferentes valores de humidade e temperatura . . .	52
5.14	Valores médios de RSSI para as antenas 1-3 em posição horizontal . . . . .	54
5.15	Valores médios de RSSI para as antenas 1-3 em posição vertical e horizontal . . .	55
5.16	Valores médios de RSSI e respetivas curvas logarítmicas ajustadas . . . . .	57
5.17	Valores médios de RSSI para diferentes ângulos utilizando o gQ0Q . . . . .	59
5.18	Valores médios de RSSI para diferentes ângulos utilizando o gmta . . . . .	60
5.19	Representação gráfica do resultado do procedimento de mapeamento dos beacons.	63

# Lista de Tabelas

2.1	Comparação de dados entre <i>beacons</i> da Estimote e Kontakt.io. . . . .	8
5.1	Valores de média e desvio padrão na câmara anecóica. . . . .	43
5.2	Valores de média e desvio padrão no exterior. . . . .	43
5.3	Evolução dos resultados de aplicação do filtro de histograma. . . . .	62
5.4	Resultados de aplicação do filtro de histograma com antena 3. . . . .	64
5.5	Resultados de aplicação do filtro de histograma com as 3 antenas . . . . .	64





# Abreviaturas e Símbolos

AoA	Angle of Arrival
BLE	Bluetooth Low Energy
COTS	Commercial Off-The-Shelf
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
LNS	Log-Normal Shadowing
LOS	Line Of Sight
NFC	Near Field Communication
ROS	Robot Operating System
RF	Radiofrequência
RSS	Received Signal Strength
RSSI	Received Signal Strength Indicator
TDoA	Time Difference of Arrival
TOF	Time of Flight
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
WLAN	Wireless Local Area Network



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

A utilização de sistemas robóticos autónomos permite a execução de tarefas outrora destinadas a um ou mais elementos humanos, permitindo períodos de trabalho de duração superior e garantia de maior precisão resultante da utilização de sensores cuja perceção é superior à perceção sensorial conseguida por um ser humano.

Para que o robô consiga total autonomia tanto em contexto *indoor* como *outdoor*, necessita de estar equipado de um sistema de localização que satisfaça os requisitos de precisão, sendo que quanto melhor a qualidade da localização, melhor o desempenho que o robô terá na navegação da sua trajetória.

Para navegação em espaços exteriores, a tecnologia mais frequente é o Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS) que utiliza sinal proveniente de satélites. A qualidade da localização depende, a cada instante, do número de satélites disponíveis e qualidade do sinal proveniente dos mesmos, uma vez que esta pode ser afetada por condições que conduzam à obstrução do sinal, tais como condições meteorológicas, disposição do relevo topográfico ou existência de infraestruturas humanas [1].

Para navegação em espaços interiores, as técnicas usadas passam pela utilização de balizas e marcos artificiais que poderão ser do tipo ativo ou passivo, determinado pela existência de uma fonte própria de energia [2].

Atualmente existem soluções integradas do tipo COTS, que solucionam o problema da conciliação da navegação *indoor* e *outdoor*, sendo uma das dificuldades o equilíbrio entre a qualidade e a custo monetário associados a estes sistemas.

### 1.2 Motivação e Objetivos

A navegação de robôs autónomos no exterior enfrenta algumas dificuldades relativamente à precisão conseguida. A utilização de tecnologia GNSS requer a minimização dos erros de longitude, latitude e altitude bem como a redução do desfasamento temporal entre a emissão do

satélite e a receção do robô. A utilização de fusão de dados com informação proveniente de marcos artificiais permite aumentar a qualidade da estimação de localização baseada em mecanismos GNSS [1].

Neste âmbito, o Centro de Robótica Industrial e Sistemas inteligentes do INESC TEC, desde 2014 delineou uma linha de investigação denominada de robótica para agricultura, de acrónimo AGROB<sup>1</sup>. O AGROB foca-se no desenvolvimento de soluções de robótica para aplicação em contexto de vinha de montanha. Neste momento esta linha conta com 3 plataformas disponíveis: o AGROB V16, AGROB V15, AGROB V14, sendo que, o AGROB V16<sup>2</sup> está a ser desenvolvido de forma modular para a execução de tarefas que vão desde a medição da variabilidade/sensorização/monitorização (em desenvolvimento) a tecnologias de atuação como a pulverização de precisão, poda e colheita (a desenvolver no futuro).<sup>3</sup> Em paralelo o projeto RoMoVi -Robô Modular e Cooperativo para Vinhas de encosta pretende desenvolver máquinas de pequeno/médio porte totalmente autónomas e robustas para diversas tarefas agrícolas, sendo que um dos focos principais serão as vinhas de encosta. Este trabalho de dissertação é desenvolvido no contexto do projeto RoMoVi e linha de investigação apelidada de AGROB. O autor desta dissertação agradece ao projeto ROMOVI pelos dados fornecidos para fins de desenvolvimento desta tese de mestrado. O ROMOVI é um projeto financiado pela comissão europeia no âmbito do programa Portugal 2020 no âmbito do acordo de subvenção número 17945 (ROMOVI), para a Investigação e Desenvolvimento cooperativo.

Na presente dissertação pretende-se desenvolver um sistema de auxílio à localização que seja de baixo custo e adequado à aplicação em contexto de vinha de encosta. Neste sentido serão feitos testes utilizando a tecnologia *iBeacon*, parametrização dos sinais obtidos e avaliação da exatidão do sistema. Os dados registados serão posteriormente disponibilizados através de um *data set* organizado.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

Para além da introdução, esta dissertação contém mais 5 capítulos. No capítulo 2, é feita uma descrição da tecnologia *Bluetooth* e *Bluetooth Low Energy*. É também introduzido o conceito de *iBeacon*, um marcador artificial que utiliza *Bluetooth Low Energy*. No capítulo 3, são apresentadas algumas técnicas para auxílio à estimação de localização utilizando sinais de rádio frequência. Neste capítulo é apresentada uma sucinta análise bibliográfica que inclui documentos onde foi utilizado o *Bluetooth Low Energy* para determinar localização. São apresentados alguns identificadores de desempenho que ajudam a determinar a adequação do sistema para localização no contexto vinícola pretendido. No capítulo 4 fez-se uma descrição do *software* e *hardware* utilizado e desenvolvido. São também apresentadas as configurações dos testes realizados e o seu

---

<sup>1</sup><http://www.agrob.inesctec.pt>

<sup>2</sup><http://agrob.inesctec.pt/>

<sup>3</sup>PRÉMIO "O MELHOR DO PORTUGAL TECNOLÓGICO" ATRIBUÍDO A ROBÔ DO INESC TEC, <https://www.inesctec.pt/crob/noticias-eventos/noticias/premio-o-melhor-do-portugal-tecnologico-atribuido-a-robo-do-inesc-tec>

propósito. No capítulo 5 é feita toda a análise dos resultados obtidos. No capítulo 6 são expostas as conclusões e sugestões para trabalho futuro.



## Capítulo 2

# Protocolos *Bluetooth*

### 2.1 Introdução

O *Bluetooth* é uma tecnologia sem fios que utiliza ondas de rádio para estabelecer comunicações e troca de dados entre dispositivos. A comunicação entre dispositivos utilizando esta tecnologia caracteriza-se por ser de curto alcance, sendo o valor comum de funcionamento inferior a 20 metros. Utiliza ondas UHF (*Ultra High Frequency*) da banda ISM (*Industrial, scientific and medical radio bands*), sendo que a sua banda de funcionamento se encontra entre os valores de 2000 a 2485MHz<sup>1</sup>. Em 2006 a Nokia desenvolveu o Wibree que mais tarde deu origem ao *Bluetooth Smart*, sendo em 2010 integrado na norma *Bluetooth* com a adoção do *Bluetooth Core Specification Version 4.0*<sup>2</sup>. O *Bluetooth Smart* inclui os protocolos de *Bluetooth* clássico, *Bluetooth high speed* e *Bluetooth Low Energy*.

### 2.2 *Bluetooth Low Energy*

O BLE (*Bluetooth Low Energy*) foi concebido com o intuito de minimizar o consumo energético associado às transmissões de dados entre dispositivos. Este sistema assenta sobre a utilização do GATT (*Generic Attribute Profile*), uma *framework* que determina como são transmitidos os dados entre dispositivos BLE utilizando o conceito de Serviços e Características. Num dispositivo BLE, os dados organizam-se em serviços e cada serviço possui as suas características. O protocolo ATT (*Bluetooth Low Energy*) ocupa-se da gestão dos dados, armazenando os serviços, características e dados associados. A utilização do GATT remete para a existência de relações servidor/cliente ou escravo/mestre. O dispositivo periférico, que é de baixo consumo, toma o papel de servidor, possuindo os dados e definições de serviços e características, e o dispositivo central (poderá ser um *smartphone*) toma o papel de cliente<sup>3</sup>. Durante uma conexão GATT, o periférico BLE apenas se consegue conectar a um dispositivo central. Ao contrário do *Bluetooth* clássico, o BLE possui um modo de transmissão designado por *advertising mode*. Neste modo, o dispositivo envia tramas

---

<sup>1</sup><https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>.

<sup>2</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth\\_Low\\_Energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_Low_Energy).

<sup>3</sup><https://learn.adafruit.com/introduction-to-bluetooth-low-energy/gatt>.

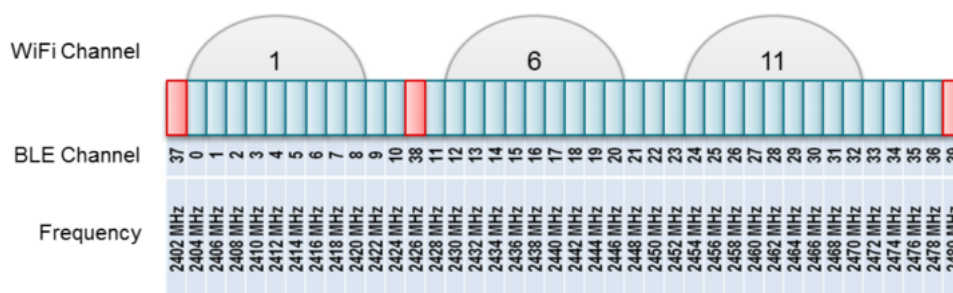


Figura 2.1: Banda de frequência e canais do Bluetooth Low Energy.

Fonte: Joakim Lindh. Bluetooth low energy beacons, Janeiro 2015. Texas Instruments Application Report.

com informação que pode ser recebida por qualquer dispositivo que se encontre dentro do alcance da transmissão. Este modo permite o envio de mensagens idêntico a um *broadcast* sem necessitar do conhecimento dos nós destinatários. No processo de comunicação BLE, o modo de *advertising* é necessário para detetar um periférico com o qual se pretenda estabelecer uma comunicação. No entanto, a utilização deste modo só por si abre espaço para a implementação de *beacons* BLE [3]. O ponto forte do BLE é não necessitar de emparelhamento para transmissão de dados.

Diferentemente do Bluetooth clássico que utiliza 79 canais espaçados de 1 MHz, o BLE utiliza 40 canais com intervalos de 2 MHz. Dos 40 canais utilizados no BLE, 3 destes, os canais 37, 38 e 39 são utilizados para transmissão de pacotes de *advertising*, enquanto os restantes são utilizados para troca de dados durante uma conexão<sup>4</sup>. Os canais de *advertising* foram dispostos ao longo do espectro de acordo com a figura 2.1, apresentada no relatório de aplicação da Texas Instruments [4] assinalados a cor vermelha. A distribuição apresentada no espectro foi projetada para minimizar a interferência causada por outros protocolos sem fios que ocupam a banda 2.4GHz ISM tal como o WI-FI e Bluetooth clássico. Apesar da disposição minimizar a obstrução dos canais utilizados para *advertising*, a proximidade de redes WI-FI, uma vez funcionando a valores de potência relativamente superiores ao BLE, podem afetar significativamente a transmissão de pacotes.

### 2.3 *iBeacon*

O termo *iBeacon* é comumente associado a um marcador artificial (do inglês *beacon*) caracterizado por adotar a tecnologia de comunicação BLE, podendo posteriormente ser utilizado em aplicações de localização com dispositivos que utilizem a mesma tecnologia. O termo *iBeacon* é o nome dado ao protocolo desenvolvido pela Apple e apresentado em 2013<sup>5</sup>. A tecnologia possui como conceito a existência de *beacons* que funcionam como periféricos BLE e transmitem quase exclusivamente pacotes de *advertising*. Estes pacotes contêm o identificador do *beacon*, o

<sup>4</sup><http://www.argenox.com/a-ble-advertising-primer/>.

<sup>5</sup><https://en.wikipedia.org/wiki/IBeacon>.



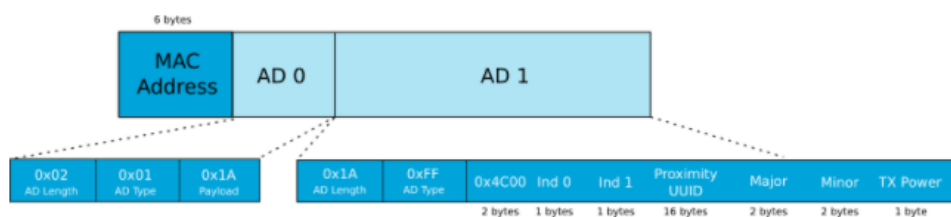


Figura 2.2: Formato de uma trama iBeacon

Fonte: <http://www.argenox.com/a-ble-advertising-primer/>

que permite ao dispositivo central reagir de diferente modo aos diferentes *beacons* ou utilizar a informação de diferentes *beacons* para localização<sup>6</sup>. Os *ibeacons* BLE utilizam o formato BLE na construção dos seus pacotes com a adição de alguns campos específicos. O formato típico pode ser observado na figura 2.2 que se encontra disponível *online*<sup>7</sup>. De entre os campos representados na figura existem quatro que se destacam no protocolo *iBeacon*<sup>8</sup>:

- **UUID** — *String* de 16 bytes que é comum a um conjunto de *beacons* de uma mesma rede;
- **Major** — *String* de 2 bytes que pode ser partilhada apenas por um subconjunto de *beacons* de uma mesma rede;
- **Minor** — *String* de 2 bytes que deve ser usada como identificador individual de um *beacon* no seio da sua rede;
- **Tx Power** — Valor caracterizado por representar a potência do sinal a 1 metro de distância do *beacon* para efeitos de calibração, sendo este valor definido pelo fabricante previamente.

### 2.3.1 Mercado de *iBeacons*

A tecnologia *ibeacon* encontra-se em crescimento enquanto mercado. Derivado do número de aplicações da tecnologia, não só a nível de localização como no sector do retalho, surgem novas aplicações e oportunidades. Na atualidade, já existem vários fabricantes de *beacons*<sup>9</sup> e, seguidamente, serão abordados apenas dois: a Estimote<sup>10</sup>, que é atualmente o fabricante mais conhecido e a Kontakt.io<sup>11</sup>, que, para além de ser uma das mais recomendadas, é também a marca utilizada no estudo da presente dissertação. Efetuando uma análise comparativa das duas marcas, podem-se obter os seguintes resultados:

Como se pode observar na tabela 2.1 não existe uma diferença notória entre as marcas de *beacons*. Ambas as marcas possuem outros modelos que podem ter alguns parâmetros bastante

<sup>6</sup><https://developer.apple.com/ibeacon/>.

<sup>7</sup><http://www.argenox.com/a-ble-advertising-primer/>.

<sup>8</sup><http://www.ibeacon.com/what-is-ibeacon-a-guide-to-beacons/>.

<sup>9</sup><https://www.nodesagency.com/list-9-biggest-beacon-manufacturers/>.

<sup>10</sup><http://estimote.com/>.

<sup>11</sup><https://kontakt.io/>.

	Estimote	Kontakt.io
Duração da bateria (configuração standard)	2 anos	2 anos
Alcance máximo	70 metros	70 metros
Pacotes	iBeacon™ + Eddystone™	iBeacon™ + Eddystone™
Preço (3 beacons)	59 \$	60 \$

Tabela 2.1: Comparação de dados entre *beacons* da Estimote e Kontakt.io.

otimizados a troco de um aumento no custo, ou mesmo modelos que apresentam características mais simples a um valor mais económico.

## 2.4 Resumo

Este capítulo teve como objetivo apresentar a noção de *Bluetooth Low Energy* e o conceito de *iBeacon*. Após esta análise, conclui-se que a tecnologia *iBeacon* encontrou um mercado com probabilidades de expansão. Esta é uma solução válida em aplicações de localização. Apesar de não apresentar garantias de precisão, o seu intervalo de preços torna interessante a sua integração numa solução de localização.

## Capítulo 3

# Localização

### 3.1 Introdução

A maioria dos mecanismos e técnicas de localização utilizam sinais como base. Estes sinais podem ser de diferentes naturezas como luminosos, sonoros ou rádio frequência. No âmbito desta dissertação, as técnicas que envolvem rádio frequência apresentam maior relevância, uma vez que o sinal BLE se enquadra nesta categoria. De um sinal RF é possível utilizar alguma informação para obter a localização. As técnicas que recorrem a este tipo de sinal utilizam informações como a potência do sinal recebido (RSS), o ângulo de incidência (AOA) ou o tempo de voo (TOF). Neste capítulo serão abordadas algumas das técnicas de localização com recurso a sinais RF, fazendo referência a alguns documentos que foram considerados relevantes para a presente dissertação. Por fim, será apresentado um conjunto de tópicos que permitem avaliar a qualidade e pertinência de um sistema de localização baseado em sinal RF.

### 3.2 Técnicas de Auxílio à Estimação de Localização

#### 3.2.1 RSSI

RSSI é uma sigla idêntica a RSS que significa *Received Signal Strength Indication*, que corresponde à medida de potência do sinal recebido. A potência de um sinal apresenta um decaimento exponencial em função da distância, o que permite estabelecer relações de RSS com distância. Este decaimento ou atenuação é conhecido como *Path Loss*. O *Path Loss* é normalmente expresso em dB e é possível a sua obtenção através da equação 3.1. PL é o decaimento da potência do sinal RF que se propaga no espaço,  $P_t$  é a potência do sinal à saída da antena do transmissor e  $P_r$  é a potência do sinal na entrada da antena do recetor, ou seja, o RSS.

$$PL_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_t}{P_r} \right) \quad (3.1)$$

A utilização destes modelos permite obter estimativas da distância ao emissor através do RSS. A relação mais simplista para estimar a distância consiste na comparação da evolução do valor RSS, sendo que consoante o valor aumente ou diminua, o utilizador pode estimar que se aproxima ou afasta do emissor de sinal. Algumas das técnicas de localização que utilizam a medida de potência do sinal recebido são apresentadas de seguida.

- **LNS** — O modelo *Log-Normal Shadowing* é utilizado para descrever a propagação do sinal e não uma técnica de localização por si só. O modelo encontra-se representado na equação 3.2.  $P_d$  é a potência na entrada da antena do recetor quando este se encontra a uma distância  $d$  do transmissor,  $P_0$  é a potência a uma distância de referência  $d_0$  e  $X$  é uma variável aleatória de distribuição normal de média nula representativa do erro de medição em dBm. O parâmetro  $P_0$  pode ser influenciado por fatores como a orientação da antena dos elementos envolvidos podendo, deste modo, variar de aplicação para aplicação [5];

$$P_d = P_0 - 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X \quad (3.2)$$

- **Trilateração** — A trilateração é uma técnica de localização bastante utilizada. A partir da estimativa de distância do recetor aos transmissores, e conhecendo as posições dos transmissores, o processo de localização passa por utilizar os raios em torno dos transmissores com o valor de distância obtida pelo cálculo de RSS e, de seguida, intercetar as superfícies esféricas descritas pelos respetivos raios. A partir das interseções, obtidas é possível obter uma estimativa da posição. A utilização deste método necessita apenas da existência do modelo de obtenção da distância em função do RSS como o LNS.

### 3.2.2 Ângulo de Incidência

A utilização do ângulo de incidência (*Angle of Arrival*) implica que o recetor possua meios de determinar o ângulo com que o sinal lhe chega do transmissor. O dispositivo recetor tem de ter conhecimento do referencial para relacionar a orientação. Para determinar o AoA (*Angle of Arrival*), o recetor pode utilizar, por exemplo, antenas direcionais ou um *array* de antenas. Uma vez sabendo o AoA, a técnica mais comum a aplicar será a triangulação. A triangulação tira partido do conhecimento do ângulo descrito entre os *beacons* e o robô, e sabendo a posição dos *beacons* consegue determinar a posição relativa do robô.

### 3.2.3 Tempo de Voo

Outra informação que se pode utilizar para determinar a distância do recetor ao nó consiste no tempo de voo ou *Time of Flight* (ToF). Conhecendo o tempo de propagação de um sinal eletromagnético entre dois nós, é possível estimar a distância entre ambos. O tempo de viagem consiste na diferença entre a hora de envio e a de chegada do sinal de resposta, sendo necessário conhecer o tempo de processamento do nó oposto. É portanto, importante, garantir a sincronização dos

relógios do transmissor e receptor. Para ultrapassar esta dificuldade, existe o *Time difference of Arrival* (TDoA) que utiliza a diferença entre o tempo de chegada do sinal proveniente de pares de sensores, implicando apenas que o par de sensores tenha os seus relógios sincronizados.

### 3.2.4 Filtros

A utilização de filtros para estimar a localização de um robô é uma abordagem que possui vantagens quando existem variáveis que dificilmente se conseguem determinar, não existindo um modelo suficientemente apurado. Um dos filtros mais utilizados neste contexto é o filtro de partículas. Os filtros de partículas muitas vezes funcionam com base em informação proveniente de técnicas como a trilateração, produzindo resultados aprimorados quando combinados. O filtro utiliza as observações, como medidas RSS, e atualiza os pesos associados a cada partícula de acordo com a probabilidade de se encontrar disposta na localização correta. São atribuídos pesos diferentes às partículas confrontando os valores das partículas com as variáveis observáveis. A evolução destes pesos irá definir que partículas deixarão de contribuir para a estimação.

### 3.2.5 Fingerprinting

*Fingerprinting* é um termo que traduzido do inglês simboliza a impressão digital. Mais especificamente, é uma abordagem que divide o mapa em grelhas e possui uma fase de treino e a fase de execução. Durante a fase de treino o robô desloca-se nas diferentes posições da grelha e regista as observações à posição. Estas observações podem ser por exemplo o RSS. Após associar as observações às diferentes posições da grelha, é criada uma base de dados. Durante a fase de execução decorre o processo de localização. A localização é feita comparando as observações com os valores registados na base de dados.

### 3.2.6 Células

O posicionamento baseado em células consiste numa fase de treino em que o robô regista os *beacons* detetados num determinado segmento do mapa numa base de dados. Na fase de localização o robô deteta os *beacons* e guarda a sua identificação, fazendo de seguida uma comparação das localizações obtidas e um *matching* com a base de dados para obter a melhor compatibilidade.

## 3.3 Análise Bibliográfica

No contexto da presente dissertação é relevante referir alguns dos autores consultados em projetos idênticos e quais as suas abordagens. Nesse sentido, este subcapítulo apresentará uma breve análise bibliográfica que indica técnicas e considerações acerca do trabalho de outros autores.

Em [3], o autor propôs uma fase de calibração dos parâmetros de *Path Loss* no início do processo de localização. Utilizou métodos *Bayesianos* e estatísticos para determinar a localização e um filtro de partículas para estimar os parâmetros do modelo de atenuação do sinal, de modo a reduzir o esforço na caracterização do sinal. O autor referiu ainda que a orientação da antena foi

um fator condicionante na precisão geral do modelo uma vez que o padrão de radiação da antena varia com a orientação e não foi modelada essa componente.

Em [6] o autor concluiu que BLE pode ser utilizado em aplicações que necessitem de baixa precisão. Justificou afirmando que segundo os seus dados existe falta de relação entre o RSS e a distância. O autor referiu a importância de considerar o ângulo devido ao ganho da antena. Para localização utilizou uma combinação de trilateração com filtro de partículas.

A dissertação [7] é precedente à presente dissertação. Na mesma o autor refere ter utilizado principalmente multilateração para determinar a localização. O autor participou ainda na composição do artigo [8] no qual os autores referem a abordagem utilizando um *occupancy grid map* que consiste em atribuir a localização mais provável de um *beacon* enquanto o robô se desloca pelo mapa e regista diferentes observações.

Em [9] o autor refere que a utilização de filtros de kalman deixa de ser ótima quando se aplica a sistemas não lineares ou com ruídos não gaussianos. Como alternativa o autor sugere a utilização de um filtro de partículas que revela melhor desempenho. O autor afirma que os parâmetros do filtro exigem maior ajuste à aplicação específica do que um filtro de kalman, sendo esse o único ponto onde o desafio poderá ser superior.

Em [10] o autor utilizou a tecnologia Bluetooth para desenvolver uma pulseira com o propósito de localizar crianças. A abordagem não requeria de grande precisão, tendo o autor utilizado o simples conceito de proximidade, atribuindo a localização mais provável à do *access point* (AP) detetado como mais próximo do protótipo.

Em [11] o autor apresenta uma solução baseada na tecnologia NFC e Wi-Fi para localização utilizando uma técnica baseada em *fingerprinting*. O treino do modelo é feito com o auxílio dos utilizadores da rede utilizando os seus dispositivos móveis na proximidade de tags NFC e QR-code. Esta dissertação auxiliou a compreensão do método de *fingerprinting*.

Em [12] os autores utilizam a mesma tecnologia disponibilizada para a presente dissertação. No artigo os autores afirmam ter utilizado multilateração associada com filtros de Kalman, Histograma e Partículas. Este artigo foi importante para a compreensão do funcionamento do filtro de partículas e ter conhecimentos acerca da associação de filtro de partículas e histograma para otimizar a estimativa de posicionamento.

Em [13] os autores apresentam uma estratégia de fusão de ToF com RSSI como observações do sinal. Os parâmetros do modelo de Path Loss foram estimados com recurso a um filtro de Kalman estendido. O algoritmo foi desenvolvido para localizar equipas de robôs cooperativos.

Em [14] o autor aborda os aspetos relacionados com a localização *indoor* recorrendo a medidas de potência de sinal. Alguns ensinamentos adquiridos deste artigo relacionam-se com os fatores que o autor afirma terem maior relevo na qualidade do posicionamento. Em primeiro lugar o autor refere a qualidade da regressão analítica, em segundo o número de AP's e o seu posicionamento, por último a relação geométrica entre a posição do recetor e os AP's. O autor afirma que uma abordagem baseada em RSS pode de facto melhorar o desempenho do GPS na localização *outdoor*.

Em [15] os autores apresentam uma abordagem inovadora baseada em *fingerprinting*. A sua abordagem passa por utilizar distribuições probabilísticas baseadas em RSS para o canal ruidoso e reduzir o custo computacional do algoritmo fazendo proveito do *clustering* de localizações.

Em [16] os autores apresentam uma abordagem utilizando *fingerprinting* baseados em diferentes tipos de redes como WLAN, GSM e UMTS. Para estimar a posição foram testados os algoritmos *k-nearest neighbor*, redes neuronais, abordagem com filtros Gaussianos e de histograma. O ponto forte deste artigo foi o reduzido peso computacional do algoritmo utilizado quando comparado com estratégias idênticas.

Em [17] os autores propõem um simples modelo de localização *indoor* baseado em *fingerprinting*, utilizando modelos de funções de densidade probabilística. Utiliza o Bluetooth clássico, apesar de afirmar que não tem grande precisão o autor confirma a possibilidade de integrar o Bluetooth clássico num sistema de localização.

Em [18] os autores afirmam que a utilização de métodos clássicos como trilateração para localização com Bluetooth clássico é obsoleta e não consegue ter precisão necessária. Como tal os autores propõem uma abordagem com recurso a múltiplas redes neuronais. A rede neuronal que apresentar maior adequação é selecionada e carregada para o sistema dependendo da orientação do utilizador que é determinada com uma bússola. O objetivo deste passo é ultrapassar a interferência do ser humano na localização uma vez que causa obstrução do sinal enquanto se desloca com o dispositivo.

Em [19] os autores apresentam um artigo que avalia a fiabilidade e adequação de um sistema baseado em RSSI para localização *indoor*. O autor conclui que as medidas de RSSI não são confiáveis se forem utilizadas como únicos dados de observação para uma estratégia de localização.

Em [20] o autor apresenta um estudo que visa otimizar o processo de posicionamento dos beacons de modo a potenciar a qualidade dos resultados obtidos.

Em [21] o autor propõem um método de fusão Bayesiana da informação proveniente das medidas de RSSI com um modelo de deslocamento do dispositivo a localizar. Para obter a estimativa de localização foi utilizado *fingerprinting*. O erro estimado obtido encontra-se em torno dos 4.7 metros.

Em [22] os autores introduzem uma rede de sensores Bluetooth para localização utilizando um algoritmo de filtro Bayesiano. Os autores criaram também um algoritmo de filtro de partículas baseado na dinâmica de movimento humano e os resultados obtidos foram superiores a avanços idênticos no momento do desenvolvimento.

Em [23] os autores utilizaram a tecnologia Bluetooth e apresentaram um modelo com grande precisão para este tipo de tecnologia. Os autores compararam métodos como trilateração e trilateração iterativa com um filtro de partículas. Dos dados necessários apenas destaca a necessidade de conhecimento da posição dos *beacons*. Os autores conseguiram resultados bastante positivos tendo obtido no final dos seus testes um erro médio de 0.427 metros com desvio padrão de 0.229 metros. Os autores destacam a melhoria do desempenho com o incremento do número de beacons disponíveis.

Em [24] os autores estudaram a utilização de beacons BLE para posicionamento baseado em *fingerprinting* e modelação do meio de navegação utilizando técnicas de simulação de Monte Carlo com uso de filtro de partículas.

Em [25] o autor aborda estratégias que almejam a micro-localização, localização que se caracteriza por estimar a posição com elevada precisão. Uma vez que se trata de tecnologia BLE o autor procura ultrapassar os desafios inerentes ao BLE que impedem a obtenção de estimativas precisas. A abordagem consiste principalmente na utilização de filtros de partículas para aumentar a precisão em ambiente *indoor*. O sistema proposto pelos autores afirma-se como conseguindo produzir estimativas de localização com erros na ordem dos 0.27 metros. Algumas informações importantes a reter consistem no posicionamento recomendado dos beacons ser a altitudes superiores de modo a evitar obstáculos. O espaço de navegação não deverá ter um número excessivo de beacons, uma vez que estes poderão interferir entre si. Os autores propõem a exploração de filtros de partículas autonomamente adaptativos para melhorar a precisão da localização no futuro.

### 3.4 Indicadores de Desempenho

Para avaliar a pertinência de uma tecnologia a ser utilizada em localização são necessários alguns parâmetros a verificar. Baseado na literatura analisada [6], [3] e [5] foram determinados alguns parâmetros que devem ser considerados quando se pretende validar uma tecnologia como o BLE. Os parâmetros destacados como mais importantes de verificar foram:

- **Exatidão** — A exatidão é o parâmetro relacionado com o erro de localização. A quantificação deste parâmetro é usualmente feita com o erro médio de posicionamento e o desvio padrão. A média do erro resulta da média da distância Euclidiana entre a posição estimada e a posição real. O parâmetro afeta a qualidade do método na medida em que quanto maior a exatidão melhor a localização;
- **Precisão** — A precisão complementa a exatidão considerando a variância das distâncias entre pontos medidos e ponto de referência. A precisão relaciona-se com a repetibilidade das medidas serem afetadas sempre do mesmo modo;
- **Complexidade** — A complexidade do sistema tem influência no custo de implementação envolvido. Relativamente a *hardware*, quanto maior a complexidade, mais dispendiosa se torna a implementação. Em termos de *software* a complexidade implica maior custo de processamento o que pode conduzir a atrasos nos tempos de processamento e causar um mau desempenho a nível de algoritmia.
- **Complexidade de calibração** — A complexidade de calibração remete ao esforço envolvido na configuração do sistema para iniciar o seu funcionamento. Um sistema BLE deve ser de fácil instalação uma vez que os *beacons* são facilmente transportáveis e reajustáveis;



- **Tempo de resposta** — O tempo de resposta consiste em determinar quão responsivo o sistema é. Este parâmetro influencia a qualidade da estimativa de posicionamento em tempo real. Para um sistema de localização a taxa de atualização do sistema deve ser elevada.
- **Escalabilidade** — A escalabilidade é o parâmetro usado para avaliar a dificuldade requerida para expandir a dimensão da implementação. Idealmente a implementação deverá ser expansível. Num sistema BLE a expansão pode implicar o aumento do número de *beacons* ou o número de utilizadores do sistema de localização;
- **Robustez e adaptabilidade** — A robustez do sistema consiste na avaliação da qualidade do desempenho quando as condições não são ideais. Isto pode significar a indisponibilidade de obter o sinal proveniente dos *beacons* ou acesso a outros recursos. Quanto melhor for o desempenho do sistema quando afetado deste modo, maior a sua robustez a imprevistos. A adaptabilidade consiste na capacidade do sistema se adaptar a alterações ao meio em que se encontra. No caso de um sistema de localização este pode necessitar de se adaptar à reconfiguração por introdução de obstáculos como plantas ou pessoas. A possibilidade de alterar a instalação do sistema para um novo local sem necessitar de excessiva calibração e sem verificar um impacto elevado no seu desempenho consiste num exemplo de adaptabilidade.

### 3.5 Resumo e Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas algumas metodologias de localização tendo como observação um sinal RF. A exploração de técnicas de localização foi importante no desenvolvimento da dissertação de modo a possibilitar uma escolha mais bem fundamentada relativamente à abordagem. Por outro lado, é importante transmitir as noções essenciais das técnicas de localização, pois serão feitas referências às mesmas nos capítulos seguintes.

Embora de forma sucinta, foi apresentada uma análise bibliográfica que se tornou relevante na medida em que a sua análise permitiu conhecer os avanços atuais relativamente à localização baseada em BLE. A grande maioria dos documentos revistos utilizaram BLE como tecnologia base. A análise bibliográfica efetuada permitiu ainda estabelecer uma evolução cronológica e perceber a evolução nas abordagens que utilizam sinal RF. Relativamente a este último ponto, a abordagem mais popular entre os autores foi o filtro de partículas. Esta escolha é justificada com a facilidade de implementação e com o desempenho apresentado para modelos não lineares que possuem alguns parâmetros de difícil determinação. Alguns dos mais recentes trabalhos sugerem a utilização de redes neuronais para calibração dos parâmetros do modelo de propagação do sinal RF e para estimação do posicionamento, apresentando valores mais reduzidos de erro médio de posicionamento quando comparados a trabalhos anteriores.

No final do capítulo foram apresentados alguns parâmetros que exercem peso na validação do método. Estes parâmetros foram classificados como indicadores de desempenho e serão considerados para concluir a adequação das técnicas adotadas na presente dissertação.



## Capítulo 4

# Sistema de Localização

### 4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos implementados para a realização dos testes. O capítulo aborda o *software* e *hardware* utilizados no desenvolvimento. Ainda no presente capítulo são descritos os testes efetuados, as configurações escolhidas e respectivas justificações.

### 4.2 *Software*

Neste subcapítulo serão descritas as ferramentas de *software* utilizadas bem como o código produzido utilizando as mesmas.

#### 4.2.1 ROS

ROS (*Robot Operating System*)<sup>1</sup> é uma *framework* para desenvolvimento de *software* de robótica. ROS consiste num compêndio de bibliotecas, ferramentas e outros recursos que visa facilitar a criação de comportamentos complexos alcançando uma vasta gama de plataformas robóticas distintas. Uma das características vantajosas do ROS é a contribuição da sua comunidade. A partilha de contribuições permite a utilização de bibliotecas reduzindo o esforço individual de cada projeto. A versão utilizada para o desenvolvimento do trabalho da presente dissertação foi o ROS *indigo*. A escolha da versão prende-se com questões de retro-compatibilidade uma vez que o trabalho previamente desenvolvido neste projeto foi desenvolvido em ROS *indigo*.

O ROS possui uma arquitetura caracterizada por ser distribuída e modular. Estas qualidades permite ao utilizador determinar a dimensão de ROS que pretendem usar na sua aplicação, bem como desenvolver novos módulos personalizados para a sua aplicação que facilmente serão integrados com os restantes já existentes. Atualmente o ROS conta com cerca de 3.000 pacotes disponíveis que resultam de contribuições públicas da comunidade. Um dos serviços disponibilizados nas bibliotecas ROS é o serviço de mensagens que possibilita a utilização de mensagens

---

<sup>1</sup><http://www.ros.org>.

*standard* ou a criação de mensagens customizadas. As mensagens são utilizadas para trocar informação entre os diferentes programas que correm em ROS. De modo a compreender como funciona a existência destes programas e a interação entre programas diferentes, acedendo à página de tutoriais<sup>2</sup> ROS é possível realçar alguns conceitos:

- **Pacotes** — O *software* desenvolvido em ROS organiza-se em pacotes. Os pacotes são módulos que podem conter nós, bibliotecas independentes, *datasets*, ficheiros de configuração, elementos de *software* de terceiros, entre outros elementos que constituem o módulo. Os pacotes constituem a unidade base de compilação;
- **Nós** — Os nós são processos em ROS que executam computação, funcionando como programas. Os nós comunicam entre si através da publicação e subscrição de mensagens, serviços e através do *Parameter Server*. Um sistema robótico em execução utiliza um conjunto de nós que cooperam para o seu funcionamento. A arquitetura distribuída de ROS permite que os nós em execução não necessitem de operar no mesmo equipamento, possibilitando a simbiose de diferentes plataformas comunicando entre si. O nó mestre pertence ao conjunto de nós lançado pelo *roscore*, e tem a função de possibilitar aos nós que se localizem uns aos outros permitindo o estabelecimento de comunicações;
- **Tópicos** — Os tópicos são os recipientes através dos quais os nós trocam mensagens entre si. Os tópicos utilizam um modelo de publicação/subscrição que separa a produção de informação do seu consumo. Os nós não têm conhecimento de outros nós que publiquem determinado tópico ou o subscrevam. Um nó apenas necessita de subscrever os dados específicos a um tópico ou de publicar dados num tópico específico. A estrutura permite a existência de múltiplos publicadores e subscritores associados a cada tópico;
- **Serviços** — A unidirecionalidade existente no modelo publicador/subscritor não possibilita interações do tipo "pedido/resposta". Para possibilitar este tipo de interações existem os serviços em ROS. Um serviço é composto por um par de mensagens, uma mensagem definida para o pedido e outra para a resposta. Um nó pode oferecer um serviço ativado por um nó cliente ao submeter a mensagem de pedido.

O ROS permite a gravação de dados de mensagens de tópicos publicados em tempo real. Esta ação é conseguida utilizando o comando "rosbag record" que irá gerar um ficheiro com a extensão '.bag'. Estes ficheiros podem posteriormente ser reproduzidos com o comando "rosbag play" e reproduzir as mensagens gravadas dos tópicos. A utilização de rosbags possibilita a realização de testes aos sistemas em modo *offline*.

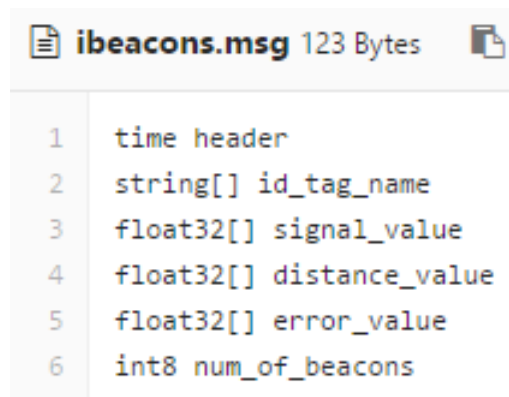
A biblioteca de ROS suporta o desenvolvimento ROS em linguagem C++<sup>3</sup> e Python<sup>4</sup>.

---

<sup>2</sup><http://wiki.ros.org/ROS/Tutorials/>

<sup>3</sup><http://www.cplusplus.com/>

<sup>4</sup><https://www.python.org/>



```

ibeacons.msg 123 Bytes
1  time header
2  string[] id_tag_name
3  float32[] signal_value
4  float32[] distance_value
5  float32[] error_value
6  int8 num_of_beacons

```

Figura 4.1: Formato da mensagem ibeacon.msg

## 4.2.2 Desenvolvimento em ROS

### Nó "blefinder"

Para o tema da dissertação foi necessário desenvolver um nó em ROS. A função requerida para este nó consiste em calcular o valor de RSS do sinal BLE, determinar a distância e publicar num tópico, utilizando um formato de mensagem customizada, as informações de *timestamp* do envio da mensagem, um *array* de *strings* contendo os id's das *tags* BLE detetadas, um *array* contendo os valores de RSS para cada *tag* BLE, um *array* com o valor de distância estimada para cada valor de RSS observado, um *array* com os erros associados a cada distância calculada e por fim um inteiro com o número de *tags* BLE observadas cuja informação da mensagem se refere. O formato da mensagem é o representado na figura 4.1 com a informação descrita anteriormente.

O formato da mensagem "ibeacon.msg" foi criado no contexto da dissertação [7]. É portanto necessário criar um nó que publique a mensagem no formato "ibeacon.msg" por motivos de compatibilidade com os nós já produzidos para processar os dados.

Inicialmente foi realizada uma pesquisa com o intuito de descobrir se existia alguma fonte pública que disponibilizasse código desenvolvido no sentido de calcular o valor de RSS de um sinal proveniente de uma *tag* BLE. No *website* da SwitchDoc Labs<sup>5</sup> foi feita uma publicação apresentando um projeto em que os autores necessitaram de desenvolver um *script* para detetar as tramas de *advertising* provenientes de *tags* BLE. O código desenvolvido consiste em criar uma *thread* que utiliza um dispositivo que suporte a norma BLE para executar um *scan* e captura de pacotes BLE. O *script* processa as tramas recebidas no *buffer* do dispositivo de captura, registando o endereço MAC, o UUID, o *Major*, o *Minor*, o *TxPower Level* e o valor de RSSI. Posteriormente a informação é concatenada e publicada como *output* no formato de *string*. Os autores disponibilizaram o código desenvolvido através de um repositório alojado na plataforma GitHub<sup>6</sup>.

<sup>5</sup><http://www.switchdoc.com/2014/08/ibeacon-raspberry-pi-scanner-python/>

<sup>6</sup><https://github.com/switchdoclabs/iBeacon-Scanner->

```
-----  
RSSI: -75 Dongle: 1  
Distance: 0.885727392991  
-----  
RSSI: -72 Dongle: 2  
Distance: 0.777056266934  
-----  
RSSI: -76 Dongle: 1  
Distance: 0.937676739431  
-----  
RSSI: -71 Dongle: 2  
Distance: 0.752595494261  
-----  
RSSI: -76 Dongle: 1  
Distance: 0.937676739431  
-----  
RSSI: -71 Dongle: 2  
Distance: 0.752595494261  
-----
```

Figura 4.2: Exemplo de output intermédio do script.

O código referido foi selecionado para utilizar como base para desenvolvimento do nó em ROS uma vez que contém a funcionalidade desejada, encontra-se bem estruturado e a linguagem utilizada é Python, uma das linguagens compatíveis com o desenvolvimento em ROS.

Para utilizar o código foi necessário instalar a biblioteca "blueZ" que é uma biblioteca de Bluetooth para Linux. Os passos seguidos para proceder a esta instalação estão disponíveis no guia da página da SwitchDoc Labs, cuja hiperligação se encontra em nota de rodapé.

Inicialmente não existia acesso a adaptadores (*dongles*) Bluetooth 4.0. A utilização de uma Raspberry Pi 3 foi selecionada uma vez que permite a instalação de um ambiente Linux com compatibilidade ROS Indigo, blueZ e Bluetooth 4.0, utilizando a antena nativa integrada na placa da Raspberry Pi 3.

As primeiras alterações exercidas no código consistiram em efetuar o cálculo da distância utilizando os valores de RSSI e permitir a captura em simultâneo por dois dispositivos, que neste caso seriam a antena interna da Raspberry e o primeiro adaptador USB (CSR 4.0) a ser adicionado ao sistema. Um exemplo do *output* obtido pode ser observado na figura 4.2 onde se observa que cada conjunto de dados apresentados refere que *dongle* realizou a captura, qual o valor de RSSI obtido e a respetiva distância estimada. No exemplo referido o *Dongle 1* era a antena da Raspberry e o *Dongle 2* um adaptador USB. O valor da distância foi calculado utilizando a fórmula apresentada no artigo [8] uma vez que os autores utilizaram a mesma tecnologia e para a presente dissertação não existia ainda um modelo de propagação do sinal.

O passo seguinte consistiu na criação do nó ROS. Para isto foi criado um pacote denominado "agrob\_beacon\_detector". O nó criado foi denominado "blefinder". O formato de mensagem foi configurado para ser compatível com o formato ibeacon.msg. O código da SwitchDoc Labs realizava o passo de *scan* dos pacotes BLE em conjuntos de 10 pacotes, apresentando os dados de saída referentes a esses mesmos 10 pacotes. Esta característica implica que seja necessário o *buffer* do dispositivo de captura capturar exatamente 10 pacotes, ficando a informação dos dados

```

header:
secs: 1489577211
nsecs: 84640979
id_tag_name: ['26054', '43947', '64416', '53404', '46124', '40350', '10854', '26054', '43947', '64416']
signal_value: [-71.0, -76.0, -57.0, -76.0, -77.0, -62.0, -82.0, -82.0, -66.0, -42.0]
distance_value: [0.7525954842567444, 0.937676727771759, 0.6506209373474121, 0.937676727771759, 1.0, 0.6607357859611511, 1.545608639717102,
1.545608639717102, 0.6824291348457336, 0.6465902328491211]
error_value: [0.7525954842567444, 0.937676727771759, 0.6506209373474121, 0.937676727771759, 1.0, 0.6607357859611511, 1.545608639717102,
1.545608639717102, 0.6824291348457336, 0.6465902328491211]
num_of_beacons: 7

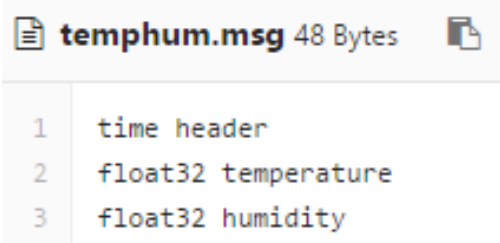
```

Figura 4.3: Exemplo de output no formato `ibeacon.msg`.

de processamento dos mesmos retida até então. A figura 4.3 apresenta o *output* obtido nesta fase, sendo o valor de erro apresentado apenas uma repetição dos dados de distância. A repetição dos dados prende-se com a necessidade de preenchimento dos campos da mensagem e a inexistência de uma modelação do erro que posso ser implementada no nó ROS à data da redação da presente dissertação. Este modo de funcionamento não é complacente com a necessidade de atualização de dados num sistema de localização. Como tal foi necessário alterar o código. A alteração introduzida prevê que quando invocada a função de *scan* que todos os pacotes que se encontrem no *buffer* do dispositivo sejam processados e o resultado seja retornado o mais imediatamente possível.

A implementação do código deve permitir que este seja o mais flexível possível. Neste sentido o código foi adaptado para que o utilizador possa utilizar entre um a cinco dispositivos em simultâneo para captura de pacotes BLE. Quando um dispositivo Bluetooth se conecta a uma Raspberry através de uma entrada USB recebe um número de identificação. Por norma a antena da Raspberry será o dispositivo 0, e os dispositivos que se conectarem posteriormente receberão os números de 1 em diante. Deste modo o utilizador quando for correr o nó ROS deve indicar como argumento qual o dispositivo que deseja utilizar. Após selecionado o dispositivo o tópico publicado terá o seu nome determinado de acordo com o dispositivo, por exemplo, se o utilizador utilizar o comando `”roslaunch agrob_ibeacon_detector blefinder.py 3”` o utilizador selecionou o dispositivo 3 e o tópico publicado será identificado pela string `”antena3”`. Para utilizar o comando *roslaunch* com o atual nó o utilizador precisa de correr o comando com privilégio *root*. Este passo implica que o utilizador execute o comando `”sudo su”` e só depois utilize o comando previamente apresentado.

O nó *blefinder* ao longo desta dissertação apenas foi utilizado com o propósito de utilizar os valores observados de RSSI. O processamento dos dados de RSSI para utilização em localização foi transferido para o nó *IBSlam* presente no pacote *ibeaconsSLAM* que subscreve os tópicos publicados pelo nó *blefinder*. O nó *IBSlam* é antecedente à presente dissertação. Uma descrição do procedimento utilizando o nó *IBSlam* pode ser consultado no artigo [8]. A utilização do nó *IBSlam* na presente dissertação está relacionada com o procedimento *Beacon Mapping Procedure*. Este procedimento consiste na utilização de um filtro de histograma que recebe como dados de entrada a posição do robô e as distâncias observadas entre o robô e os *beacons* e determina a posição estimada de cada *beacon*. Os resultados obtidos com a utilização deste nó serão apresentados no capítulo de resultados.



temphum.msg 48 Bytes	
1	time header
2	float32 temperature
3	float32 humidity

Figura 4.4: Formato da mensagem temphum.msg

### Nó "temp\_humidity"

Numa fase mais avançada do projeto surgiu a necessidade de verificar se o sinal BLE é afetado pelo valor de temperatura e humidade. Deste modo foi adquirido um sensor de temperatura e humidade e surgiu a necessidade de, por conformidade, criar um nó em ROS para publicar os dados de temperatura e humidade.

Para o nó foi criado o pacote "temp\_humi\_sensor" e a mensagem customizada "temp\_hum.msg". A mensagem customizada foi criada com o formato apresentado na figura 4.4.

Na figura 4.5 apresenta-se um exemplo das mensagens publicadas através do tópico temp\_humidity com informação de *timestamp*, valor de temperatura em graus *Celsius*, valor de humidade relativa em percentagem.

```

---
header:
  secs: 1493977428
  nsecs: 817603111
temperature: 25.2999992371
humidity: 33.2999992371
---
header:
  secs: 1493977429
  nsecs: 345108985
temperature: 25.2999992371
humidity: 32.7999992371
---
header:
  secs: 1493977429
  nsecs: 872654914
temperature: 25.2999992371
humidity: 32.5
---

```

Figura 4.5: Publicação do tópico temp\_humidity



### 4.2.3 Desenvolvimento em Matlab

O Matlab<sup>7</sup> é um *software* de alto desempenho desenvolvido para cálculo numérico<sup>8</sup>. Caracteriza-se por implementar uma linguagem própria que resulta de uma combinação de linguagens como C, Java e Basic.

O código desenvolvido em Matlab teve como função principal o processamento dos dados guardados nos *rosbags*. Estes *rosbags* contêm as mensagens publicadas para cada teste realizado. Foram desenvolvidos *scripts* para filtrar os dados de interesse e gerar dados possíveis de analisar e inferir conclusões.

Para através dos dados determinar os parâmetros estimados do modelo de atenuação do sinal RSS foi utilizado um *script* disponibilizado publicamente<sup>9</sup> que utiliza operações de regressão linear colocando os dados na escala logarítmica, uma vez que a curva do modelo de atenuação se conhece ser logarítmica. Os dados resultantes desta operação serão apresentados no capítulo de resultados.

## 4.3 Hardware

Este subcapítulo visa apresentar os componentes de hardware utilizado no desenvolvimento do projeto.

### 4.3.1 Raspberry Pi

Para desenvolver o conteúdo pretendido nesta dissertação, era necessário ter um equipamento que apresentasse compatibilidade com ROS *indigo*. Segundo a informação disponibilizada para o ROS *indigo* no site oficial<sup>10</sup>, esta versão de ROS foi desenvolvida para a versão Ubuntu 14.04 LTS (Trusty). O segundo ponto relevante é que o equipamento suporte o protocolo BLE, caso contrário, mesmo utilizando adaptadores USB compatíveis com BLE, a aplicação não irá funcionar na plataforma. O primeiro ponto seria de fácil solução uma vez que a maioria dos computadores é compatível com a instalação da versão 14.04 de Ubuntu. A Raspberry Pi fornece no seu site oficial<sup>11</sup> a possibilidade de descarregar a versão *debian* de sistema operativo, que no momento atual esta é a versão Raspbian Jessie, e possui compatibilidade idêntica com as versões de Ubuntu 14.04 trusty, 14.10 utopic e 15.04 vivid<sup>12</sup>, o que significa que é compatível com ROS. A Raspberry Pi 3 possui uma antena chip integrada e executa o protocolo BLE. Juntando estas características às dimensões reduzidas da Raspberry, à facilidade de a tornar móvel utilizando baterias portáteis e ao facto de existir facilidade em ter acesso a um exemplar deste modelo, a escolha foi deste modo tomada.

<sup>7</sup><https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

<sup>8</sup><https://pt.wikipedia.org/wiki/MATLAB>

<sup>9</sup><https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/29545>

<sup>10</sup><http://wiki.ros.org/indigo>

<sup>11</sup><https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>

<sup>12</sup><https://voip4learn.blogspot.pt/2015/06/which-ubuntu-version-is-equal-to-which.html>



Figura 4.6: Exemplar da Raspberry Pi 3 model B

Fonte: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>

A Raspberry Pi é um computador de dimensão reduzida (cerca do tamanho de um cartão de crédito). O preço deste computador é bastante acessível tornando-o uma opção válida para várias aplicações desde o ensino escolar, ensino de programação de nível iniciante até avançado, até aplicações industriais como no caso da robótica.

O modelo utilizado nesta dissertação foi o Raspberry Pi 3 model B, representado na figura 4.6. Este modelo foi lançado em Fevereiro de 2016 e em relação ao modelo anterior melhorou o CPU para 1.2GHz 64-bit quad-core ARMv8 e introduziu 802.11n Wireless LAN, Bluetooth 4.1 e BLE. Estas últimas inovações utilizam a antena chip integrada da Raspberry. Nos modelos anteriores era necessário utilizar adaptadores USB para obter WI-FI e Bluetooth, o que significa que agora existem mais portas USB disponíveis, logo um maior número de antenas BLE USB podem ser utilizadas em simultâneo, tornando este modelo muito mais interessante que o seu antecessor. Outras características relevantes da Raspberry são a sua RAM de 1GB, as 4 entradas USB e os 40 pinos GPIO. Os pinos GPIO foram utilizados para conectar o sensor de temperatura e humidade.

### 4.3.2 *Dongles* USB

No projeto foram utilizados 3 *dongles* USB de duas marcas distintas. Um *dongle* não apresentava marca na sua embalagem, mas sabe-se que foi adquirido a baixo custo. A sua referência apenas indica CSR 4.0. Os outros dois *dongles* são o modelo BT400 da ASUS. A figura 4.7 representa exemplares dos *dongles* USB utilizados.

### **Radiação da antena**

Após uma análise na literatura [3] [6] [5] [26] foi perceptível que o impacto que a orientação tem influencia diretamente a qualidade da localização. De facto aquando da análise de dados recolhidos numa fase de testes utilizando o próprio robô AgrobV16, os dados recolhidos pelas antenas que se encontravam a uma altura superior a 1 metro relativamente ao solo, foi possível



Figura 4.7: Exemplos de *dongles* USB utilizados

Fonte: [http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-848098785-adaptador-bluetooth-csr-verso-40-barato-\\_JM](http://produto.mercadolivre.com.br/MLB-848098785-adaptador-bluetooth-csr-verso-40-barato-_JM) e <https://www.asus.com/Networking/USB BT400/>

identificar que a estimativa de distância nada tinha a ver com aquela resultante de uma aquisição de dados com as antenas e beacons ao nível do solo.

O primeiro passo consistiu na identificação do tipo de antena. A figura 4.8a mostra a placa de circuitos contida no interior do encapsulamento dos *dongles* USB ASUS BT400. A antena encontra-se na secção mais à direita apresentando uma configuração que se assemelha a uma onda quadrada. A figura 4.8b apresenta de igual modo a placa de circuitos do *dongle* modelo CSR4.0. À semelhança da antena anterior, a antena encontra-se na secção mais à direita, e a sua configuração é idêntica com ligeira diferença.

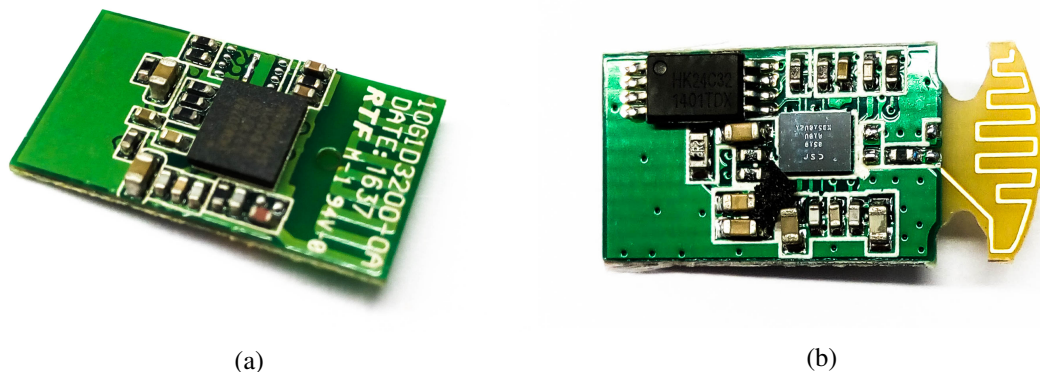


Figura 4.8: Placas de circuitos para (a) dongle USB ASUS BT400 e para (b) dongle USB CSR4.0

Após uma pesquisa acerca dos tipos de antenas presentes em *dongles* USB Bluetooth, a configuração de antena na qual os *dongles* utilizados se enquadram é a configuração *Meandered Inverted-F Antenna* (MIFA) [27]. Uma antena MIFA tem as dimensões determinadas pela grossura da placa onde se insere e da seleção de frequências desejadas para o seu funcionamento. O ideal é utilizar uma divisão isolada como uma câmara anecóica e gerar o padrão de radiação de todas as antenas implicadas no sistema de localização. Isto permite uma calibração precisa e ajustar o modelo à orientação, um modelo mais informado é na maioria das vezes um modelo mais

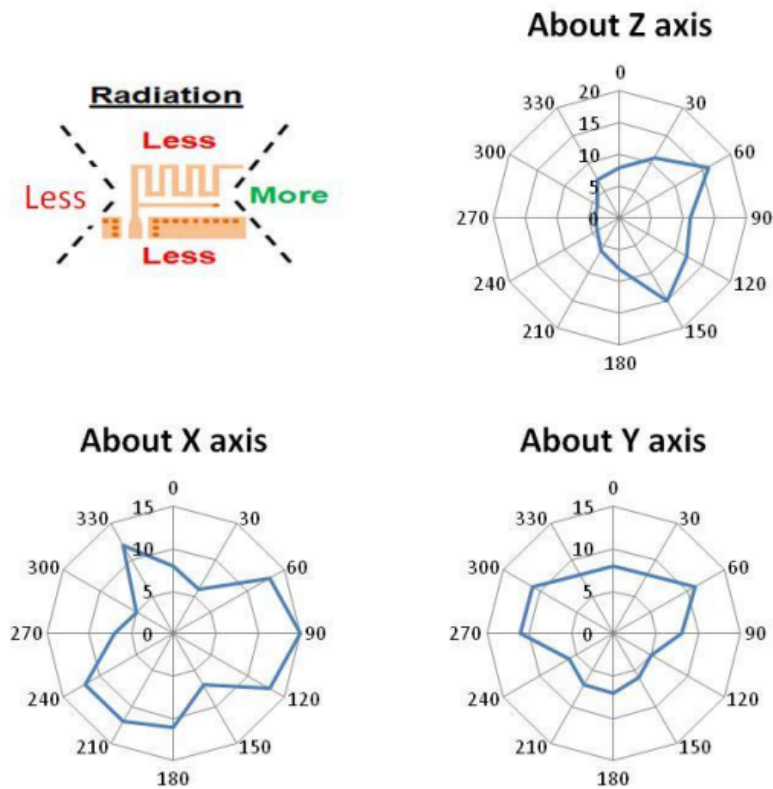


Figura 4.9: Padrão de radiação de uma antena MIFA nos diferentes eixos X, Y e Z.  
 Fonte: Tapan Pattnayak e Guhapriyan Thanikachalam. Antenna design and rf layout guidelines, 2016. CYPRESS.

preciso. Neste projeto o despiste da influência da orientação na localização foi realizado numa fase de testes mais avançado como será descrito num subcapítulo posterior. Como tal, os testes realizados visam comprovar que o ganho da antena não é igual em todas as direções, não tendo sido criado um modelo preciso do padrão de radiação. Neste sentido, recorrendo ao documento [27], o mesmo apresenta uma diagrama com uma distribuição esperada do padrão de radiação nos diferentes eixos cartesianos. Na figura 4.9 o primeiro segmento ilustra a relação do ganho esperado no plano XY. Os seguintes segmentos representam o padrão de radiação nos diferentes eixos e permitem concluir que não se observa uma distribuição uniforme. O ganho indica ser superior no semiplano positivo de X.

Um outro documento [28] foi consultado no sentido de analisar o comportamento do padrão de radiação de uma antena MIFA, este pertencente à Texas Instruments. O documento apresenta um guia para desenvolver uma antena de 2.4GHz para um Printed Circuit Board (PCB) de dimensões reduzidas, que constitui um *dongle* USB. O documento apresenta os padrões de radiação para os diferentes planos. Os resultados são ligeiramente diferentes, demonstrando que o ganho se verifica menor no eixo longitudinal do *dongle* em relação às restantes orientações, sendo aproximadamente uniforme nos restantes eixos.

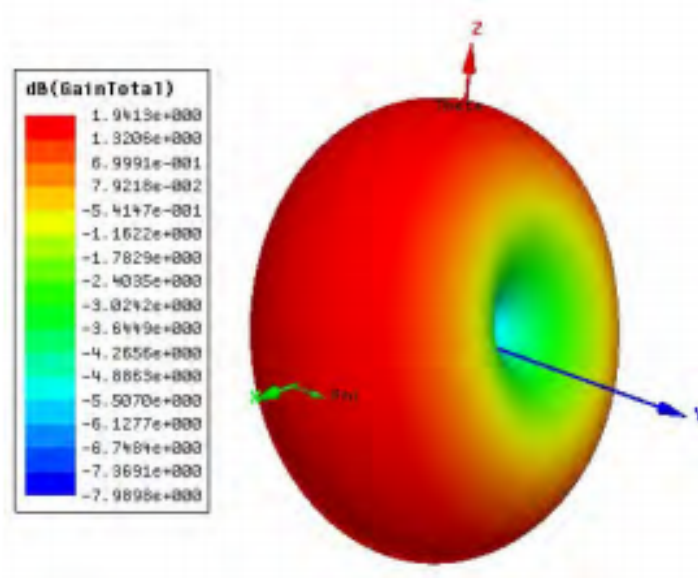


Figura 4.10: Padrão de radiação teórico de uma antena MIFA  
 Fonte: NXP Semiconductors. BLE Antenna Design Guide, 2015. Application note.

No documento [29] é apresentado um guia para desenvolvimento de antenas BLE. Neste guia os padrões de radiação são apresentados num formato tridimensional permitindo ao leitor uma melhor percepção do modelo teórico do ganho. A figura 4.10 apresenta o modelo teórico tridimensional de uma antena do tipo MIFA cujas características teóricas poderão ser consultadas no documento fonte.

### 4.3.3 *iBeacons*

À semelhança do procedimento adotado com os *dongles*, a placa de circuitos dos modelos *iBeacon* da Kontakt.io é apresentada na figura 4.11.

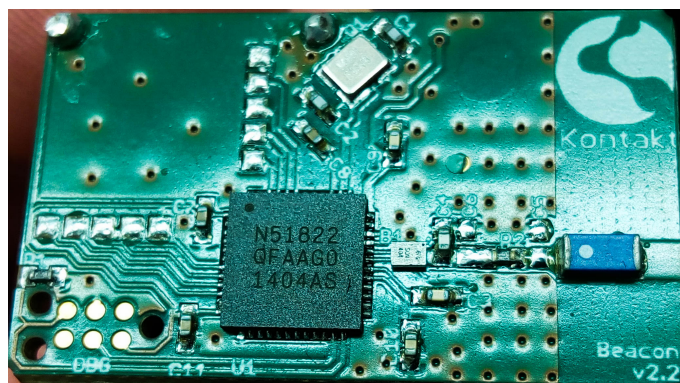


Figura 4.11: Placa de circuito de um *beacon* Kontakt.io

Após uma pesquisa sobre este tipo de antenas foi possível obter mais informações sobre "*chip antennas*"<sup>13</sup>. As antenas chip são extremamente reduzidas em dimensão, utilizam-se para maximizar o aproveitamento do espaço na PCB. Na figura 4.11 a antena chip é o componente azul que se encontra no lado direito. De igual modo, após analisar alguns documentos técnicos [27] [30], foi possível detetar que o padrão de radiação deste tipo de antenas também não apresenta uma distribuição uniforme relativamente à orientação.

Após uma pesquisa foi encontrado numa página web<sup>14</sup> uma publicação do início de 2016 que consiste numa comparação de medições de radiação entre *iBeacons* de duas marcas diferentes, a Estimote e a Kontakt.io. O autor utilizou uma câmara semi-anecóica para realizar os testes. A potência de transmissão dos beacons foi configurada para +4dBm. A figura 4.12 apresenta o gráfico do padrão de radiação obtido para o *beacon* da Kontakt.io, a laranja representa a polarização vertical e a azul a polarização horizontal.

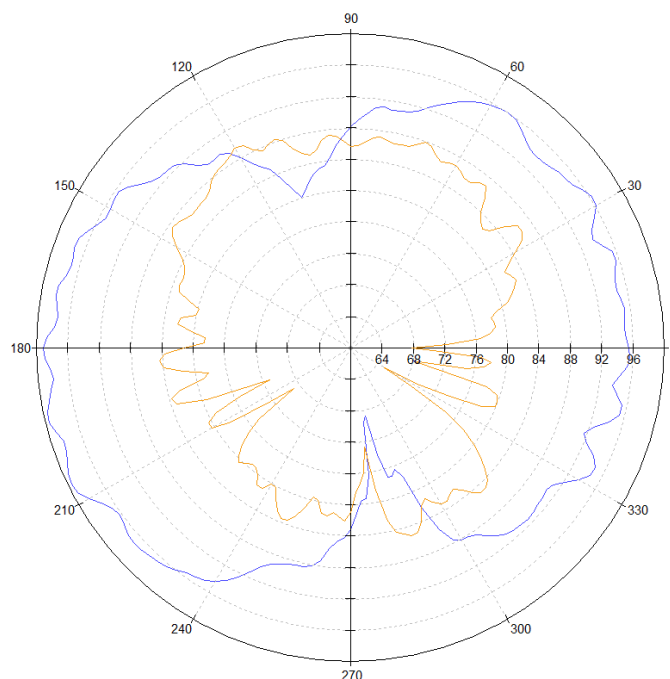


Figura 4.12: Padrão de radiação de um *beacon* Kontakt.io

Analisando a figura 4.12 o ganho da antena é superior segundo o eixo transversal da antena relativamente ao eixo longitudinal.

#### 4.3.4 Sensor temperatura e humidade

A influência da humidade e temperatura é um fator interessante de explorar visto que o sistema se destina à aplicação num ambiente vinícola, exposto a diversas amplitudes climatéricas. O sensor utilizado foi o DTH22 AM2302. A alimentação e comunicação foi feita utilizando os pinos

<sup>13</sup>[http://www.globalspec.com/learnmore/semiconductors/communication\\_i\\_c/chip\\_antenna](http://www.globalspec.com/learnmore/semiconductors/communication_i_c/chip_antenna)

<sup>14</sup><http://www.droidboy.cz/2016/01/estimote-vs-kontaktio-beacon-comparison.html>

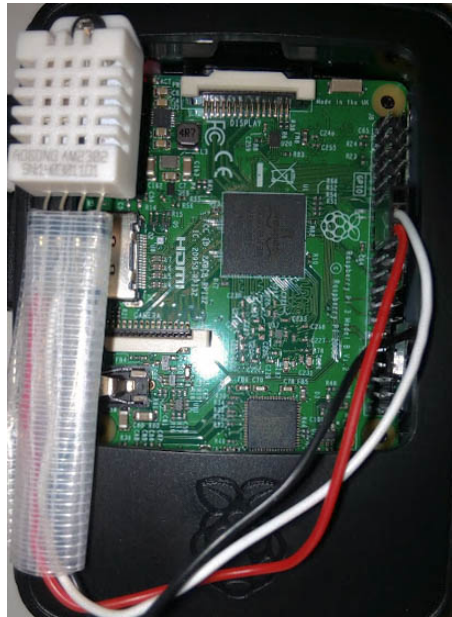


Figura 4.13: Ligação entre sensor DTH22 e Raspberry Pi

GPIO da Raspberry Pi 3. O esquema de montagem seguido encontra-se disponibilizado na página web da *instructables*<sup>15</sup>. A figura 4.13 apresenta a ligação efetuada entre o sensor de humidade e temperatura DTH22 e os pinos da Raspberry Pi, sendo esta a configuração utilizada nos respetivos testes.

## 4.4 Configurações dos testes

Este subcapítulo apresentará as configurações adotadas na realização dos diferentes testes. Associado a cada configuração será justificada a razão para a execução do teste.

### 4.4.1 Teste 1

O primeiro teste realizado pretendia obter o modelo de propagação de onda em condições ideais. De forma a poder obter condições ideais com ausência de ruídos e obstruções foi utilizada a câmara anecóica do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Para montar o *setup*, a estrutura teria que utilizar materiais que não afetassem a propagação do sinal. Neste sentido foram adquiridas placas de material XPS IFOAM, material utilizado para isolamento no setor da construção civil.

No primeiro teste pretendia-se relacionar o RSSI com a distância entre as antenas USB e o *iBeacon*. As antenas USB foram colocadas nas entradas USB da Raspberry Pi 3, ficando orientadas no mesmo sentido como se observa na figura 4.14 de modo a ser possível comparar os dados

<sup>15</sup><http://www.instructables.com/id/Raspberry-PI-and-DHT22-temperature-and-humidity-1o/>



Figura 4.14: Posição das antenas USB

resultantes das diferentes antenas. O procedimento teórico para o teste consiste num afastamento retilíneo do *iBeacon* mantendo a posição das antenas fixa. O procedimento teórico encontra-se ilustrado na figura 4.15.



Figura 4.15: Esquema do procedimento do primeiro teste.

A montagem do *setup* real consistiu no corte de uma faixa da placa IFOAM com uma largura de cerca de 10 centímetros e um comprimento de 260 centímetros. Utilizando uma fita métrica foram feitas marcações com intervalos de 10 centímetros ao longo da faixa. A configuração utilizada pode ser observada na figura 4.16.



Figura 4.16: Configuração utilizada no primeiro teste.

O procedimento do teste consistiu em colocar inicialmente o *iBeacon* encostado às antenas,



perfazendo uma distância igual a 0, e ir afastando o *iBeacon* de 10 em 10 centímetros até um afastamento de 240 centímetros. Os dados foram adquiridos em intervalos de 100 segundos, existindo um espaço de 20 segundos para exercer as alterações manualmente na configuração do teste. A potência configurada para o *iBeacon* foi -12dBm e o intervalo de *advertising* foi 100 ms.

#### 4.4.2 Teste 2

O segundo teste possui um procedimento bastante idêntico ao primeiro, com a diferença de ser montado no exterior. A localização escolhida foi o jardim central da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, sendo esta a localização utilizada em todos os seguintes testes.

Com o segundo teste pretende-se observar a relação do RSSI em função da distância num ambiente exterior onde existem interferências no sinal. Os resultados obtidos serão comparados aos do primeiro teste de modo a retirar conclusões.

À semelhança do teste anterior, o esquema teórico foi o da figura 4.15. Na figura 4.17 é visível a configuração utilizada para o teste 2, sendo idêntica à do teste anterior.



Figura 4.17: Configuração utilizada no segundo teste.

O procedimento de teste foi idêntico ao do teste 1 mantendo os intervalos de tempo e distância, bem como os mesmos valores de configuração do *iBeacon*.

#### 4.4.3 Teste 3

O terceiro teste utiliza a mesma configuração base mas apresenta diversas variantes. De modo a visualizar com maior facilidade a diferença da configuração deste teste em relação aos anteriores, pode observar-se a figura 4.18. A principal diferença desta configuração para as anteriores é o facto das antenas se encontrarem dispostas a uma altura do solo, sendo que nos testes anteriores estavam ao nível do solo. Esta configuração foi utilizada uma vez que estando as antenas a bordo do robô

AgrobV16 a uma elevação de 107 centímetros do solo, os dados obtidos não correspondiam aos calibrados pelos testes anteriores, sendo por isso necessário verificar a influência da elevação.

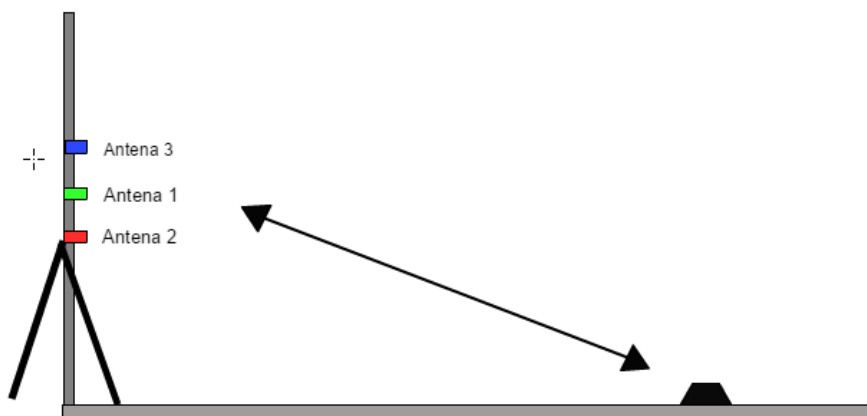


Figura 4.18: Esquema do procedimento do terceiro teste.

O terceiro teste consistiu numa série de fases com diferentes propósitos. O primeiro ponto a ser testado foi a variação do RSSI com a distância estando as antenas a uma elevação diferente do solo. Estes resultados serão comparados aos do teste 2 para verificar o impacto desta característica na configuração.

O segundo teste realizado foi a comparação dos dados de RSSI obtidos em função da distância para 4 *iBeacons* diferentes. Apesar dos *iBeacons* serem todos do mesmo modelo, como será demonstrado no capítulo de resultados os resultados para as duas antenas USB ASUS BT400 nem sempre foram idênticos. Surge então necessidade de verificar se a relação sinal-distância varia entre diferentes *iBeacons* de modo a perceber se a calibração pode ser feita apenas com um *beacon* ou não.

O terceiro teste realizado foi a influência da humidade e temperatura. Neste sentido as amostras foram recolhidos em dois dias diferentes, estando um dia com o céu descoberto e temperatura elevada e outro dia ambiente chuvoso. Como referido previamente, dado que o projeto em que esta dissertação se insere decorre em ambiente vinícola, o sistema estará exposto a diferentes condições climáticas. É importante perceber o impacto que a variação da humidade e temperatura apresentam nos parâmetros do modelo de propagação de onda.

Segundo o artigo [31] a temperatura afeta o RSSI através de correlação negativa, o aumento de temperatura provoca atenuação no sinal. Por outro lado a humidade afeta o RSSI por correlação positiva, o aumento de humidade gera aumento nos valores de RSSI.

O quarto e último teste desta série consistiu em alterar a posição das antenas de uma posição vertical para uma horizontal. As posições podem ser vistas na figura 4.19. Esta foi a primeira vez que a influência da orientação das antenas foi testada uma vez que no robô as antenas não se encontravam todas na mesma orientação, foi portanto necessário estudar qual a posição que promove a qualidade do sinal recebido.

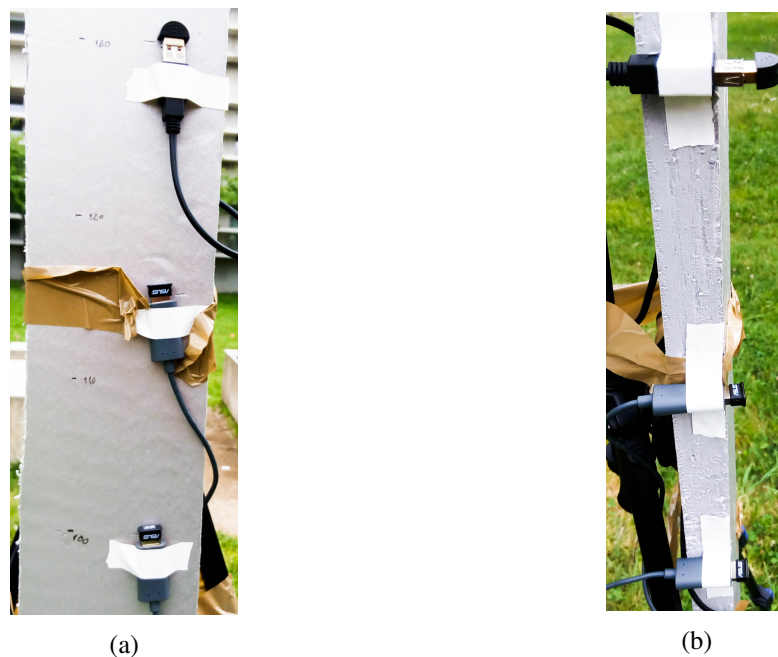


Figura 4.19: Posição das antenas no terceiro teste (a) posição vertical e (b) posição horizontal.

Neste teste a Antena 2 foi colocada a 100 centímetros do solo, a Antena 1 a 115 centímetros, a Antena 3 a 130 centímetros e a Raspberry Pi a 70 centímetros. O afastamento do *iBeacon* manteve-se em intervalos de 10 centímetros e os intervalos de tempo também. Na figura 4.20 pode se observar a configuração utilizada no terceiro teste.



Figura 4.20: Configuração utilizada no terceiro teste.

#### 4.4.4 Teste 4

O quarto teste foi o último a ser realizado e foi criado com o propósito de verificar a variação do RSSI com a orientação. Para este teste foi feita uma plataforma em IFOAM e colocada com o tripé a uma elevação de 107 centímetros do solo. Esta elevação foi selecionada pois é a mesma a que as antenas se encontram quando estão posicionadas no robô.

Na figura 4.21 encontra-se representado o esquema adotado neste teste com vista lateral e superior.

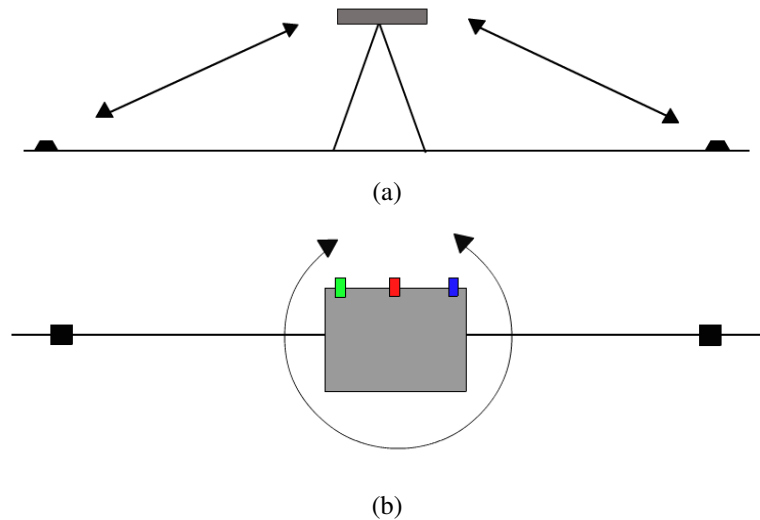


Figura 4.21: Esquema do procedimento do quarto teste (a) vista lateral e (b) vista superior.

Foram gravados quatro *rosbags* cada um com um desfasamento de 45 graus do anterior. Os graus foram medidos com as marcações existentes no tripé para o devido efeito. Foram usados dois iBeacons em extremos diferentes de modo a diminuir o tempo do teste para metade. Ambos os beacons começaram a 10 centímetros do centro do tripé e o procedimento do teste seguiu os anteriores em relação ao afastamento e intervalos de tempo.

A configuração utilizada pode ser observada na figura 4.22.



Figura 4.22: Configuração utilizada no quarto teste.

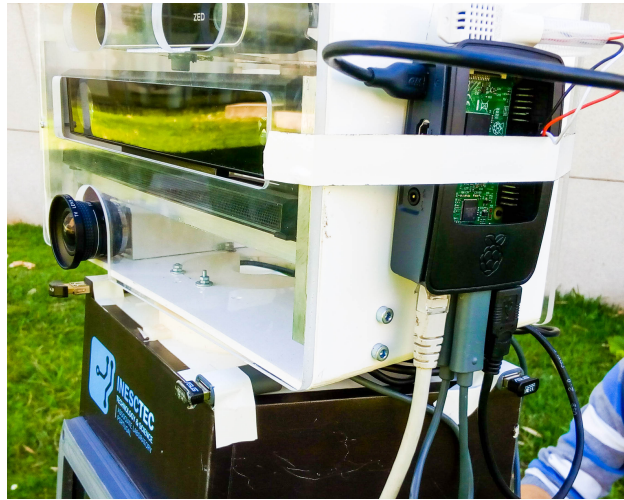


Figura 4.23: Configuração utilizada a bordo do AgrobV16.

#### 4.4.5 Validação

De modo a poder validar se o sistema apresenta bons resultados e desempenho, para além dos testes destinados a calibração e modelação do sistema, foram também gravados vários *rosbags* utilizando o AgrobV16. Nestes testes as antenas USB foram posicionadas de acordo com a figura 4.23. Os dois *dongles* da ASUS dado serem do mesmo modelo e daí se esperar curvas idênticas, foram colocado com orientações perpendiculares. O *dongle* referido como Antena 2 foi colocado na direção dos  $90^\circ$  do robô enquanto as Antenas 1 e 3 foram colocadas na direção dos  $0^\circ$ . Foram escolhidas duas antenas de modelos diferentes para a frente do robô pelo facto de apresentarem curvas de propagação diferentes, o que permite confrontar os dados provenientes de ambas e melhorar a qualidade da localização.

### 4.5 Resumo

Neste capítulo foram abordados os parâmetros relacionados com a implementação do sistema e testes executados.

O capítulo inicia com a introdução ao software utilizado no desenvolvimento do sistema. Continua mostrando quais os desenvolvimentos efetuados com cada ferramenta de software.

O subcapítulo seguinte refere o hardware utilizado. São apresentados ainda dados teóricos relativos aos padrões de radiação das antenas utilizadas no projeto uma vez que os mesmos não foram calculados em específico para os componentes utilizados.

Os subcapítulos seguintes demonstram as configurações utilizadas para cada teste, o modo como os testes foram feitos e o propósito de cada teste.



## Capítulo 5

# Resultados Experimentais

### 5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos nos testes referidos no capítulo anterior.

### 5.2 Câmara Anecóica vs Exterior

Este subcapítulo visa a comparação entre dos valores de RSSI em função da distância entre a configuração no interior da câmara anecóica e a configuração no exterior. A elevação em ambas as configurações é nula, considerando-se que o iBeacon e as antenas estão ao nível do solo. A nomenclatura adotada nesta secção atribui numeração às quatro antenas utilizadas. Deste modo a antena da Raspberry Pi é a antena 0, os dois modelos ASUS BT400 correspondem às antenas 1 e 2, e a antena CSR4.0 é a antena 3.

#### 5.2.1 Câmara Anecóica

O primeiro dado importante de observar na câmara anecóica é o gráfico da relação entre os valores de RSSI obtidos por cada antena em cada intervalo de distância. Estes gráficos são apresentados na figura 5.1. Analisando os gráficos observa-se que as antenas 0 e 3 possuem uma distribuição logarítmica do sinal, enquanto que nas antenas 1 e 2, ambas ASUS BT400, possuem uma distribuição aparentemente mais linear. As antenas 0 e 3 possuem uma distribuição mais concentrada para valores menores de distância, aumentando a dispersão dos valores de RSSI em distâncias superiores. Isto simboliza um aumento do desvio padrão com a distância, o que é esperado num sistema que utiliza BLE. As antenas 1 e 2 possuem elevada dispersão para valores inferiores a 30 centímetros. Uma vez que este fenómeno ocorre em ambas as antenas do mesmo modelo pode-se estipular que exista uma relação entre ambas, fenómeno possivelmente desencadeado por processamento interno ao *dongle* USB.

O segundo dado interessante de analisar é a média de valores RSSI e o desvio padrão das medidas por intervalo de distância. A dispersão apresentada na figura 5.1 permite apenas ter uma

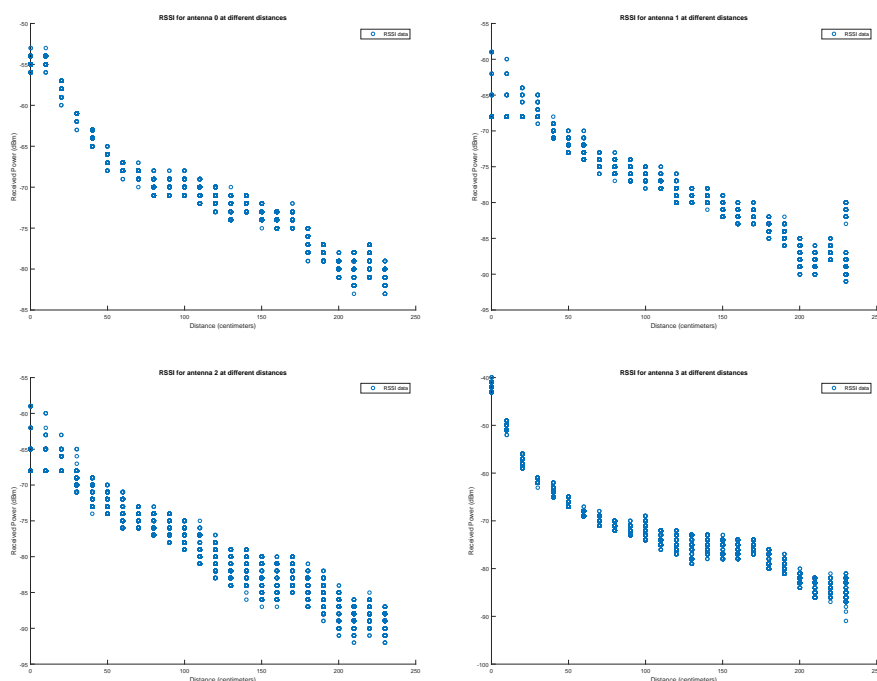


Figura 5.1: Medidas de RSSI em relação a distância na câmara anecóica para as antenas 0-3.

percepção do intervalo de valores de RSSI. Analisando a figura 5.2 é perceptível onde os valores se concentraram observando a média para cada intervalo de distância. Recorrendo à média, a forma da onda descrita pelo conjunto de pontos médios de RSSI é mais próxima da realidade esperada para o par antena-beacon. As antenas 0 e 3 mantêm o formato mais semelhante a uma distribuição logarítmica. Nas antenas 1 e 2, o fenómeno previamente observado para distância inferior a 30 centímetros traduz-se agora num valor de média constante para estes intervalos de medidas, com o desvio padrão a aumentar quando a distância tende para 0. O desvio padrão apresentado graficamente corresponde à soma e subtração do valor do desvio padrão calculado.

Por fim, para terminar a análise respetiva unicamente à câmara anecóica, apresenta-se na figura 5.3 a comparação entre os valores médios de RSSI das quatro antenas. Para além da análise efetuada na figura anterior, pode-se concluir que os valores de RSSI obtidos com as antenas 0 e 3 são sempre em média superiores aos valores obtidos pelas antenas 1 e 2. Nestas últimas, como seria expectável sendo do mesmo modelo, as curvas descritas são idênticas.

## 5.2.2 Exterior

No contexto de comparação de dados obtidos em ambiente isolado e exterior, os dados apresentados nesta secção estarão num formato idêntico ao apresentado na câmara anecóica.

A figura 5.4 apresenta as medidas de RSSI em relação a distância no exterior para as quatro antenas. Em relação aos dados obtidos na câmara anecóica, rapidamente se evidenciam diferenças. A primeira alteração é o facto das antenas 1 e 2 não conseguirem obter dados, ou obterem significativamente menos dados, a partir dos 170 centímetros. Este fenómeno ocorreu em ambas



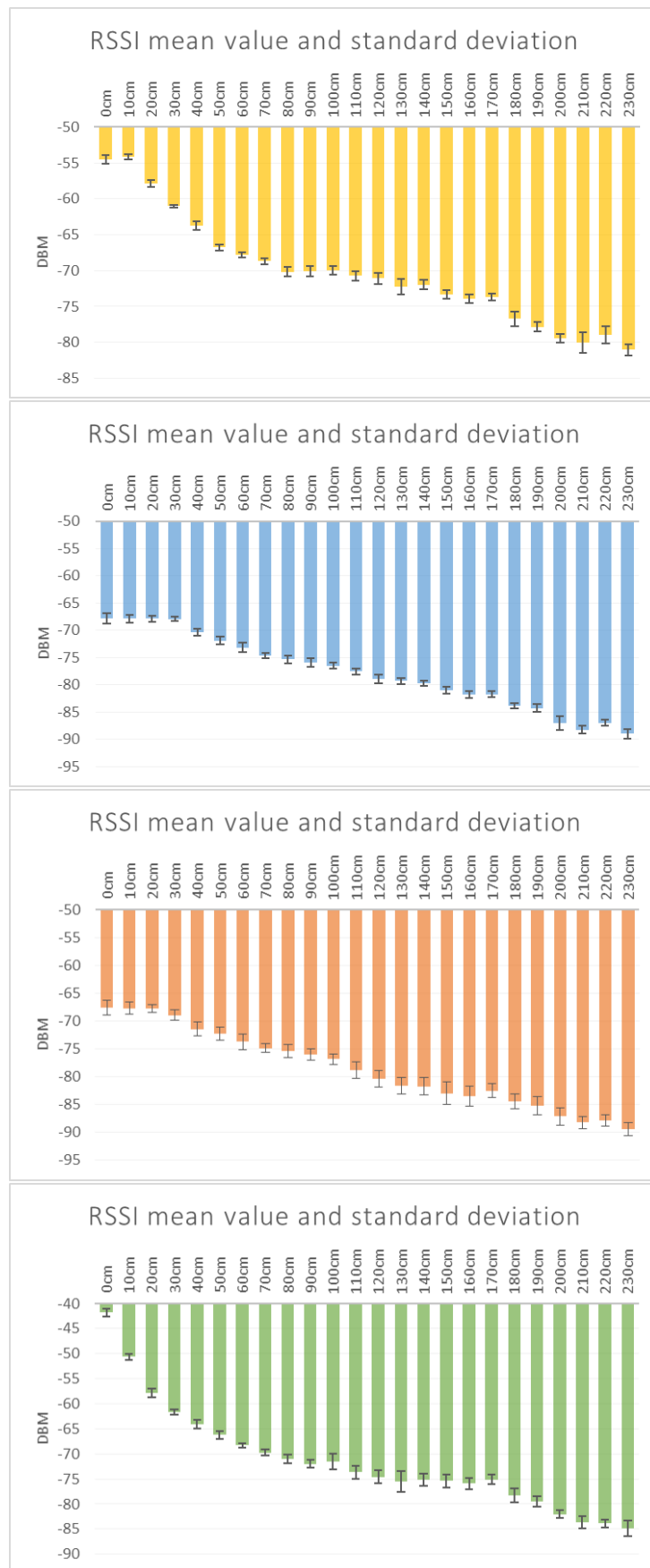


Figura 5.2: Valores médios de RSSI em relação a distância e desvio padrão na câmara anecóica para as antenas 0-3.

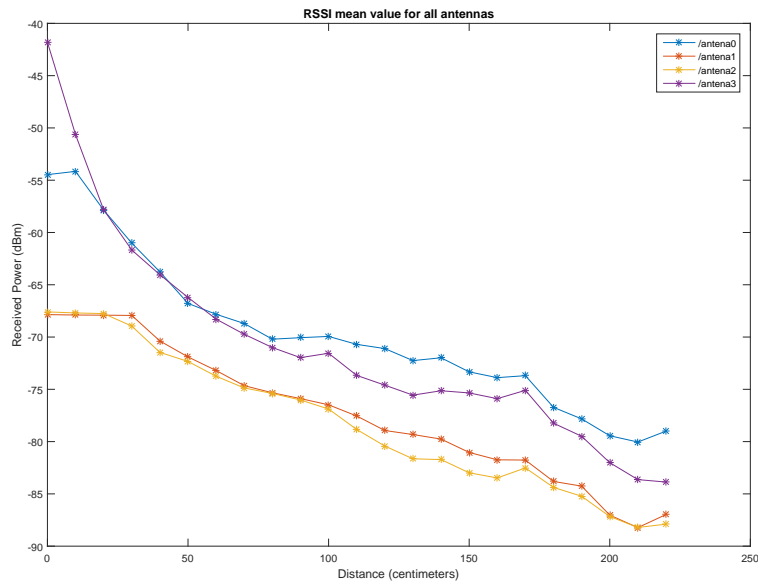


Figura 5.3: Valores médios de RSSI em relação a distância na câmara anecóica para as antenas 0-3.

as antenas do modelos ASUS BT400 o que permite estabelecer uma relação entre ambas. Possivelmente o ganho das antenas na orientação e elevação utilizadas na configuração é um ganho reduzido em comparação com as restantes antenas. A segunda diferença é comum às quatro antenas. Todas as antenas apresentam intervalos de dispersão superiores, e regra geral os intervalos de dispersão tendem a crescer com a distância como esperado pela característica ruidosa do sinal BLE. O facto de todas as antenas apresentarem estes intervalos de dispersão superiores demonstra a influência que o ambiente de ensaio tem na propagação do sinal, estando exposto a ruídos e a fenómenos como reflexão de sinal. A antena 0 apresenta uma distribuição aproximadamente bimodal, onde se verifica a existência de dois grupos distintos de valores de RSSI. As causas podem estar relacionadas com o formato de alimentação da antena interna da Raspberry Pi e a carga do CPU da mesma. Não tendo sido confirmada a causa, confirmou-se sim a repetição deste efeito nos testes posteriores efetuados em ambiente exterior. Por este motivo a antena da Raspberry deixou de ser alvo de estudo nas secções seguintes da presente dissertação.

A média de valores RSSI e desvio padrão obtidos para as antenas em ambiente exterior encontra-se representada graficamente na figura 5.5. O desvio padrão apresentado graficamente corresponde à soma e subtração do valor do desvio padrão calculado. Tal como comprovado na análise dos valores de RSSI relativamente à distância, as antenas 1 e 2 não apresentam resultados para todos os valores de distância, fruto de um ganho reduzido resultante da configuração utilizada. As antenas 1 e 2 apresentam no entanto uma forma mais próxima de uma distribuição logarítmica. Para a distância 0 centímetros na antena 1 e 10 centímetros na antena 2, o gráfico do desvio padrão é superior aos intervalos de vizinhança, sendo o valor médio de RSSI o que menos

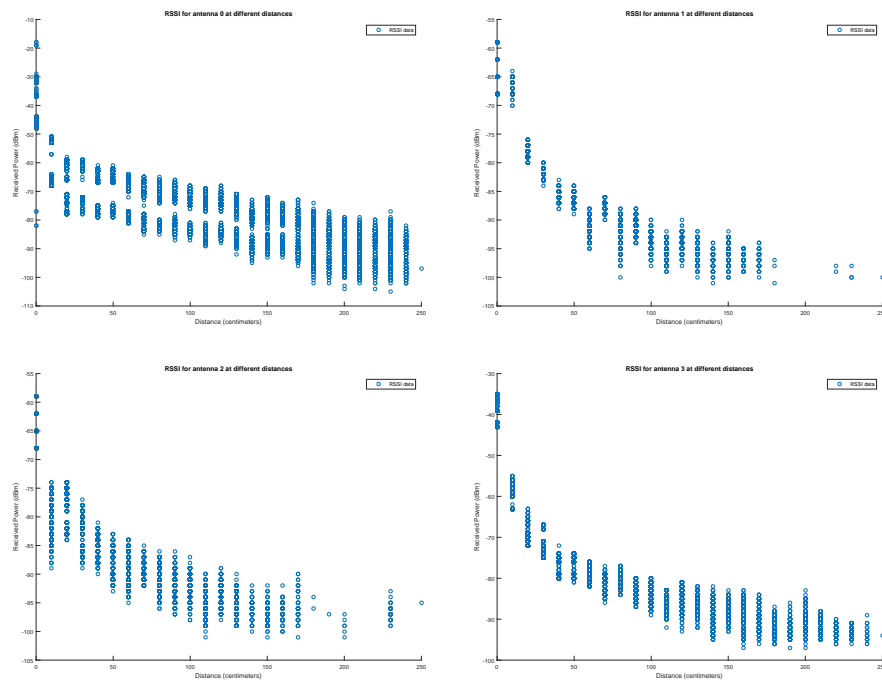


Figura 5.4: Medidas de RSSI em relação a distância no exterior para as antenas 0-3.

adequa no sentido de aproximar a curva a uma curva logarítmica, o que significa que o valor da média pode ter forte presença de ruído que afetou negativamente o valor obtido. Apesar do gráfico obtido na figura 5.4 para a antena 0 apresentar o evento de bimodalidade, o seu gráfico de valores médios continua a apresentar uma distribuição logarítmica, no entanto o seu desvio padrão é bastante elevado.

Na figura 5.6 observa-se a comparação das curvas obtidas através dos valores médios de RSSI das quatro antenas. Tal como no teste anterior os valores de RSSI foram superiores para as antenas 0 e 3 relativamente às restantes antenas. Para as antenas 1 e 2 as curvas obtidas são idênticas, tal como esperado sendo antenas do mesmo modelo.

### 5.2.3 Comparação

Após a obtenção dos dados nas secções anteriores foi possível observar graficamente a existência de uma dispersão superior nos valores obtidos no exterior, o que se pode justificar com a existência de ruído e fenómenos associados à reflexão das ondas RF. Nesta secção serão comparados a média RSSI e desvio padrão dos dados obtidos na câmara anecóica com os obtidos no exterior.

Analisando as tabelas 5.1 e 5.2 podemos confrontar os dados retirados para as mesmas antenas, em quatro valores de distância diferentes, para os ambientes diferentes. A primeira análise geral é que os valores médios de RSSI são inferiores no exterior em relação aos da câmara anecóica. A segunda constatação permite afirmar que os valores de desvio padrão são quase sempre superiores no exterior. Este resultado era esperado uma vez que o ruído influencia diretamente o desvio

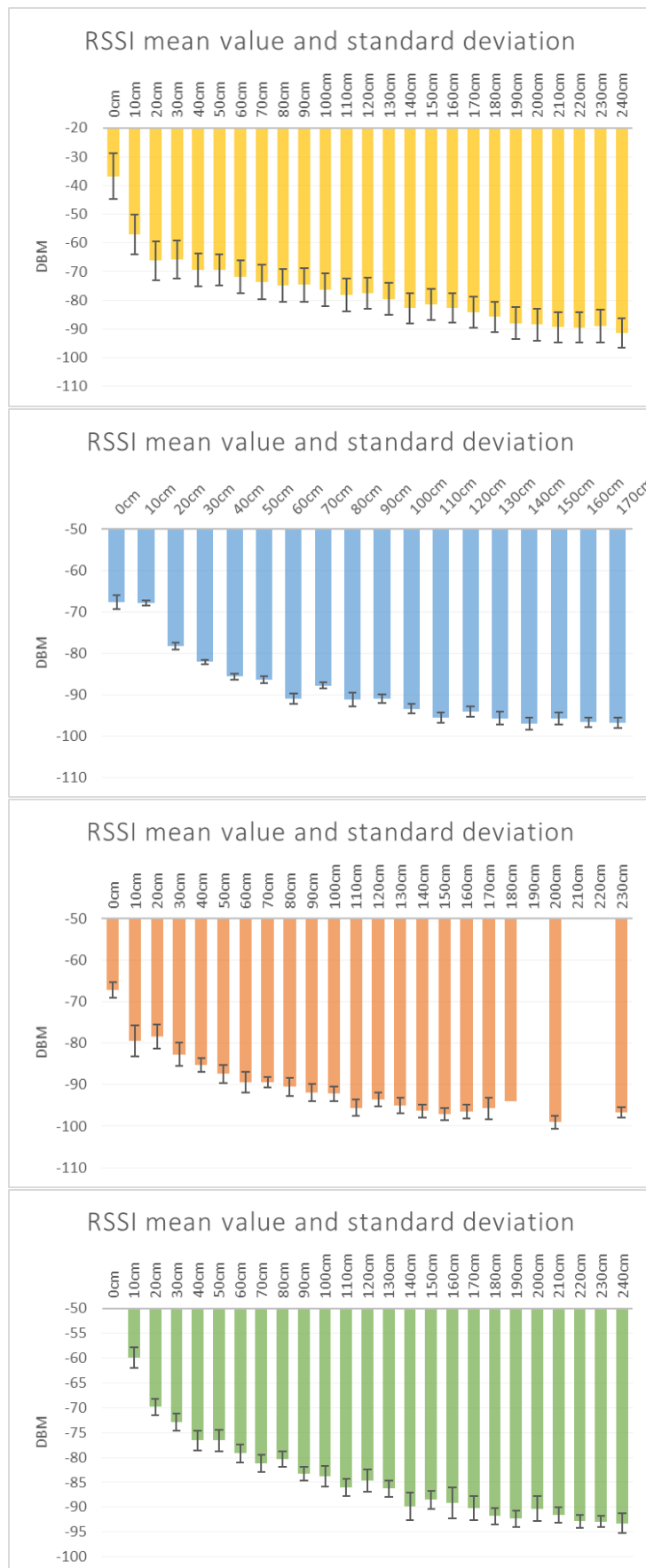


Figura 5.5: Valores médios de RSSI em relação a distância e desvio padrão no exterior para as antenas 0-3.

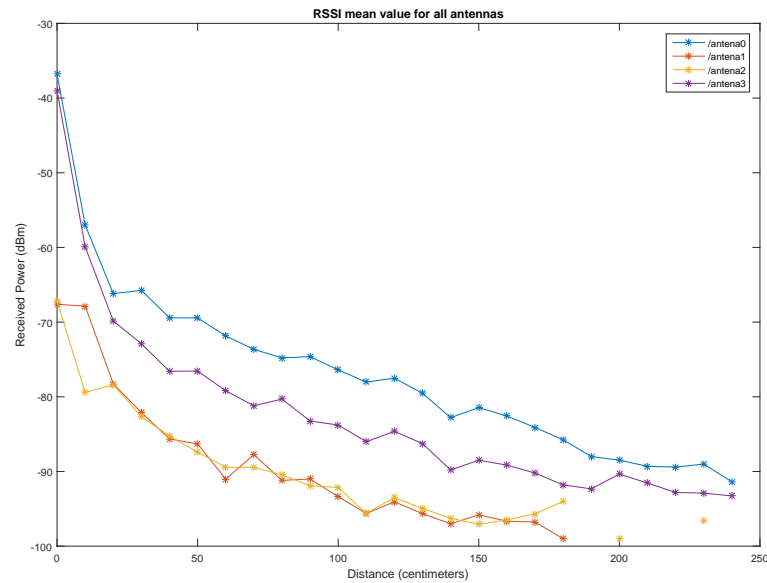


Figura 5.6: Valores médios de RSSI em relação a distância no exterior para as antenas 0-3.

		50cm	100cm	150cm	200cm
Antena 0	Média	-66,782	-69,940	-73,331	-79,441
	D. Padrão	0,444	0,578	0,564	0,616
Antena 1	Média	-71,901	-76,481	-81,037	-87,032
	D. Padrão	0,674	0,565	0,666	1,284
Antena 2	Média	-72,333	-76,884	-82,984	-87,162
	D. Padrão	1,195	0,945	1,999	1,529
Antena 3	Média	-66,217	-71,554	-75,343	-82,011
	D. Padrão	0,755	1,508	1,307	0,809

Tabela 5.1: Valores de média e desvio padrão na câmara anecóica.

		50cm	100cm	150cm	200cm
Antena 0	Média	-69,437	-76,400	-81,446	-88,495
	D. Padrão	5,493	5,715	5,412	5,646
Antena 1	Média	-86,317	-93,372	-95,817	ND
	D. Padrão	0,819	1,182	1,476	ND
Antena 2	Média	-87,415	-92,140	-97,069	-99,000
	D. Padrão	2,217	1,770	1,471	1,581
Antena 3	Média	-76,553	-83,778	-88,486	-90,349
	D. Padrão	2,139	2,017	1,808	2,512

Tabela 5.2: Valores de média e desvio padrão no exterior.

padrão, confirmando que no exterior se sente a influência do ruído. A restante análise permite confirmar que a potência do sinal diminui com a distância. Esperava-se verificar um aumento do desvio padrão com a distância. Este fenómeno poderá não ter ficado evidente uma vez que o volume de dados tende a reduzir drasticamente com o aumento da distância. Apesar de não ser possível perceber o volume de dados associado a cada intervalo de distância verifica-se no entanto que as antenas 1 e 2 para valores de distância superiores a 180 centímetros não possuem amostras para determinados valores de distância.

### 5.3 Variação da Elevação

Tal como referido previamente, foi comprovado por intermédio de testes que os valores obtidos pelas antenas a bordo do robô (instaladas a uma elevação de 107 centímetros acima do solo) apresentavam valores de RSSI que não correspondiam à distância esperada. Esta secção apresenta os resultados do teste com elevação em que a antena 1 foi colocada a uma altura de 115 centímetros, a antena 2 a 100 centímetros e a antena 3 a 130 centímetros.

#### 5.3.1 Resultados em Elevação

A figura 5.7 apresenta os valores médios de RSSI e os de desvio padrão para as antenas 1-3 dispostas segundo a configuração do teste. O desvio padrão apresentado graficamente corresponde à soma e subtração do valor do desvio padrão calculado. A primeira característica que se distingue das curvas em relação às obtidas no teste ao nível do solo é que as atuais curvas não se parecem a curvas logarítmicas. As três curvas partilham o facto de a partir dos 130 centímetros de distância se acentuar o declive na curva de RSSI, sendo que para distâncias inferiores possuem aparência bastante distinta entre si. A possível justificação para os resultados observados relaciona a posição do *dongle* USB com o padrão de radiação da antena. Observando o gráfico da antena 3, antena que sempre apresentou o comportamento mais próximo de uma curva logarítmica, é possível observar indícios desta teoria. Sabendo que a antena se encontrava orientada verticalmente para cima, e recordando o ganho teórico de uma antena MIFA em que o ganho segundo o eixo longitudinal é inferior, notamos que no gráfico da antena 3, quando o *iBeacon* se encontra em valores menores de distância, correspondendo a uma posição mais próxima do eixo longitudinal da antena, os valores de RSSI são inferiores. Quando se vai afastando o *iBeacon*, apesar de teoricamente o sinal ser atenuado com a distância, o *iBeacon* é também afastado do eixo longitudinal onde o ganho é menor, e os valores de RSSI começam a aumentar. O declive que se verifica a partir dos 130 centímetros pode ser considerado como o efeito de atenuação que regularmente se verifica no sinal. Após esta análise surgiu a necessidade de alterar a posição da antena para uma posição horizontal, de modo que o eixo longitudinal da antena seja paralelo ao deslocamento do *iBeacon*.

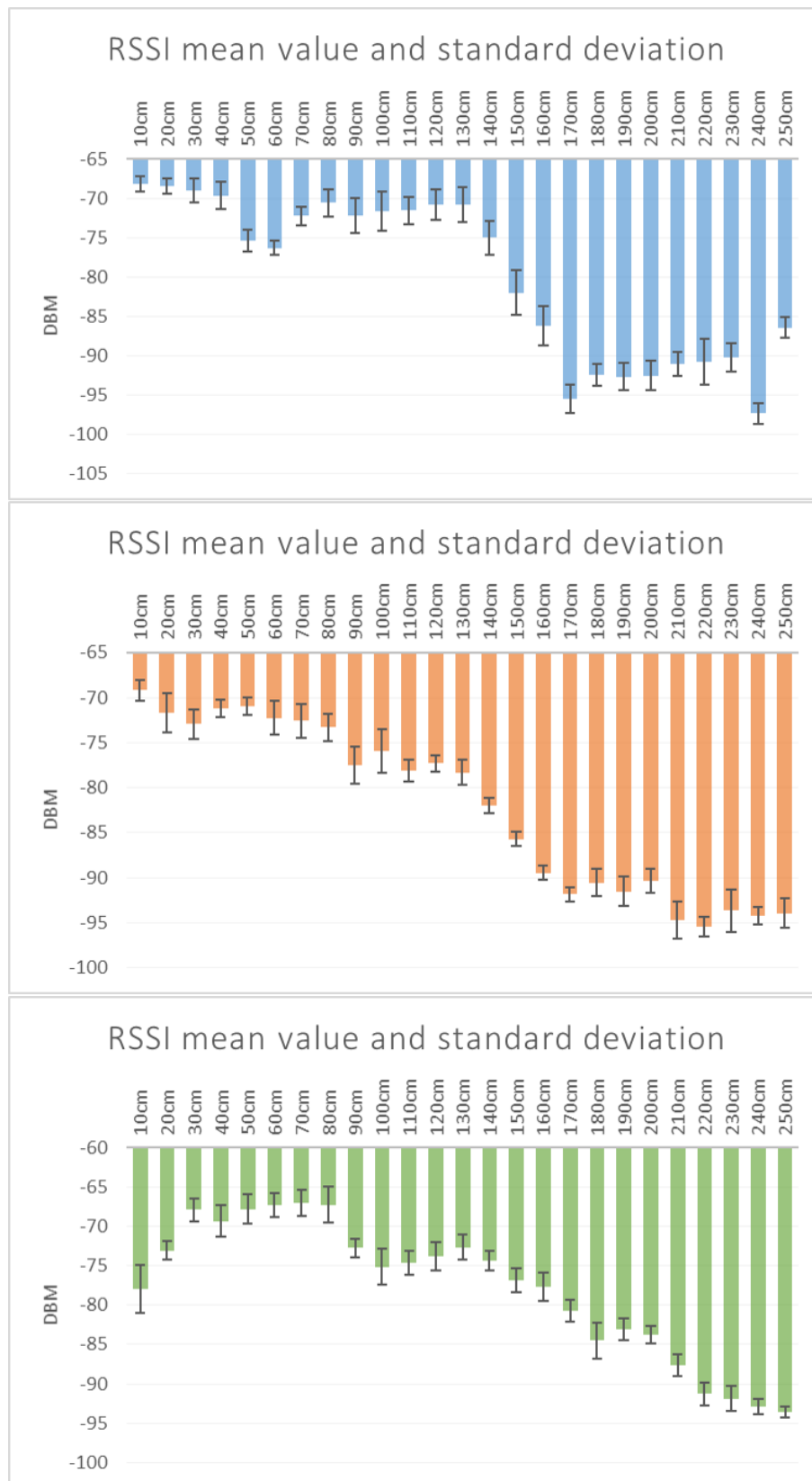


Figura 5.7: Valores médios de RSSI em relação a distância e desvio padrão para as antenas 1-3 em elevação.

### 5.3.2 Comparação

Na figura 5.8 encontram-se apresentados os gráficos comparativos das curvas obtidas junto ao solo e as curvas obtidas em elevação. Estes gráficos permitem ter uma visualização direta sobre as alterações resultantes da mudança de configuração.

Conclui-se que os valores de RSSI em elevação são superiores aos obtidos com as antenas ao nível do solo. Quando se utilizou a curva obtida no teste anterior, por vezes a bordo do AgrobV16 os dados retornavam distâncias na ordem dos 20-30 centímetros. Estes valores eram impossíveis uma vez que as antenas se encontram instaladas a 107 centímetros do solo, estando os *iBeacons* ao nível do solo, tornando a distância mínima possível aproximadamente os 107 centímetros.

## 5.4 Diferença entre *iBeacons*

Neste teste foram comparados os dados obtidos com quatro *iBeacons* diferentes, *iBeacon 1* - gmta, *iBeacon 2* - gQ0Q, *iBeacon 3* - unPx e *iBeacon 4* - yvlm. Uma vez que se compara a diferença de valores obtidos por diferentes antenas de *dongles* USB e se conferiu serem bastante diferentes, é conveniente verificar se apesar dos *iBeacons* utilizarem os mesmos componentes na sua construção providenciam diferentes valores de potência de sinal. O mesmo teste foi feito com os quatro beacons, as antenas foram colocadas às elevações do último teste e os *iBeacons* foram afastados em intervalos de 10 centímetros. Existiu o cuidado de colocar todos os *iBeacons* na mesma posição relativamente às antenas, uma vez que o padrão de radiação da chip antena do *iBeacon* não é uniforme em todas as orientações, não se pretendia que este fator influenciasse os dados.

Os resultados obtidos encontram-se apresentados graficamente na figura 5.9. Analisando o gráfico de cada antena verifica-se que os valores de RSSI obtidos para diferentes *iBeacons* é bastante semelhante. Esta semelhança é suficiente para não ser necessário criar um modelo para cada par antena-beacon, bastando calibrar as três antenas com um dos *iBeacons*. Existem em alguns intervalos de distância diferenças de valores de RSSI, em que frequentemente o *iBeacon* com a identificação yvlm apresenta valores superiores aos restantes. Este acontecimento pode estar relacionado com a carga da bateria do *iBeacon* ou com o próprio posicionamento do *iBeacon*, uma vez que foi calibrado por meios humanos, a sua posição poderia providenciar um ganho superior.

## 5.5 Humidade e Temperatura

Nesta secção são analisados os dados obtidos em dias com diferentes temperaturas e humidades. O *iBeacon* utilizado foi o gmta. Os dados analisados no teste da elevação são os utilizados como dados do primeiro dia.



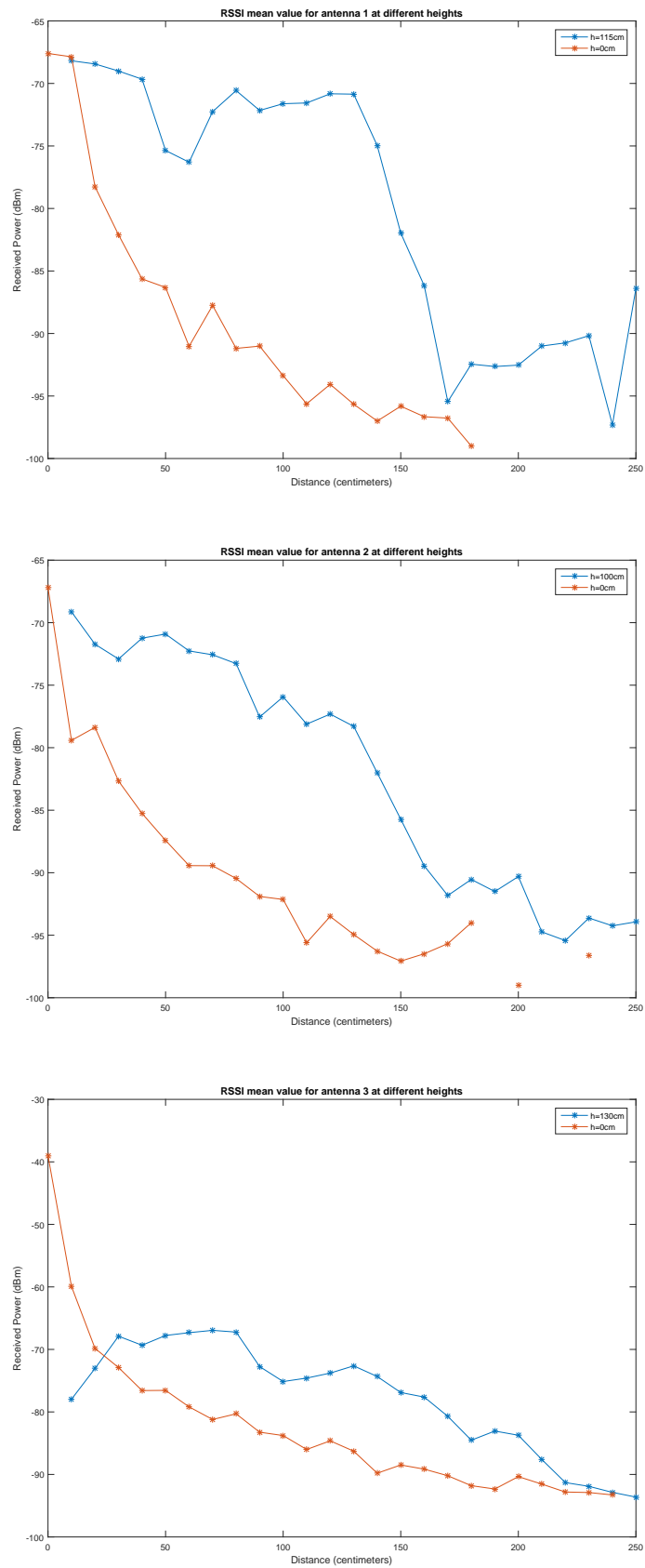


Figura 5.8: Valores médios de RSSI em relação a distância para as antenas 1-3 a diferentes elevações.

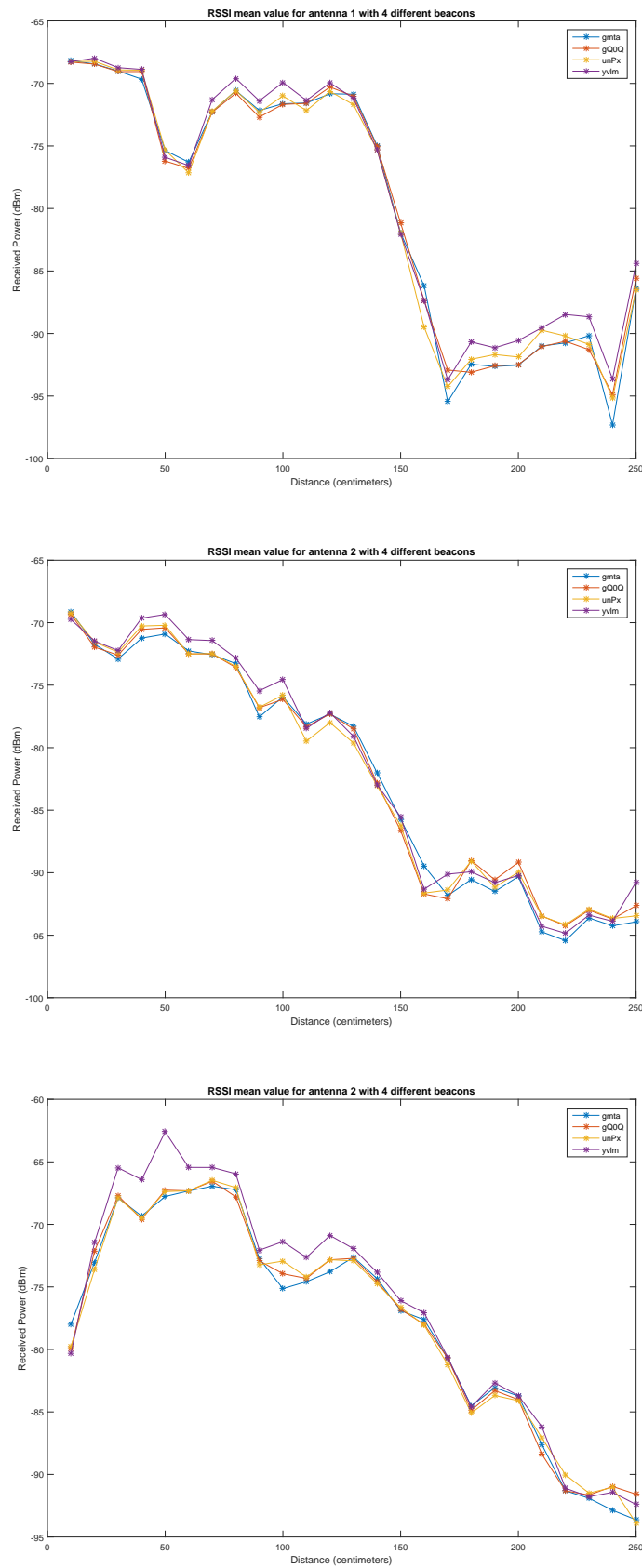


Figura 5.9: Valores médios de RSSI em relação a distância para as antenas 1-3 utilizando diferentes *iBeacons*.

### 5.5.1 Humidade

A figura 5.10 apresenta os dados de temperatura e humidade obtidos no primeiro dia de testes, enquanto que a figura 5.11 apresentam os dados respetivos ao segundo dia de testes. No primeiro dia a temperatura média obtida foi de 27.6°C e a humidade relativa de 50.1%. O segundo dia apresentou um valor de temperatura média de 17.1°C e de humidade relativa 86.4%. O primeiro dia teve portanto uma temperatura mais elevada e menor humidade relativa. Enquanto que no primeiro dia os valores se mantiveram relativamente constantes, nos dados do segundo dia observa-se uma depressão no valor de temperatura a meio do tempo de teste.

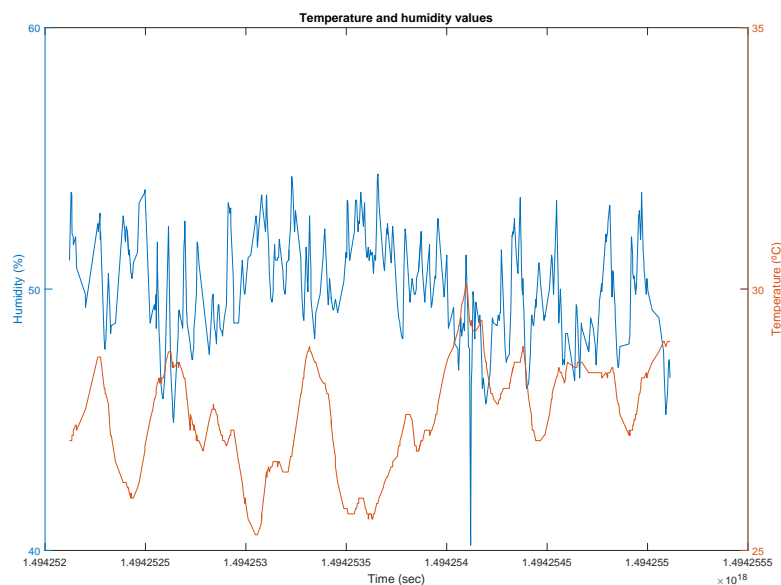


Figura 5.10: Dados de temperatura e humidade no primeiro dia.

Sabendo que os dados relativos a valores médios de RSSI e desvio padrão do primeiro dia já foram apresentados, a figura 5.12 apresenta os dados relativos ao segundo dia. Os gráficos não apresentam diferenças consideráveis. É possível observar e verificar que os valores de desvio padrão são aparentemente superiores no segundo dia, especialmente para as antenas 2 e 3 onde se torna mais evidente. O desvio padrão apresentado graficamente corresponde à soma e subtração do valor do desvio padrão calculado.

### 5.5.2 Comparação

Após conhecimento das condições atmosféricas interessa comparar as curvas obtidas nos diferentes dias. A figura 5.13 apresenta a comparação de valores médios de RSSI para cada antena nos dois dias com diferentes valores de temperatura e humidade relativa.

Os gráficos apresentam valores bastante idênticos. Apenas na região em torno de 100 centímetros se deteta uma divergência comum a todos os três gráficos. Esta característica pode ter sido

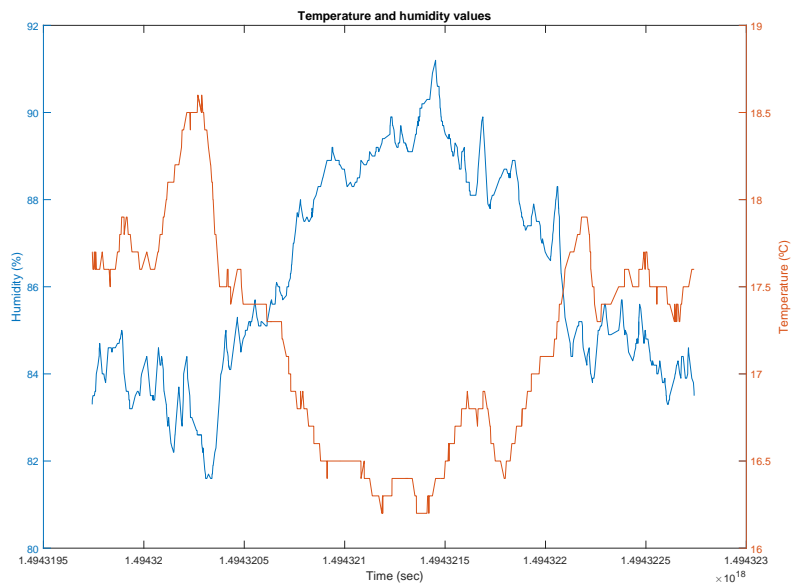


Figura 5.11: Dados de temperatura e humidade no segundo dia.

causada por um erro relacionado com a configuração física do teste, podendo ter ocorrido alguma perturbação ou presença humana que tenha influenciado os resultados. Esta teoria justifica-se com o facto dos restantes dados serem coincidentes enquanto que a divergência correu numa região delimitada. Derivado da extensa duração associada à realização do teste não surgiu oportunidade de repetir o mesmo e efetuar o despiste da influência referida.

Ao contrário do esperado após a análise teórica considera-se que a humidade e temperatura não apresentam um forte impacto no modelo do sistema, não existindo necessidade de calibração específica utilizando estes fatores como parâmetro. Estes dados podem ter ocorrido uma vez que se trata de um sistema de curto alcance onde apenas se praticam distâncias inferiores a 250 centímetros, dado que o esperado é que a humidade e temperatura causem impacto na propagação de sinais RF para distâncias superiores.

## 5.6 Horizontal vs Vertical

Aquando da análise da diferença de valores RSSI para as antenas em elevação relativamente ao solo foi referida a necessidade de alterar a posição da antena de modo a evitar que o *iBeacon* coincidissem com o eixo longitudinal das antenas USB. Esta secção apresenta os dados obtidos para as antenas em posição horizontal e compara com os resultados obtidos previamente em posição vertical.

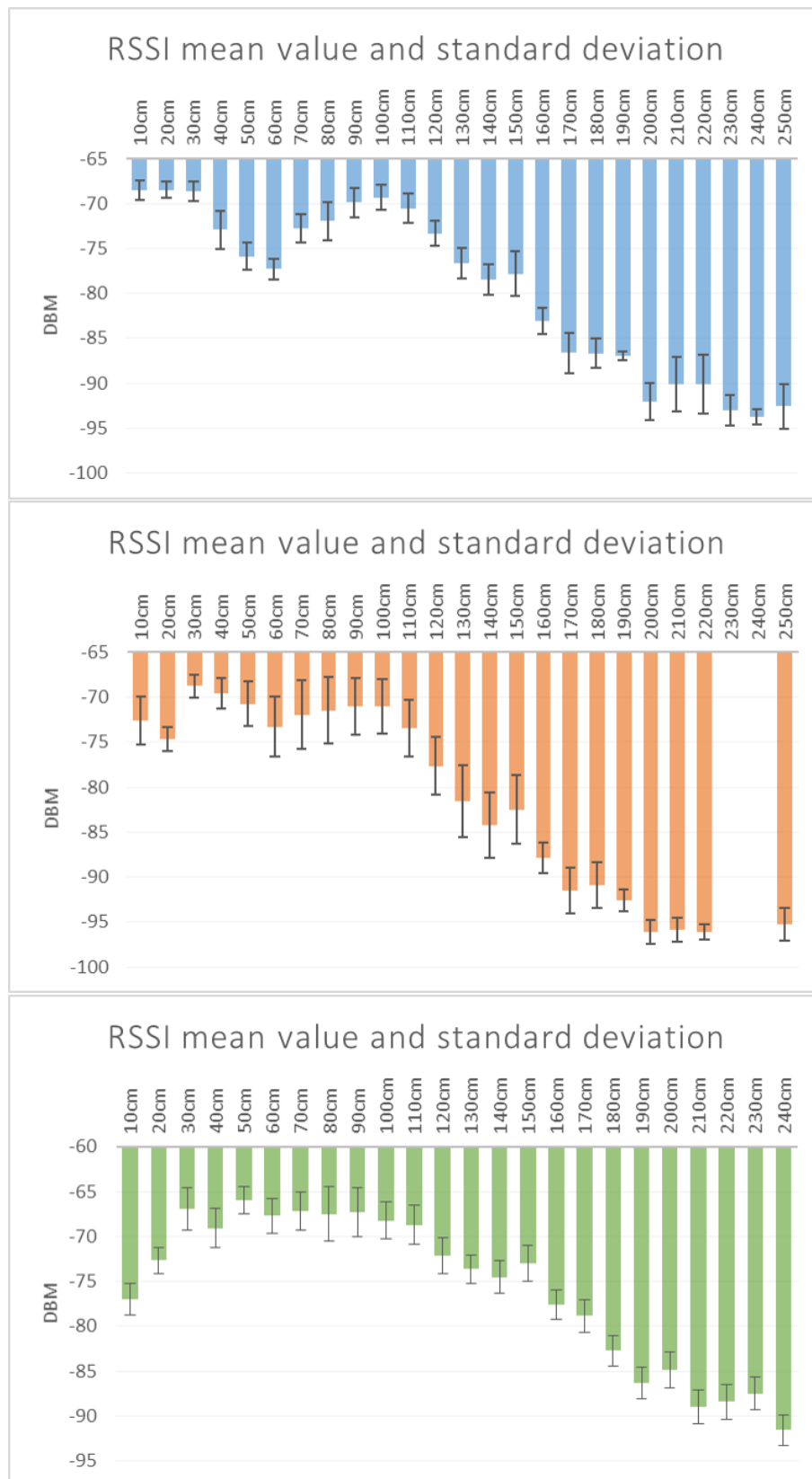


Figura 5.12: Valores médios de RSSI em relação a distância e desvio padrão para as antenas 1-3 com humidade superior.

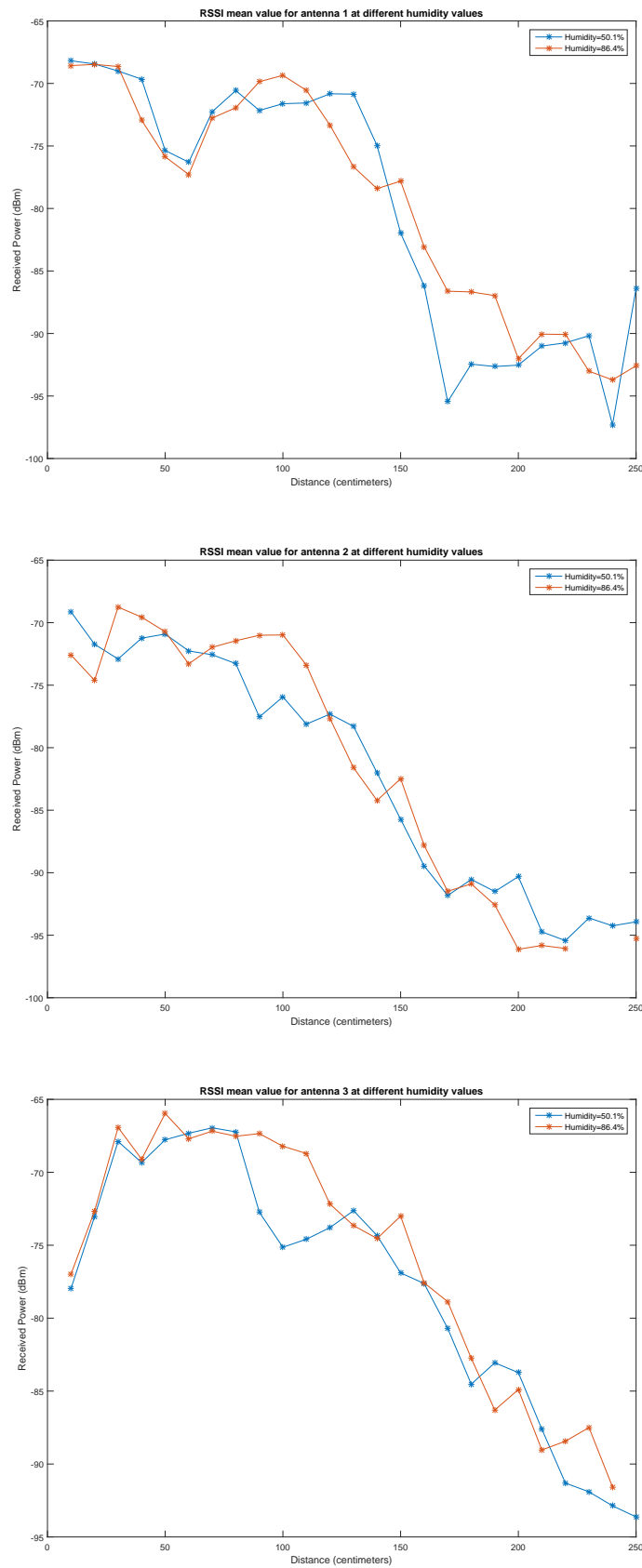


Figura 5.13: Valores médios de RSSI em relação a distância para as antenas 1-3 com diferentes valores de humidade e temperatura.

### 5.6.1 Posição Horizontal

A figura 5.14 apresenta os valores médios de RSSI e desvio padrão para as antenas 1-3 em posição horizontal. O desvio padrão apresentado graficamente corresponde à soma e subtração do valor do desvio padrão calculado. Observa-se que as curvas apresentam agora um formato idêntico a uma curva logarítmica. O desvio padrão aparenta ter um crescimento gradual em função da distância, existindo para a antena 2 uma região a partir dos 100 centímetros onde se verifica valores superiores de desvio padrão que não se manifesta na mesma intensidade nas demais antenas.

### 5.6.2 Comparação

Para efetuar a comparação das medidas obtidas com posições diferentes pode ser observado na figura 5.15 os gráficos para as antenas 1-3 de valores médios de RSSI obtidos com as posições vertical e horizontal.

Analisando os gráficos torna-se evidente que a posição horizontal proporciona curvas aproximadamente logarítmicas, o formato que se esperaria do sinal. Apesar do formato das curvas se aproximar do esperado, verifica-se que os valores de RSSI obtidos na posição vertical são superiores para o intervalo compreendido entre os 35 e os 160 centímetros. É possível assumir que a troca de posição dos *dongles* USB teve forte impacto no modelo do sinal obtido.

### 5.6.3 Ajuste da Curva

Dado que a curva obtida em posição horizontal se aproxima de uma curva logarítmica e que a posição das antenas corresponde à posição utilizada a bordo do AgrobV16, é favorável obter a parametrização das curvas segundo o modelo LNS para utilização na estimativa de localização.

Uma vez que a escala de distância apresentada corresponde à projeção no solo da distância entre a antena e o *iBeacon*, é necessário ajustar a escala para as distâncias reais. A distância real pode ser obtida através da equação 5.1 em função da distância no solo ( $d$ ) e da altura a que a antena se encontra ( $h$ ).

$$D_{real} = \sqrt{d^2 + h^2} \quad (5.1)$$

Após o ajuste da escala, os valores médios de RSSI foram convertidos para escala logarítmica e foi aplicado um algoritmo de regressão linear utilizando o erro médio quadrático para determinar os parâmetros ótimos da curva logarítmica ajustada. A figura 5.16 apresenta os gráficos que comparam os valores médios de RSSI previamente obtidos, mas agora reescalados para a distância real, com a curva logarítmica ajustada. Os parâmetros obtidos segundo o modelo LNS são apresentados por intermédio de equações. A equação 5.2 corresponde à antena 1, com  $P_0$  igual a -63.1dBm,  $n$  igual a 1.17 e um erro médio quadrático de 5.85. A equação 5.3 corresponde à antena 2, com  $P_0$  igual a -68.6dBm,  $n$  igual a 1.17 e um erro médio quadrático de 5.1. A equação 5.4 corresponde à antena 3, com  $P_0$  igual a -57.1dBm,  $n$  igual a 1.45 e um erro médio quadrático de

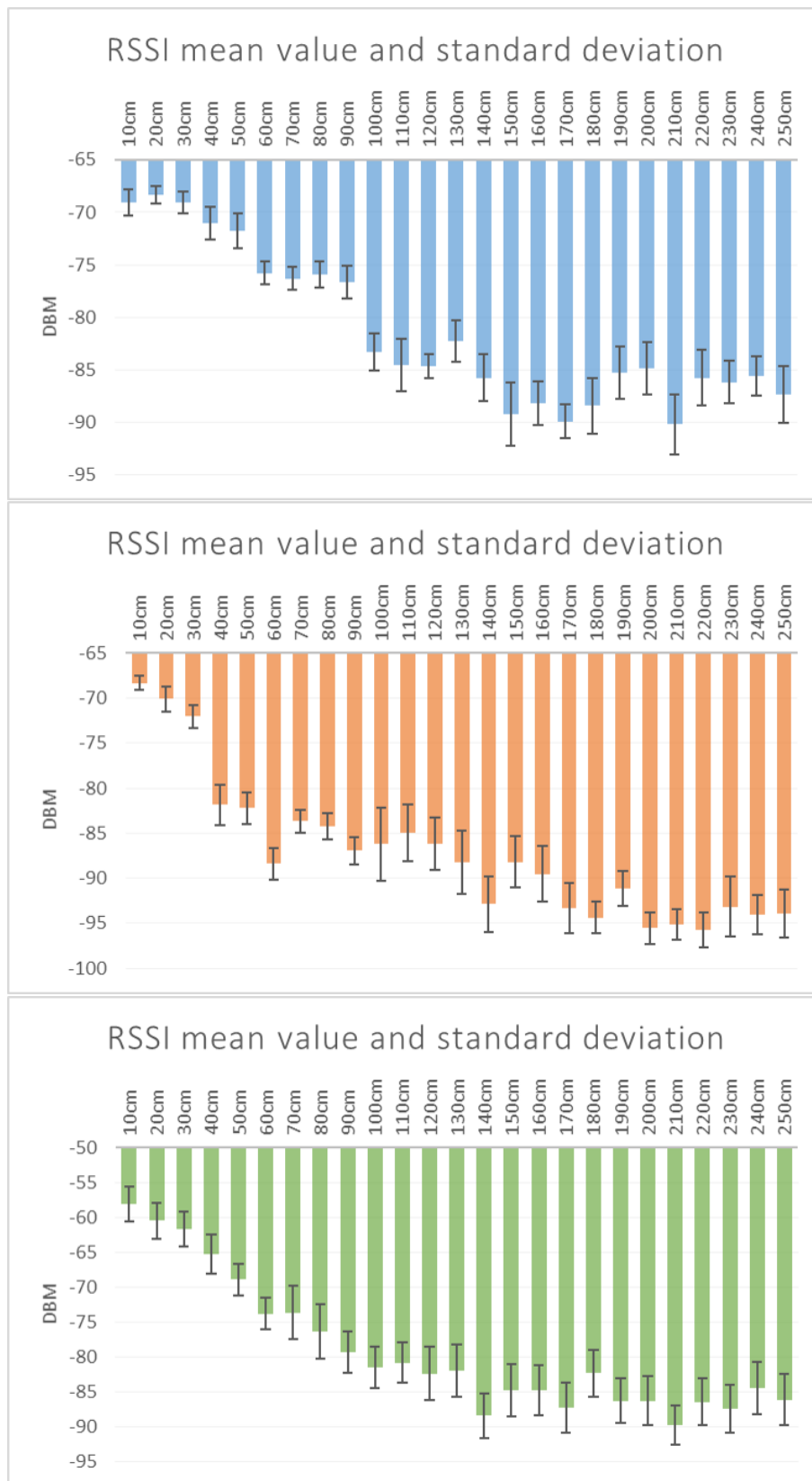


Figura 5.14: Valores médios de RSSI em relação a distância e desvio padrão para as antenas 1-3 em posição horizontal.



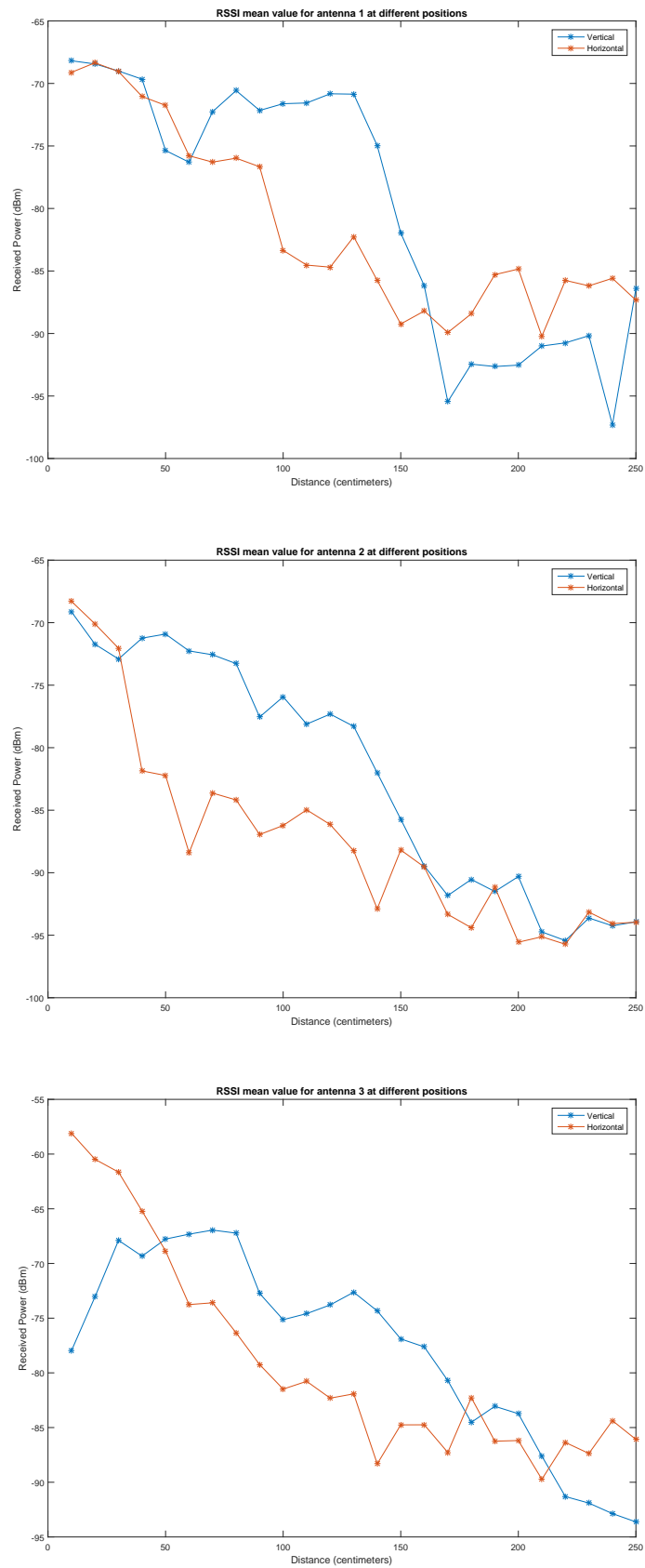


Figura 5.15: Valores médios de RSSI em relação a distância para as antenas 1-3 em posição vertical e horizontal.

4.7. Usualmente o valor atribuído a  $n$ , designado por expoente de atenuação, para propagação de sinais em ambiente exterior em espaço livre é 2, variando consoante as influências na proximidade (valor na proximidade de área urbana varia entre 3 a 5). Se fosse utilizado um valor próximo do teórico o modelo não seria adequado às antenas utilizadas na presente dissertação. As antenas 1 e 2 apresentam um valor idêntico para  $n$ . O valor do erro médio quadrático diminui quando a curva logarítmica se ajusta melhor aos dados. Tendo a antena 3 obtido o menor valor de erro médio quadrático é possível assumir que os dados obtidos com esta antena descrevem melhor a forma de uma curva logarítmica. O valor de  $P_0$  fornecido pelos fabricantes do *iBeacons* da Kontakt.io é -77dBm. Ao analisar os valores de  $P_0$  obtidos para cada um dos conjuntos de dados mais uma vez se verifica que o valor teórico não se adequa ao obtido neste contexto experimental.

$$P_d = -63.1 - 11.73 \log_{10}(d) \quad (5.2)$$

$$P_d = -68.6 - 11.74 \log_{10}(d) \quad (5.3)$$

$$P_d = -57.1 - 14.49 \log_{10}(d) \quad (5.4)$$

## 5.7 Variação da Orientação

Tal como referido na secção de implementação, a análise do impacto da orientação sobre a potência do sinal recebido consistiu em efetuar o teste de afastamento do *iBeacon* com diferentes orientações das antenas. De forma a poder ter dados discretizados em intervalos de 45° (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°) foram utilizados dois *iBeacons* em simultâneo, *iBeacon 1* - gQ0Q e *iBeacon 2* - gmta. Foi previamente considerado que não existia impacto relevante na alteração do *iBeacon*. Os *iBeacons* foram deslocados em sentidos opostos sobre um mesmo eixo, deste modo reduzindo a necessidade dos testes efetuados para metade. O teste iniciou com o gQ0Q em 0° e o gmta em 180°. Infelizmente a gravação de dados para os ângulos de 45° com gQ0Q e 225° para gmta sofreu um imprevisto e os seus dados não puderam ser utilizados. Os restantes valores de ângulo serão apresentados de modo a identificar um eventual impacto da orientação no RSSI.

### 5.7.1 Comparação

Analisando a figura 5.17 a primeira análise é que as antenas apresentam resultados bastante diferentes entre si. Entre as curvas obtidas a 0° de orientação, as curvas obtidas com esta configuração de teste não se assemelham às curvas obtidas no teste da posição vertical e horizontal, sendo o ângulo 0° igualmente utilizado, a elevação apresenta valores próximos, pelo que podemos concluir que a configuração utilizada neste teste causou influência nos dados obtidos. Um dos pontos em que a nova configuração se distingue bastante da anterior é o facto de o posicionamento dos *iBeacons* ser feito diretamente no solo ao invés da utilização de uma régua de material IFOAM

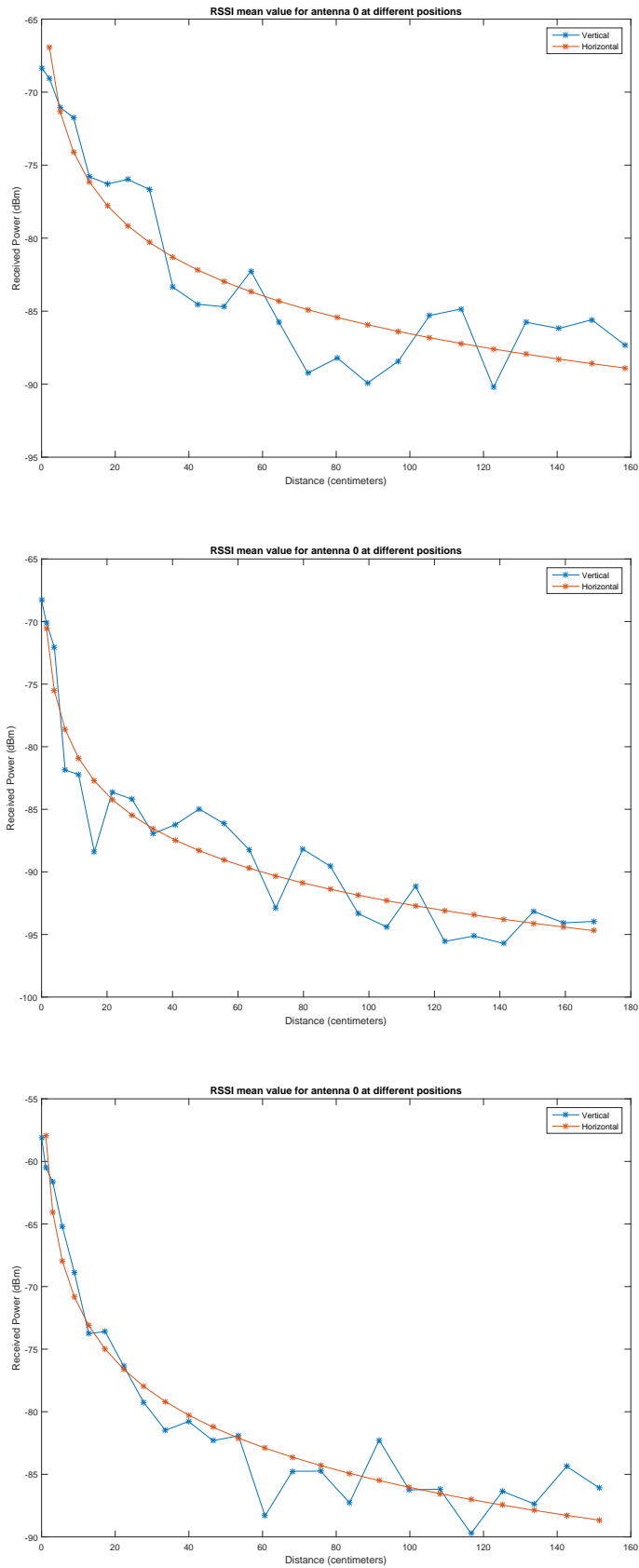


Figura 5.16: Valores médios de RSSI em relação a distância para as antenas 1-3 e respectivas curvas logarítmicas ajustadas.

como nos testes anteriores. Isto introduz uma série de reflexões e absorções de onda que não se verificavam.

Analisando o par Antena 1 e *iBeacon* gQ0Q, os valores de RSSI são bastante distintos entre as três curvas, mas a partir dos 160 centímetros observa-se uma similaridade nos valores obtidos para os ângulos de  $0^\circ$  e  $135^\circ$ , registando-se como que uma simetria nos picos entre ambas as curvas. Para a Antena 2 observa-se uma proximidade entre as curvas dos  $0^\circ$  e  $135^\circ$  sendo que para os valores superiores de distância as três curvas se aproximam. Para a Antena 3 os valores apesar de se aproximarem para intervalos de distância superiores, aparentemente são as curvas mais afastadas entre si. Isto pode ser relacionado com a configuração do *setup*. Recordando a configuração adotada no presente teste, a antena 3 situa-se no extremo direito da plataforma de apoio das antenas. Quando se efetuou a rotação da mesma plataforma a antena 3 é a que se encontra no ponto mais distante e sujeita a obstrução por parte do próprio material IFOAM de apoio como das restantes antenas. Considera-se que não existe totalmente *Line Of Sight* (LOS) para ângulos superiores a  $90^\circ$ , daí a possível diferença observada entre as curvas dos Ângulos  $0^\circ$  e  $135^\circ$  que nas nos pares antena-*iBeacon* anteriores se verificaram. De modo geral, para os ângulos testados entre as antenas e o *iBeacon* gQ0Q os valores de RSSI superiores foram obtidos para o ângulo  $0^\circ$ . Isto não se verifica para a antena 1 talvez por ter sido a antena que manteve LOS nos três ângulos. Por outro lado o valor de RSSI inferior verificou-se para o ângulo de  $90^\circ$ . Recordado a teoria do padrão de radiação de uma antena MIFA, seria esperado que os valores de ganho da antena fossem superiores para  $90^\circ$ , sendo que o que se verificou foi um conjunto de valores RSSI inferiores para este ângulo.

A figura 5.18 apresenta os valores médios de RSSI obtidos entre as antenas 1-3 e o *iBeacon* gmta. Analisando o par antena 1 e *iBeacon* gmta, verifica-se que as três curvas apresentam valores bastante distintos, ao contrário do que se observou com o *iBeacon* gQ0Q. O que acontece é que uma vez que os dois *iBeacons* foram posicionados em extremos opostos, para os testes obtidos com o gmta, estando a antena 1 posicionada no extremo esquerdo do suporte de antenas em IFOAM, para ângulos inferiores a  $270^\circ$  não se pode considerar a existência de LOS tal como previamente ocorreu com a antena 3. Deste modo os valores de RSSI superiores foram obtidos para  $180^\circ$ , e os inferiores para  $270^\circ$ . Comparando a curva obtida para  $270^\circ$  com a previamente obtida para  $90^\circ$  observamos que existe uma semelhança nos valores de RSSI para os extremos dos intervalos de distância. Já nos intervalos intermédios os valores obtidos são bastante diferentes. Isto pode ser resultado do posicionamento da antena ou considerar que os valores de RSSI obtidos para  $+90^\circ$  e  $-90^\circ$  resultam de diferentes ganhos no padrão de radiação desta antena. Para a antena 2 observa-se semelhanças entre as curvas correspondentes aos  $180^\circ$  e  $315^\circ$ . A curva dos  $270^\circ$  apresenta valores significativamente inferiores, existindo mesmo um intervalo, 200 centímetros, em que não foram detetados nenhuns valores de RSSI. Ao analisar a antena 3, que desta vez é a antena com maior LOS ao longo do teste, verifica-se que as três curvas são bastante próximas. Para os intervalos de 150 a 160 centímetros observa-se uma sobreposição das curvas. Uma vez que com esta antena se conseguiu maior exposição ao sinal nesta configuração e se observou elevada proximidade entre as curvas de RSSI obtidas, podemos assumir que é a antena com o padrão de ganho mais uniforme

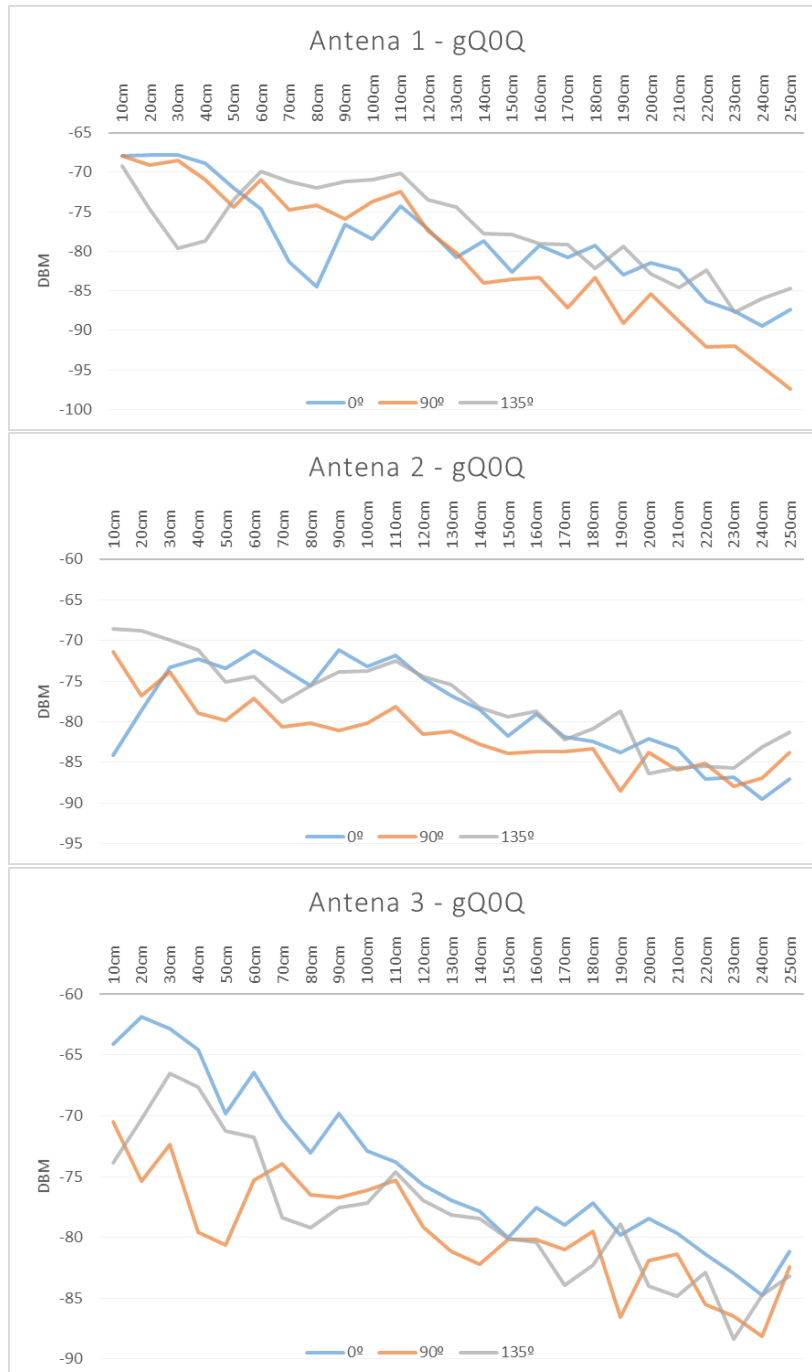


Figura 5.17: Valores médios de RSSI em relação a distância para as antenas 1-3 para diferentes ângulos utilizando o beacon gQ0Q.

caracterizando-se por ser a que apresenta maior omnidirecionalidade sendo portanto a que menos influencia sofre face à alteração de orientação.

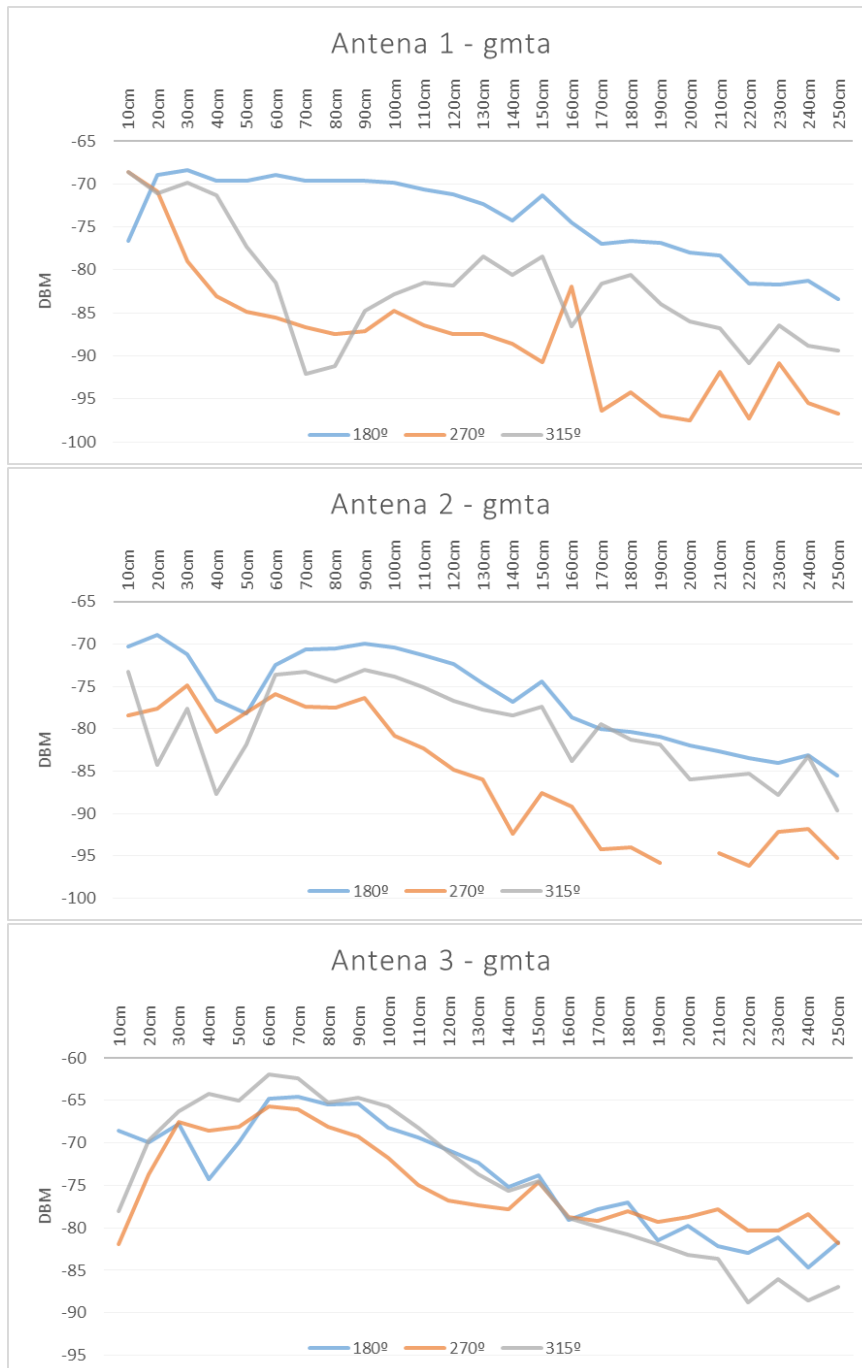


Figura 5.18: Valores médios de RSSI em relação a distância para as antenas 1-3 para diferentes ângulos utilizando o *beacon* gmta.

## 5.8 Estimação da posição dos *iBeacons*

Utilizando a curva logarítmica obtida para a antena 3 na posição horizontal em elevação, introduziu-se no nó *ibslam* em ROS a equação 5.4 de modo a obter a distância a partir das medidas RSSI captadas e gravadas no *rosbag* '2017-05-30-17-54-02.bag' gravado a 30 de Maio de 2017. Os dados foram processados pelo nó "ibslam" com uma taxa de velocidade de reprodução do *rosbag* igual a 0.6. Considerou-se a elevação da antena igual a 107 centímetros uma vez que esta se encontrava a bordo do robô durante a aquisição. A curva foi no entanto modelada com a antena a uma elevação igual a 130 centímetros. Para determinar a pose do robô AgrobV16 utilizou-se os dados de posicionamento fornecidos por um sistema Pozyx composto por quatro *beacons*. O sistema Pozyx utiliza ToF para determinar a distância. A estimativa da posição determinada por este sistema tem um erro estimado associado inferior a 20 centímetros.

Os *beacons* do sistema Pozyx foram dispostos de forma a formar um quadrado de 20 metros de comprimento lateral. Os *iBeacons* utilizados foram unPx na posição (18,0), o gmta na posição (20,2), o gQ0Q na posição (20,18) e finalmente o yvlm na posição (18,20). Sabendo a localização do robô e os valores de distância obtidos por processamento dos dados de RSSI calculados, utilizou-se o filtro de histograma para estimar a posição de cada *iBeacon*. O filtro de histograma pertence ao nó IB Slam e funciona de acordo com o *Beacon Mapping Procedure* apresentado em [8]. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 5.3 com os dados relativos a cada *iBeacon* sobre o número de segundos a que correspondem os dados, posição estimada do *iBeacon*, número de amostras, erro estimado e erro absoluto, considerando a pose definida pelo sistema Pozyx como sendo a posição real.

Os resultados obtidos revelam-se positivos uma vez que os valores estimados se aproximam dos valores reais. Para o *iBeacon* yvlm obteve-se um erro final absoluto igual a 1.9358 metros, para o gQ0Q, um erro final absoluto igual a 1.8249 metros, para gmta, um erro final absoluto igual a 1.9683 metros e para unPx, um erro final absoluto igual a 0.6201 metros.

O mesmo *rosbag* foi posteriormente reproduzido a 10% da velocidade. Esta reprodução foi feita tendo como valores de entrada os dados provenientes apenas da antena 3 e numa segunda fase os dados provenientes das 3 antenas de modo a poder comparar os resultados obtidos. Na tabela 5.4 estão apresentados os resultados obtidos utilizando os dados da antena 3. O erro absoluto médio obtido com o procedimento de mapeamento dos *beacons* foi 1.3543 metros. Na tabela 5.5 encontram-se apresentados os resultados idênticos para a utilização de três antenas. O erro absoluto médio obtido foi 1.4243 metros.

Na Figura 5.19 encontra-se representado o resultado do procedimento de mapeamento dos *beacons* correspondente à representação gráfica dos dados presentes nas tabelas 5.4 e 5.5. A azul encontra-se representado o trajeto descrito pelo robô AgrobV16, sendo os dados de posicionamento fornecidos pelo sistema Pozyx. A verde estão representadas as posições reais dos *beacons* e a vermelho as posições estimadas pelo filtro de histograma. As elipses em torno da posição estimada representam o erro estimado associado às estimativas de localização, sendo este erro determinado através do desvio padrão. Comparando os dados observa-se que existe um maior erro

iBeacon	Tempo(s)	Nº amost.	Pos x	Pos y	Erro x	Erro y
yvlm	370	1	12.0118	14.4256	20.7548	20.7406
	385	30	14.7325	16.7023	12.7255	12.7673
	389	57	15.6422	17.2279	7.6352	7.5429
	400	134	17.2646	18.1556	3.2576	3.2794
	443	298	17.9420	17.9437	2.5649	2.5087
	535	333	17.8574	17.8688	2.3996	2.5662
	676	526	17.5523	18.1166	2.0453	2.3184
gQ0Q	385	1	13.7970	16.0450	16.0122	16.0122
	389	12	15.8487	17.3729	22.0517	22.0779
	400	74	18.1520	18.6573	4.3950	4.3877
	443	224	18.9651	18.1613	2.5819	2.6337
	535	247	18.8635	18.0938	2.6835	2.7012
	676	544	18.1783	17.8924	1.6313	1.9026
gmta	443	1	15.9870	11.1110	22.0676	22.0676
	535	5	17.8085	7.4517	33.5715	35.1593
	544	18	19.1043	4.7142	21.1327	21.1468
	556	73	19.6816	2.6981	5.4446	5.4129
	562	112	19.6015	1.9282	4.3855	4.3072
	579	144	19.4945	1.8776	4.4925	4.2666
	676	291	18.1638	2.7090	3.0732	3.0980
unPx	544	8	19.5579	3.8954	23.3139	23.2376
	556	48	19.8036	1.7236	12.1904	12.1594
	562	89	19.3047	0.4091	4.4393	4.2761
	579	219	18.1464	0.1341	2.4024	2.5011
	676	292	17.7571	0.5706	2.0131	2.1876

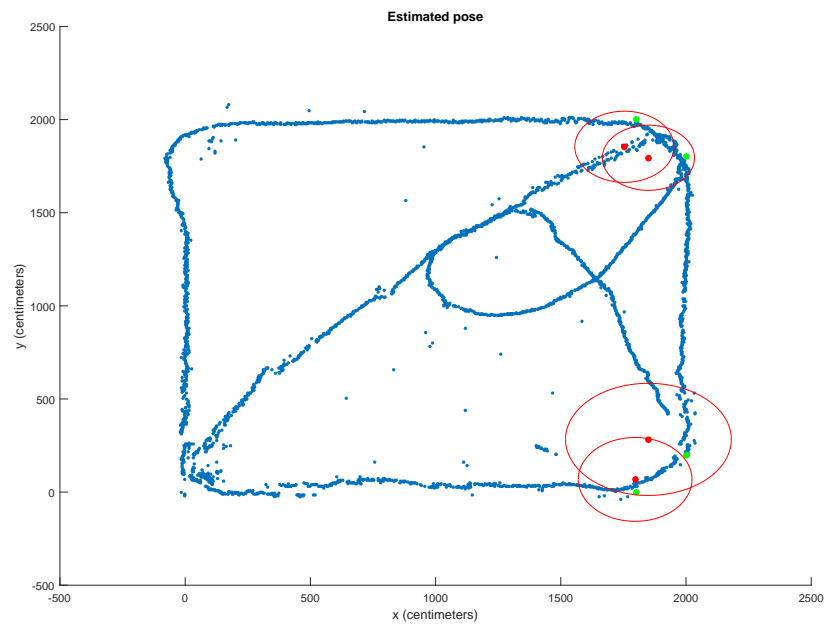
Tabela 5.3: Evolução dos resultados de aplicação do filtro de histograma.

absoluto associado à utilização das três antenas. Esta observação relaciona-se com o facto das antenas 1 e 2 sofrerem maior impacto quanto à variação da orientação relativamente à antena 3, o que se traduz numa convergência para um valor de posição mais afastado da posição real. A elipse de erro apresenta uma maior dimensão quando se utilizam as três antenas. Esta observação resulta de um volume superior de dados de entrada uma vez que agora se possui dados de mais duas antenas. Um aumento do número de dados leva ao aumento da confiança na posição estimada e consequentemente à redução da dimensão das elipses. No entanto as elipses deixam de circundar a posição real dos *beacons* gQ0Q e yvlm o que significa que existe necessidade de realizar uma melhor caracterização do erro do sistema.

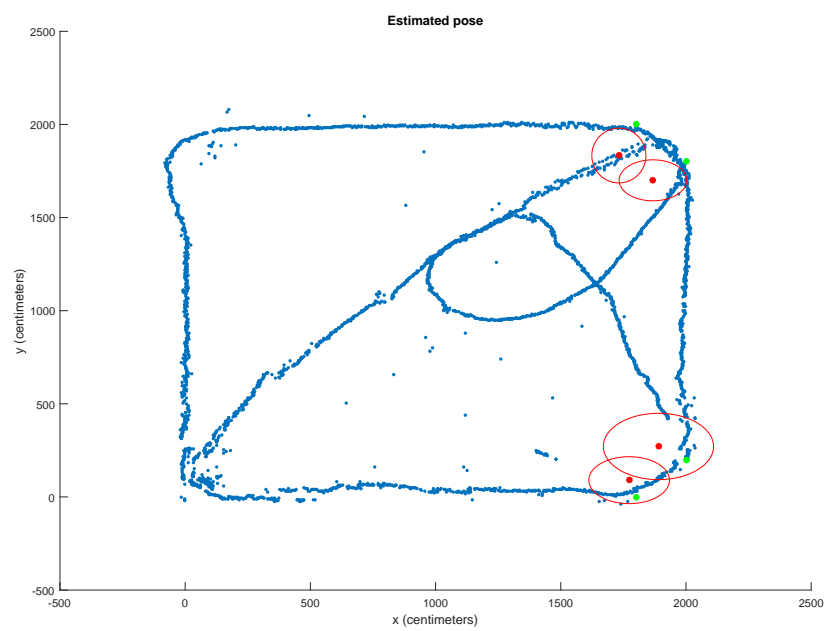
## 5.9 Resumo

Neste capítulo foram analisados os resultados dos testes efetuados para diversas configurações utilizando antenas de *dongles* USB e *iBeacons*.





(a)



(b)

Figura 5.19: Representação gráfica do resultado do procedimento de mapeamento dos beacons (a) utilizando os dados da antena 3 e (b) utilizando os dados das antenas 1-3.

iBeacon	Pos $x$	Pos $y$	Erro $x$	Erro $y$	Err. Abs.
yvlm	17.5414	18.5436	1.9826	1.9173	1.5269
gQ0Q	18.5064	17.9577	1.8456	1.7503	1.4942
gmta	18.5078	2.8314	3.3142	3.0174	1.7082
unPx	17.9779	0.6876	2.2791	2.2526	0.6880

Tabela 5.4: Resultados de aplicação do filtro de histograma com antena 3.

iBeacon	Pos $x$	Pos $y$	Erro $x$	Erro $y$	Err. Abs.
yvlm	17.3236	18.3398	1.0834	1.4792	1.7927
gQ0Q	18.6823	17.0005	1.3547	1.1005	1.6539
gmta	18.9057	2.7128	2.2033	1.7868	1.3060
unPx	17.7368	0.9074	1.6192	1.2674	0.9448

Tabela 5.5: Resultados de aplicação do filtro de histograma com as 3 antenas .

Inicialmente foram analisados os resultados dos testes que exploram a influência de um meio isolado e outro exposto a ruído nos valores de RSSI obtidos. Como seria de esperar, quando se utilizou a configuração no interior da câmara anecóica, o isolamento da estrutura reduziu interferências de natureza eletromagnética. Quando comparado aos resultados obtidos no exterior observou-se que os valores de desvio padrão são bastante inferiores no interior da câmara anecóica. Com os dados obtidos concluiu-se que o ruído eletromagnético tem influência no sinal BLE, principalmente no valor do desvio padrão. O parâmetro testado de seguida foi a influência da elevação das antenas. O conceito do teste surgiu derivado da análise de dados recolhidos a bordo do robô, onde as antenas se encontravam a uma elevação superior a 1 metro e os valores de RSSI observados eram superiores aos esperados quando se utilizou o modelo obtido por calibração ao nível do solo. Concluiu-se que os valores de RSSI são superiores quando as antenas foram colocadas a uma elevação do solo compreendida entre 100 e 130 centímetros, sendo portanto um fator importante a considerar numa implementação. Outros testes realizados procuraram detetar a existência de diferenças evidentes na utilização de diferentes *iBeacons*. As curvas obtidas foram bastante idênticas pelo que se concluiu que para os modelos de *iBeacons* utilizados não existe diferenças consideráveis nos valores de RSSI calculados, sendo o modelo utilizado independente do *iBeacon* em utilização. Foram executados testes em dias com diferentes valores de humidade e temperatura para testar a influência das mesmas no sinal. Apesar de algumas divergências menores, concluiu-se que para as distâncias praticadas não se verifica uma influência evidente dos valores de temperatura e humidade relativa. Após a obtenção das curvas de valores médios de RSSI no teste da elevação, verificou-se que as mesmas não se pareciam com uma curva logarítmica, surgindo a necessidade de testar a influência da posição da antena. Foram comparadas as posições vertical e horizontal e concluiu-se que este parâmetro influencia a curva obtida uma vez que as curvas obtidas após a alteração da posição da antena se classificam como sendo logarítmicas, apesar dos valores de RSSI de modo geral serem inferiores. Após alguns testes surgiu a

necessidade de testar de que modo a orientação entre o *iBeacon* e a antena tem impacto na curva de RSSI. Foram apresentados os resultados com seis ângulos, utilizando dois *iBeacons* e três ângulos diferentes para o *setup*. Após analisar os dados concluiu-se que a orientação da antena não pode ser desprezada e é recomendável integrar o padrão de radiação da antena no modelo do sistema. A localização estimada do *iBeacons* foi bem sucedida, estimando as quatro posições com erros absolutos inferiores a 1.5 metros. Uma melhor modelação do sistema, caracterização do erro do sistema, e da variação do padrão de radiação com a orientação contribuirão para a diminuição destes intervalos de erro.



## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões finais sobre os resultados da dissertação e uma secção indicando o trabalho futuro que se sugere para o aproveitamento e melhoria do sistema desenvolvido.

### 6.1 Conclusões

Ao findar a presente dissertação concluiu-se que existe potencial na utilização da tecnologia BLE como auxílio num sistema de localização. Tendo obtido em meio experimental uma margem de erro absoluto inferior a 1.5 metros, e sabendo os passos a seguir para melhorar a precisão do sistema, considera-se válido o seu desenvolvimento para aplicação a bordo do AgrobV16.

O sistema BLE caracterizou-se por ser de fácil reconfiguração. O sistema de *iBeacons* apresenta elevada portabilidade, sendo extremamente fácil de instalar no local desejado. O sistema foi desenvolvido respeitando o parâmetro de modularidade.

Em relação à escalabilidade, a expansão do sistema não só é possível como simples. Se o utilizador desejar aumentar o número de antenas BLE apenas necessita de possuir portas USB disponíveis. O aumento do número de *iBeacons* apenas se encontra associado à alteração do código para filtrar o ID dos mesmos.

A exatidão foi validada em termos de mapeamento, carecendo de melhor caracterização do erro uma vez que foi utilizada uma distribuição gaussiana de média nula que não representa o erro do sistema.

Os componentes utilizados no desenvolvimento do sistema são do tipo COTS. Não existe nenhum desenvolvimento a nível de *hardware* pelo que a complexidade de implementação é bastante reduzida. Relativamente ao custo associado, considerando que a plataforma robótica já possui unidade de processamento e que a infra-estrutura de sensorização da vinha já existe sendo feita utilizando sensores que implementem *Bluetooth*, desempenhando o papel de *iBeacons*, o custo associado ao sistema é apenas relativo aos *dongles* USB que se caracterizam por ser componentes de *hardware* de custo reduzido.

A calibração efetuada permitiu concluir que possuindo um modelo adequado da propagação de onda, não existe necessidade de calibração recorrente, concentrando-se o esforço numa primeira fase de calibração e parametrização. O sistema apresenta alguma vulnerabilidade ao meio, tanto a nível de ruído eletromagnético como obstrução do LOS, decaindo a robustez quando presente num ambiente dinâmico.

## 6.2 Trabalho Futuro

Existe um conjunto de pontos que poderão ser tomados de modo a melhorar os resultados obtidos e portanto a qualidade da estimativa de localização. Em primeiro lugar deve ser criado um modelo do padrão de ganho de cada uma das antenas implicadas no sistema. Esta informação permite relacionar os valores de RSSI com a orientação minimizando o erro de estimativa. Poderá ser repetido o teste de parametrização em função orientação para validar o padrão de radiação.

Outro ponto a melhorar consiste na reintegração da antena 0 (antena interna da Raspberry) no modelo. A antena 0 apresentava no exterior uma dispersão aproximadamente bimodal dos valores de RSSI. No entanto, cada um dos dois conjuntos de valores RSSI aparenta estar bem definido e a curva resultantes dos valores médios de RSSI apresenta-se como a média destes dois conjuntos, ficando posicionada entre ambos. No futuro deverá ser criada uma rotina para filtrar os valores de RSSI (por exemplo um filtro de média gaussiana) que retorne o valor de RSSI filtrado a ser utilizado. Isto implica um aumento na latência em função de um valor mais preciso, possibilitando o aproveitamento do potencial da antena 0.

Deverá ser realizada uma caracterização do erro do sistema de modo a melhorar os resultados de estimativa de posicionamento dos *beacons*.

Tendo obtido estimativas de posicionamento dos *beacons* o passo seguinte será agora utilizar essa informação para auxílio à correção da localização do robô, podendo o sistema ser utilizado para corrigir por exemplo os dados de odometria.

# Referências

- [1] Illah R. Nourbakhsh Roland Siegwart. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. The MIT Press, 2004.
- [2] Ivo Emanuel Milheiro de Sousa. *Plataforma robótica genérica para robô de logística, serviços ou vigilância com mecanismo de troca automática de bateria*. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.
- [3] Nicola Cinefra. An adaptive indoor positioning system based on Bluetooth Low Energy RSSI. Tese de mestrado, Politecnico di Milano, 2013.
- [4] Joakim Lindh. Bluetooth® Low Energy beacons, Janeiro 2015. Texas Instruments Application Report.
- [5] Daan Scheenrens. Practical indoor localization using Bluetooth. Tese de mestrado, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science Information Systems Engineering University of Twente, Janeiro 2012.
- [6] Erik Dahlgren e Hasan Mahmood. Evaluation of indoor positioning based on Bluetooth Smart technology. Tese de mestrado, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, Junho 2014.
- [7] Marcos Brandão Duarte. Localização para smart devices tirando partido de iBeacons. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.
- [8] M. Duarte, F. Neves dos Santos, A. Sousa, e R. Morais. Agricultural wireless sensor mapping for robot localization.
- [9] Victor A. F. de Campos, Douglas D. S. Santana, Celso M. Furukawa, e Newton Maruyama. Filtros de partículas aplicados à estimação de trajetórias. Janeiro 2004. URL: [https://www.researchgate.net/publication/242150754\\_FILTROS\\_DE\\_PARTICULAS\\_APLICADOS\\_A\\_ESTIMACAO\\_DE\\_TRAJETORIAS](https://www.researchgate.net/publication/242150754_FILTROS_DE_PARTICULAS_APLICADOS_A_ESTIMACAO_DE_TRAJETORIAS).
- [10] Ivo Rocha. Localization technology in special contexts: a collaborative anti-lost application. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Julho 2015.
- [11] Saad Chaudhry. Indoor Location Estimation Using an NFC-Based Crowdsourcing Approach for Bootstrapping. Tese de mestrado, University of Oulu, Oulu, Finlândia, Maio 2013.
- [12] Rui Pinto, Filipe Neves dos Santos, e Armando Sousa. Robot Self-Localization Based on Sensor Fusion of GPS and iBeacons Measurements. *11th Doctoral Symposium in Informatics Engineering*, Fevereiro 2016. URL: [https://www.researchgate.net/publication/308483334\\_Robot\\_Self-Localization\\_Based\\_on\\_Sensor\\_Fusion\\_of\\_GPS\\_and\\_iBeacons\\_Measurements](https://www.researchgate.net/publication/308483334_Robot_Self-Localization_Based_on_Sensor_Fusion_of_GPS_and_iBeacons_Measurements).

- [13] Luís Oliveira, Carmelo Di Franco, Traian E. Abrudan, e Luís Almeida. Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation. *Proceedings of the 16th international conference on advanced robotics*, Novembro 2013. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6766515/>.
- [14] Yongguang Chen e Hisashi Kobayashi. Signal strength based indoor geolocation. *International conference on communications*, 1:436–439, Abril 2002. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/996891/>, doi:10.1109/ICC.2002.996891.
- [15] Moustafa A. Youssef, Ashok Agrawala, e A. Udaya Shankar. WLAN location determination via clustering and probability distributions. Em *Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*, PERCOM '03, páginas 143–, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=826025.826335>.
- [16] M. Stella, M. Russo, e D. Begušić. Fingerprinting based localization in heterogeneous wireless networks. *Expert Syst. Appl.*, 41(15):6738–6747, Novembro 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2014.05.016>, doi:10.1016/j.eswa.2014.05.016.
- [17] Kai Wendlandt, Marcus Berbig, e Patrick Robertson. Indoor localization with probability density functions based on Bluetooth. *International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Setembro 2005. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1651798/>, doi:10.1109/PIMRC.2005.1651798.
- [18] Marco Altini, Davide Brunelli, Elisabetta Farella, e Luca Benini. Bluetooth indoor localization with multiple neural networks. Em *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Wireless Pervasive Computing*, ISWPC'10, páginas 295–300, Piscataway, NJ, USA, 2010. IEEE Press. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1856330.1856382>.
- [19] Qian Dong e Waltenegus Dargie. Evaluation of the reliability of RSSI for indoor localization. Em *International Conference on Wireless Communications in Unusual and Confined Areas*, Clermont Ferrand, France, 2012. IEEE Press. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6402492/>, doi:10.1109/ICWCUCA.2012.6402492.
- [20] Sudarshan S. Chawathea. Beacon placement for indoor localization using Bluetooth. Em *International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Beijing, China, 2008. IEEE. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4732690/>, doi:10.1109/ITSC.2008.4732690.
- [21] Liang Chen, Ling Pei, Heidi Kuusniemi, Yuwei Chen, Tuomo Kröger, e Ruizhi Chen. Bayesian fusion for indoor positioning using bluetooth fingerprints. *Wireless Personal Communications*, 70(4):1735–1745, 2013. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11277-012-0777-1>, doi:10.1007/s11277-012-0777-1.
- [22] Javier Rodas, Carlos J. Escudero, e Daniel I. Iglesia. Bayesian filtering for a Bluetooth positioning system. *IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems*, Outubro 2008. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4726130/>, doi:10.1109/ISWCS.2008.4726130.



- [23] Aswin N. Raghavan, Harini Ananthapadmanaban, Manimaran Sivasamy Sivamurugan, e Balaraman Ravindran. Accurate mobile robot localization in indoor environments using bluetooth. Em *ICRA*, páginas 4391–4396. IEEE, 2010. URL: <http://dblp.uni-trier.de/db/conf/icra/icra2010.html#RaghavanASR10>.
- [24] Dierna Giovanni Luca e Machi Alberto. Towards accurate indoor localization using iBeacons, fingerprinting and particle filtering. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, Outubro 2016.
- [25] Faheem Zafari e Ioannis Papapanagiotou. Enhancing iBeacon based micro-location with particle filtering. Em *GLOBECOM*, 2015.
- [26] Ana Cristina Carvalho da Ponte. Avaliação do Desempenho de Técnicas de Localização Relativa de Robôs Móveis Baseada no RSS em Ambientes Interiores. Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Julho 2010.
- [27] Tapan Pattnayak e Guhapriyan Thanikachalam. *Antenna Design and RF Layout Guidelines*, 2016. CYPRESS.
- [28] Audun Andersen. Small Size 2.4 GHz PCB antenna, 2008. Application Note AN043, TEXAS INSTRUMENTS.
- [29] BLE antenna design guide, Março 2015. Application Note, NXP Semiconductors.
- [30] Compact Reach Xtend™ Bluetooth®, 802.11b/g WLAN Chip Antenna, 2008. Application Note AN048, TEXAS INSTRUMENTS.
- [31] Jari Luomala e Ismo Hakala. Effects of temperature and humidity on radio signal strength in outdoor wireless sensor networks. *Proceedings of the 2015 Federated Conference on Computer Science and Information System*, 2015. doi:10.15439/2015F241.