

Localització en interiors mitjançant Bluetooth Smart per assistir a invidents o persones amb dificultats visuals

Autor: Albert Cámara Viñals

Director: Joan Antoni Melià Seguí

Màster Universitari en Enginyeria de Telecomunicació

08/06/2015



Aquesta obra està subjecta a una llicència de:
[Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada
3.0 Espanya de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

© Albert Cámara Viñals

Reservats tots els drets. Està prohibit la reproducció total o parcial d'aquesta obra per qualsevol mitjà o procediment, compresos la impressió, la reprografia, el microfilm, el tractament informàtic o qualsevol altre sistema, així com la distribució d'exemplars mitjançant lloguer i préstec, sense l'autorització escrita de l'autor o dels límits que autoritzi la Llei de Propietat Intel·lectual.

FITXA DEL TREBALL FINAL

Títol del treball:	<i>Localització en interiors mitjançant Bluetooth Smart per assistir a invidents o persones amb dificultats visuals</i>
Nom de l'autor:	<i>Albert Cámara Viñals</i>
Nom del consultor:	<i>Joan Antoni Melià Seguí</i>
Data de lliurament:	<i>06/2015</i>
Àrea del Treball Final:	<i>Sistemes de comunicació per l'Internet de les coses</i>
Titulació:	Màster Universitari en Enginyeria de Telecomunicació

Resum del Treball:

Avui dia, les tecnologies de posicionament s'utilitzen en una àmplia varietat d'àrees com ara l'assistència en la conducció i en la traçabilitat de mercaderies per anomenar alguns exemples. Però des de la introducció del sistema de posicionament global (*GPS*), que s'ha convertit en un estàndard per a aplicacions de posicionament a l'aire lliure, no hi ha hagut el mateix avenç en les tecnologies i tècniques de posicionament en interiors o en àrees on el sistema *GPS* no està disponible. Tot i així existeix una àmplia investigació que s'ha dedicat a explorar el tema en base a una gran varietat de tecnologies, com ara *WLAN*, *RFID* o *UWB*. Però cap d'elles ha donat lloc a un estàndard tan àmpliament acceptat com *GPS*, tot i així s'han aconseguit avenços significatius. Al 2010, amb l'aparició d'una nova tecnologia *Bluetooth* anomenada *Bluetooth Smart* i coneguda també com *Bluetooth Low Energy (BLE)*, s'obria un nou camp per a implementar aplicacions de posicionament amb dispositius i tecnologies de baix consum. El present treball aborda l'ús de la tecnologia *Bluetooth Smart* i dels *Beacons* per assistir a les persones invidents o amb dificultats visuals en els seus desplaçaments per interiors. Amb aquesta finalitat s'exploren, s'avaluen i és comparen diferents algorismes i mètodes de posicionament basats en *Bluetooth Smart* i *Beacons*.

Abstract:

Nowadays, location and positioning technologies are used in a lot of applications like navigation or goods tracking. But since the introduction of the Global Positioning System (*GPS*), which has become a standard for outdoor positioning applications, there hasn't been the same progress in technologies and techniques for indoor location or for places where *GPS* isn't available. Extensive research has been dedicated to exploring the topic based on a variety of technologies such as *WLAN*, *RFID*, or *UWB*. But none of these has become a widely accepted standard, although significant progress has been made. In 2010, with the introduction of the new *Bluetooth* technology called *Bluetooth Smart* and also known as *Bluetooth Low Energy (BLE)* opens a new field to develop positioning applications with low power devices. This paper explores the usability of *Bluetooth Smart* and *Beacons* to assist blind or visually impaired people in their movements in indoor spaces. For this purpose a selection of algorithms and approaches for positioning that use *Bluetooth Smart* and *Beacons* are explored, evaluated and compared.

Paraules clau:

Indoor localization, Internet of Things, Bluetooth Low Energy, Beacons, Bluetooth Smart, Blind assistant navigation system, Visually impaired

Sumari

1. Introducció	1
1.1 Motivació	1
1.2 Objectius	1
1.3 Enfocament i mètode seguit	2
1.4 Planificació del Treball.....	2
1.5 Breu sumari de resultats obtinguts	5
1.6 Breu descripció dels altres capítols de la memòria	5
2. Estat dels sistemes de posicionament en interiors	7
2.1 Mètriques per als sistemes de posicionament en interiors.....	7
2.1.1 Exactitud.....	7
2.1.2 Precisió.....	7
2.1.3 Disponibilitat	7
2.1.4 Àrea de cobertura	8
2.1.5 Escalabilitat	8
2.1.6 Cost.....	8
2.1.7 Privacitat.....	8
2.1.8 Robustesa i adaptabilitat	8
2.2 Tecnologies de posicionament en interiors.....	9
2.2.1 Identificació per radiofreqüència (RFID).....	9
2.2.2 UltraWideband (UWB)	9
2.2.3 Infrarojos	9
2.2.4 Zigbee	10
2.2.5 Xarxa d'àrea local sense fils (WLAN).....	10
2.2.6 Basats en tecnologia cel·lular	10
2.2.7 Bluetooth	10
2.2.8 Dead Reckoning	11
2.2.9 Basats en tecnologia d'imatge.	11
2.3 Tipus de mesures per al posicionament	12
2.3.1 Potència (RSS).....	12
2.3.2 Temps d'arribada (TOA)	12
2.3.3 Diferència de temps d'arribada (TDOA)	13
2.3.4 Desviació de freqüència (POA).....	13
2.3.5 Angle d'arribada (AOA).....	13
2.4 Mètodes de posicionament.....	13

2.4.1	Triangularització	13
2.4.1.1	Lateration	13
2.4.1.2	Angulation	14
2.4.1.3	Posicionament hiperbòlic	14
2.4.2	Fingerprinting.....	15
2.4.3	Proximitat	15
2.5	Treballs i projectes actuals de IPS amb Bluetooth Smart.....	15
3.	Sistema de posicionament amb tecnologia Bluetooth.....	18
3.1	Requisits de disseny.....	18
3.2	Bluetooth Smart.....	19
3.2.1	Arquitectura de Bluetooth Smart.....	19
3.2.1.1	Capa física	20
3.2.1.2	Capa d'enllaç	21
3.2.1.3	Attribute Protocol (ATT).....	21
3.2.1.4	Generic Attribute Profile (GATT).....	22
3.2.1.5	Generic Access Profile (GAP)	22
3.2.2	Topologia de xarxa	22
3.2.2.1	Radiodifusió i observació	22
3.2.2.2	Connexió.....	24
3.2.3	Estats d'operació de Bluetooth Smart.....	25
3.2.4	Rang de cobertura de Bluetooth Smart.....	26
3.3	Mesures del senyal Bluetooth Smart per al posicionament.....	26
3.3.1	Transmitted Power Level (TPL)	26
3.3.2	Received Signal Strength Indicator (RSSI)	27
3.3.3	Inquiry Response Rate (IRR).....	27
3.4	Mètodes de posicionament pel senyal Bluetooth Smart.....	28
3.4.1	Trilateració a partir de la mesures d'atenuació.....	28
3.4.2	Fingerprinting.....	29
3.4.3	Proximitat	30
3.5	Anàlisi inicial de Bluetooth Smart com a tecnologia per IPS	31
4.	Entorn de proves	33
4.1	Dispositius i software.....	33
4.1.1	Elecció dels dispositius: Beacons/Dispositus Bluetooth Smart.....	33
4.1.2	Beacons de Kontakt i les seves característiques	34
4.1.2.1	Paràmetres: UUID, Major and Minor als Beacons de Kontakt	34
4.1.2.2	Interval de radiodifusió als Beacons de Kontakt	35
4.1.2.3	Potència de transmissió als Beacons de Kontakt	37

4.1.2.4	Estructura del paquet de radiodifusió als Beacons de Kontakt	38
4.1.2.5	Serveis presents als Beacons de Kontakt	38
4.1.2.6	Estructura de la resposta d'escaneig als Beacons de Kontakt	38
4.1.3	Aplicacions	38
4.1.3.1	SDK de Kontakt.....	39
4.1.3.2	Altres aplicacions	40
4.2	Descripció de l'escenari de proves	40
4.3	Obtenció del dataset (<i>Mesures RSSI</i>).....	44
4.3.1	Aplicacions Android	44
4.3.1.1	Beacon Logger amb la <i>SDK d'Android</i>	44
4.3.1.2	Beacon Logger amb la <i>SDK de Kontakt</i>	45
4.4	Mesura o estimació de la distància.....	47
4.4.1	Models de pèrdues de propagació o <i>path loss</i>	48
4.4.1.1	Model de pèrdues de propagació Log-distance	48
4.4.1.2	Model de pèrdues de propagació definit per la ITU	49
4.4.1.3	Model de pèrdues de propagació de Kontakt	50
4.5	Algorismes de posicionament.....	51
4.5.1	Trilateration	51
4.5.1.1	Mètodes matemàtics per a la resolució de la trilateració	52
4.5.2	Fingerprinting.....	57
4.5.3	Proximity.....	57
5.	Avaluació dels resultats de posicionament	58
5.1	Anàlisi previ del senyal Bluetooth Smart	58
5.2	Avaluació del model de pèrdues de propagació	62
5.2.1	Model de propagació per al Beacon D0:F8:F2:95:3A:5C a l'escenari 2	63
5.2.2	Model de propagació per al Beacon D6:40:86:6D:BD:DF a l'escenari 2 ...	64
5.2.3	Model de propagació per al Beacon D9:A3:28:6A:A7:F1 a l'escenari 2	65
5.2.4	Model de propagació per al Beacon F5:7A:A5:E3:EF:18 a l'escenari 2	66
5.2.5	Model de propagació per al Beacon FF:A6:7C:AF:B0:CB a l'escenari 2 ...	67
5.3	Aplicació i anàlisi dels algorismes de posicionament	68
5.3.1	Trilateració.....	68
5.3.1.1	Posicionament mitjançant trilateració a nivell d'habitació	71
5.3.1.2	Posicionament mitjançant trilateració a nivell de vivenda	73
5.3.2	Fingerprinting.....	74
5.3.2.1	Captura de les dades necessàries pel fingerprinting	74
5.3.2.2	Posicionament mitjançant fingerprinting a nivell de vivenda	75
5.3.3	Proximitat	77

5.3.4	Avaluació i comparació dels resultats obtinguts.....	78
6.	Conclusions i treballs futurs.....	79
6.1	Conclusions.....	79
6.2	Treballs futurs.....	80
7.	Glossari.....	81
8.	Bibliografia	82
9.	Annexes	87
9.1	Recursos: Dataset, scripts i aplicacions.....	87
9.2	Kontakt Beacon	88
9.2.1	Technical specification.....	88
9.2.2	Beacon services	88
9.2.3	Advertising packet structure.....	92
9.2.4	Scan response packet structure.....	93
9.3	Descripció dels entorns de test.....	94
9.3.1	Plànol i distribució dels dispositius a l'escenari room1	94
9.3.2	Plànol i distribució dels dispositius a l'escenari building1	95

Índex de figures

Figura 1: Diagrama de Gantt.....	4
Figura 2: Pila de protocols de <i>Bluetooth Smart</i>	19
Figura 3: Canals freqüencials de Bluetooth Smart.....	20
Figura 4: Topologia <i>broadcast</i> a <i>Bluetooth Smart</i>	23
Figura 5: Topologia de connexió a <i>Bluetooth Smart</i>	24
Figura 6: Estats d'operació d'un dispositiu <i>Bluetooth Smart</i>	25
Figura 7: Exemple de posicionament mitjançant trilateració en dues dimensions	28
Figura 8: Exemple de posicionament mitjançant el mètode fingerprinting	30
Figura 9: Exemple de posicionament mitjançant el mètode basat en proximitat.....	31
Figura 10: Exemple d'assignació d'identificadors als Beacons	35
Figura 11: Efectes del interval de transmissió en l'estabilitat del senyal transmès	36
Figura 12: Efectes del interval de transmissió en la exactitud del posicionament.....	37
Figura 13: Plànol de la vivenda on s'han definit els diferents escenaris de proves.....	40
Figura 14: Plànol de l'escenari de proves 1.	41
Figura 15: Plànol de l'escenari de proves 2.	41
Figura 16: Plànol de l'escenari de proves 3.	41
Figura 17: Plànol de l'escenari de proves 4	42
Figura 18: Plànol de l'escenari de proves 5.	42
Figura 19: Bluetooth Beacon i Cloud Beacon	43
Figura 20: Exemple de distribució de dispositius a una localització	43
Figura 21: Interfícies d'usuari de Beacon Logger Android <i>SDK</i> i funcionalitats	44
Figura 22: Interfícies d'usuari de Beacon Logger Kontakt <i>SDK</i> i funcionalitats.....	45
Figura 23: Exemple de posicionament mitjançant el mètode del centroide.....	55
Figura 24: Regions o zones de proximitat al protocol de Kontakt.....	57
Figura 25: Distribució RSSI a 1 metre de distància – Beacons tots, a l'escenari 1	59
Figura 26: Variació RSSI al llarg del temps per un Beacon, a l'escenari 1	60
Figura 27: Distribució RSSI - Beacons tots de 0.5 metres a 8.5 metres, a l'escenari 2	61
Figura 28: Modelització model pèrdues propagació – Beacons tots, a l'escenari 2.....	62
Figura 29: Modelització model propagació - Beacon D0:F8:F2:95:3A:5C, a l'escenari 2	63
Figura 30: Modelització model propagació - Beacon D6:40:86:6D:BD:DF, a l'escenari 2	64
Figura 31: Modelització model propagació - Beacon D9:A3:28:6A:A7:F1, a l'escenari 2	65
Figura 32: Modelització model propagació - Beacon F5:7A:A5:E3:EF:18, a l'escenari 2	66
Figura 33: Modelització model propagació - Beacon FF:A6:7C:AF:B0:CB, a l'escenari 2	67
Figura 34: Avaluació resolució de la trilateració amb el mètode LSQ	68
Figura 35: Avaluació resolució de la trilateració amb el mètode NLSQ.....	69
Figura 36: Avaluació resolució de la trilateració amb el mètode Intersecció cercles.....	70
Figura 37: Posicionament mitjançant trilateració a nivell d'habitació – mètode LSQ	71
Figura 38: Posicionament mitjançant trilateració a nivell d'habitació – mètode NLSQ.....	72

Figura 39: Posicionament mitjançant trilateració a nivell de vivenda – mètode LSQ	73
Figura 40: Indoo.rs Mesurament Tool	74
Figura 41: Distribució del senyal Bluetooth al llarg de la vivenda (heat map)	75
Figura 42: Posicionament mitjançant fingerprinting a nivell de vivenda	76
Figura 43: Distribució Accuracy - Beacons tots de 0.5 metres a 8.5 metres, a l'escenari 2.....	77

Índex de taules

Taula 1: Planificació del projecte.....	4
Taula 2: Identificadors als Beacons de Kontakt.....	34
Taula 3: Efectes del interval de transmissió en la vida útil de la bateria.....	36
Taula 4: Valors de potència de transmissió disponibles als Beacons de Kontakt.....	37
Taula 5: Format de l'arxiu de captura de dades, arxiu separat per comes (CSV).....	45
Taula 6: Format de l'arxiu de captura de dades, arxiu separat per comes (CSV).....	46
Taula 7: Valors típics del path loss exponent (n)	49
Taula 8: Valors típics del coeficient de pèrdues de potència N	50
Taula 9: Valors típics del factor de pèrdues per penetració $L_r(n)$	50
Taula 10: Model de pèrdues de propagació de Kontakt	50
Taula 11: Funció en R resolució posició mètode de mínims quadrats lineal.....	53
Taula 12: Funció en R resolució posició mètode de mínims quadrats no lineal.....	54
Taula 13: Funció en R resolució posició mètode centroide	55
Taula 14: Funció en R resolució posició mètode intersecció cercles	56
Taula 15: Promig RSSI a 1 metre – Beacons tots i diverses iteracions, a l'escenari 1	60
Taula 16: Resultats estimació distància - Beacon D0:F8:F2:95:3A:5C, a l'escenari 2.....	63
Taula 17: Resultats estimació distància - Beacon D6:40:86:6D:BD:DF, a l'escenari 2.....	64
Taula 18: Resultats estimació distància - Beacon D9:A3:28:6A:A7:F1, a l'escenari 2.....	65
Taula 19: Resultats estimació distància - Beacon F5:7A:A5:E3:EF:18, a l'escenari 2.....	66
Taula 20: Resultats estimació distància - Beacon FF:A6:7C:AF:B0:CB, a l'escenari 2	67
Taula 21: Resultats resolució de la trilateració amb el mètode LSQ	69
Taula 22: Resultats resolució de la trilateració amb el mètode NLSQ.....	70
Taula 23: Resultats resolució de la trilateració amb el mètode Intersecció cercles	71
Taula 24: Resultats posicionament mitjançant trilateració a nivell d'habitació – mètode LSQ...	72
Taula 25: Resultats posicionament mitjançant trilateració a nivell d'habitació – mètode NLSQ	73
Taula 26: Resultats posicionament mitjançant trilateració a nivell de vivenda – mètode LSQ...	74
Taula 27: Comparativa entre els diferents mètodes de posicionament.....	78

1. Introducció

1.1 Motivació

Segons dades de l'*Organització Mundial de la salut (OMS)*[1] al món hi ha aproximadament 285 milions de persones amb discapacitat visual, de les quals 39 milions són cegues i 246 milions presenten baixa visió. Per aquest col·lectiu els desplaçaments en contextos i situacions desconegudes, ja siguin en entorns exteriors o interiors, representa un gran problema i afecta tant a la seva qualitat de vida com a la seva independència i autonomia. Pels desplaçaments en espais oberts o exteriors aquest problema està resolt en gran mesura, gràcies a la constant evolució i millora dels sistemes de posicionament global (*GPS*) i la proliferació de telèfons intel·ligents, amb aplicacions de navegació específiques com ara *Google Maps* o *BlindSquare*. Malauradament pels desplaçament en espais interiors no hi hagut la mateixa evolució. En l'actualitat les persones amb discapacitat visual disposen de diferents suports a l'hora de desplaçar-se per espais interiors com poden ser l'ús del gos pigall, el bastó blanc, solucions específiques per espais determinats, o l'ajut de la resta de ciutadans. Tot i així és fàcil veure que no es tracta de solucions globals i que a més no ofereixen la independència i autonomia desitjada per aquest col·lectiu. Per això el present treball aborda l'ús de la tecnologia *Bluetooth Smart*, també anomenada *Bluetooth Low Energy (BLE)*, i dels *Beacons* per assistir a les persones invidents o amb dificultats visuals en els seus desplaçaments per espais interiors, amb la finalitat d'aportar una solució més global i escalable que contribueixi tant a millorar la seva qualitat de vida com la seva independència i autonomia.

1.2 Objectius

Aquest treball es centra en l'estudi i anàlisi del posicionament en interiors (*IPS*) utilitzant tecnologia *Bluetooth Smart* i *Beacons* per assistir a persones amb discapacitat visual. De tal manera que els principals objectius són:

- Explotar les capacitats de la tecnologia *Bluetooth Smart* i dels *Beacons*, per implementar un sistema de posicionament en interior adaptable a diferents entorns o escenaris, amb uns requeriments de configuració mínims, i amb un nombre reduït de dispositius.
- Proposar el disseny d'un nou algorisme de posicionament en interiors o millora dels actuals mitjançant l'anàlisi dels paràmetres del senyal *Bluetooth Smart*.

- Validar en escenaris reals la tècnica proposada i mostrarà el seu rendiment respecte a altres solucions existents.

1.3 Enfocament i mètode seguit

Per tal de mostrar la viabilitat de l'ús de la tecnologia *Bluetooth Smart i dels Beacons*, per assistir a persones amb discapacitat visual en els seus desplaçaments per espais interiors, enfront altres tecnologies es realitza un estudi teòric i pràctic, fent ús tant de mesures de camp com de models estadístics. Per a això en primer lloc s'avaluen les diferents tecnologies i solucions que existeixen per a la localització en interiors. En segon lloc partint d'una solució comercial *Bluetooth Smart*, tant de dispositius com de programari, es defineix i es crea un entorn de test. A partir d'aquest entorn de test s'obté un *dataset*, amb dades referents al senyal *Bluetooth Smart i als Beacons*. Tot seguit al conjunt de dades obtingudes s'hi apliquen diferents tècniques de processament de senyal, específiques per al posicionament. Fruit d'aquest processament s'obté una valoració de les diferents tècniques de posicionament i com a resultat d'això es proposa una millora d'aquestes. Per tant, el present treball, no pretén desenvolupar una nova tècnica de posicionament, sinó més aviat realitzar una avaluació de les existents en l'actualitat i del seu desplegament, per tal de proposar-ne algunes millores. A més s'avalua el rendiment del sistema en diferents escenaris perquè després, l'interessat disposi d'eines per jutjar amb facilitat si el sistema/tecnologia pot ser utilitzat o no en un entorn donat.

1.4 Planificació del Treball

Els recursos necessaris per realitzar el treball es poden agrupar en diferents grups. El primer grup està format per els recursos habituals de qualsevol treball de recerca o investigació, que no són més que les fonts habituals de coneixement que tenim al nostre abast: la web, les revistes especialitzades, els llibres i la consulta a experts. Un altre grup està format per els recursos propis i necessaris per a la implementació i anàlisi de la tecnologia *Bluetooth Smart*. En aquest segon grup trobaríem els dispositius de *Kontakt*, diversos "*Bluetooth Beacon*", un "*Cloud Beacon*", i les aplicacions i *SDK* proporcionades per aquest. Al seu torn també inclou diferents terminals mòbils amb suport de la tecnologia *Bluetooth Smart*, un dispositiu *iOS* i un dispositiu *Android*, i aplicacions per l'anàlisi de les connexions entre els diferents dispositius, com ara *nRF Sniffer*. Per finalitzar l'últim grup està format per les eines i el programari necessari per a l'anàlisi de les dades obtingudes: un ordinador personal amb sistema operatiu *Windows* i el programari d'anàlisi estadístic *R* i el *Matlab*.

D'altre banda el treball es divideix en tres fases ben diferenciades. La primera fase, anomenada “*fase de disseny*”, que inclou totes les tasques que permeten definir que es vol investigar, com es durà a terme aquesta recerca i quins resultats s’espera obtenir. A més en aquesta fase també s’estudien els sistemes de posicionament en interiors actuals, el que permet obtenir uns requeriments i una anàlisi dels dispositius disponibles. La segona fase, anomenada “*fase d’implementació i anàlisi*”, està formada per les següents tasques: la definició d’un entorn de test, la recopilació de dades mitjançant diferents mètodes i l’anàlisi d’aquestes. També inclou un estudi sobre la qualitat de les dades i la representativitat de les mostres obtingudes. I per acabar l’última fase, anomenada “*fase de presentació de resultats*”, està formada per l’estudi dels resultats obtinguts i de les seves limitacions. Al seu torn en aquesta fase també es mostren les aportacions realitzades i s’estudien les possibles línies de recerca futures.

Pel que fa a la planificació del treball s’ha estructurat a partir de cinc fites que es corresponen amb els diferents lliurables del projecte, que són: la definició de la temàtica del treball, l’estudi de l’estat de l’art, el desenvolupament pròpiament del projecte, la elaboració de la memòria i la presentació i defensa. Per acabar per a cada tasca s’indica la data de inici i la data de finalització i la durada estimada, tal i com es pot veure a la següent taula i al *diagrama de Gantt*.

Nom de la tasca	Durada	Inici	Final
Guia d'estudi	1 dia	dj. 26/02/15	dj. 26/02/15
PAC 1 – Definició	10 dies	dt. 03/03/15	dl. 16/03/15
Estudi dels projectes i tècniques relacionats amb el treball	10 dies	dc. 25/02/15	dl. 16/03/15
Definició d'objectius	2 dies	dl. 02/03/15	dt. 03/03/15
Definició d'enfocament i mètode seguit	3 dies	dc. 04/03/15	dv. 06/03/15
Anàlisi de requeriments	3 dies	dl. 09/03/15	dc. 11/03/15
Anàlisi del hardware disponible (Beacons, software, eines de test)	5 dies	dl. 02/03/15	dv. 06/03/15
Adquisició del hardware de proves	1 dia	dc. 11/03/15	dc. 11/03/15
PAC 2 - Estat de l'art	10 dies	dt. 17/03/15	dl. 30/03/15
Estudi dels projectes i tècniques relacionats amb el treball	10 dies	dt. 17/03/15	dl. 30/03/15
Aprenentatge de les eines de test/proves	5 dies	dc. 18/03/15	dt. 24/03/15
Definició i preparació de l'entorn de test/proves	3 dies	dc. 25/03/15	dv. 27/03/15

PAC 3 - Disseny, implementació, anàlisi i/o proposta d'un concepte nou	35 dies	dt. 31/03/15	dl. 18/05/15
Obtenció del dataset	8 dies	dl. 30/03/15	dc. 08/04/15
Validació del dataset	2 dies	dj. 09/04/15	dv. 10/04/15
Processament del dataset	25 dies	dl. 13/04/15	dv. 15/05/15
Implantació dels diferents algorismes (Trilateration, RSSI, fingerprinting)	20 dies	dl. 13/04/15	dv. 08/05/15
Anàlisi estadística	5 dies	dl. 11/05/15	dv. 15/05/15
PAC 4 – Memòria	15 dies	dt. 19/05/15	dl. 08/06/15
Elaboració esquemes de blocs, codi, gràfiques i taules representatives	5 dies	dl. 18/05/15	dv. 22/05/15
Resolució d'incidències	5 dies	dl. 25/05/15	dv. 29/05/15
Redacció i correcció de la memòria	15 dies	dt. 19/05/15	dl. 08/06/15
PAC 5 – Defensa	10 dies	dt. 09/06/15	dl. 22/06/15
Elaboració i correcció de la presentació	10 dies	dl. 08/06/15	dv. 19/06/15
Presentació i defensa	5 dies	dl. 22/06/15	dv. 26/06/15

Taula 1: Planificació del projecte

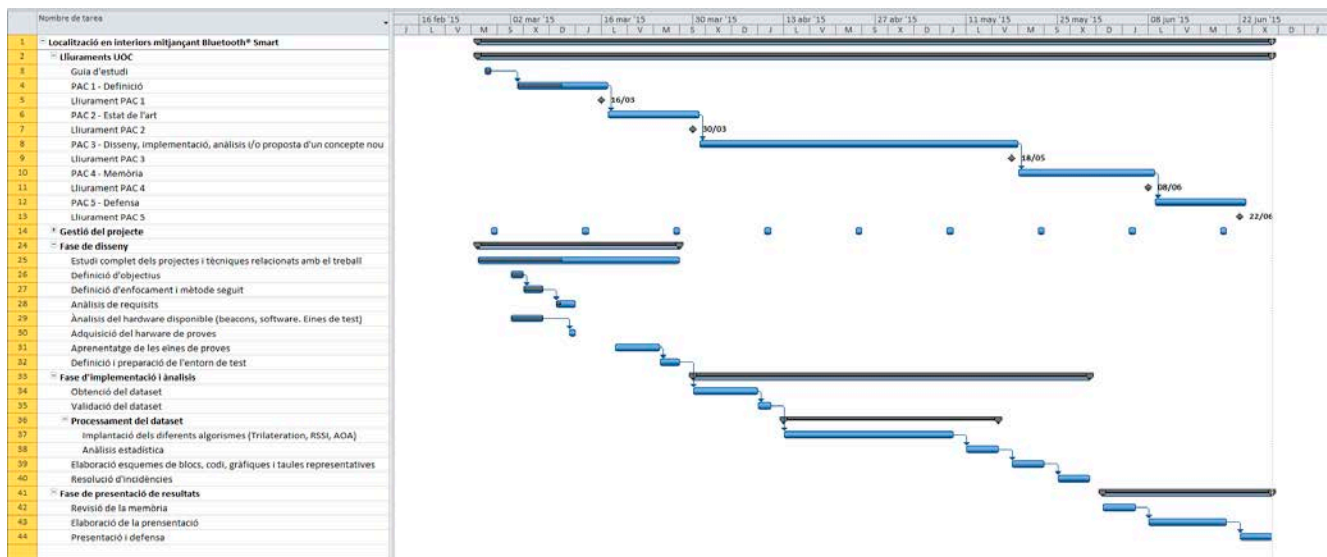


Figura 1: Diagrama de Gantt

1.5 Breu sumari de resultats obtinguts

A partir de l'estudi dut a terme, es pot assenyalar que els principals resultats són:

- *Bluetooth Smart* presenta unes bones característiques enfront a altres tecnologies per a implantar un sistema de posicionament en interiors.
- La principal mesura disponible per al posicionament a *Bluetooth Smart* és el valor de *RSSI*, que mitjançant un model de pèrdues de propagació adequat permet realitzar una estimació de la distància i a partir d'aquesta calcular la posició.
- En funció del tipus de servei d'assistència que es vulgui oferir es poden utilitzar diferents mètodes de posicionament: trilateració, fingerprinting o proximitat.

1.6 Breu descripció dels altres capítols de la memòria

El treball principalment s'estructura en cinc capítols, el contingut dels quals s'introdueixen a continuació.

Al capítol 2, es presenten un conjunt de mètriques que permeten avaluar els punts forts i febles entre els diferents sistemes de posicionament, establir comparacions entre ells i determinar la seva aplicabilitat. Tot seguit es presenten les tecnologies existents per al posicionament i es mostren quines mesures s'utilitzen habitualment. També s'analitzen els mètodes de posicionament més utilitzats en l'actualitat. I per acabar es realitza un recull dels sistemes actuals de posicionament en interiors basats en *Bluetooth Smart*.

Al capítol 3, un cop vistes les diferents tecnologies, tècniques i mesures de posicionament, es descriuen els requisits de disseny d'aquest projecte. També es mostren les característiques principals de la tecnologia utilitzada i les mesures i mètodes de posicionament que es poden realitzar amb aquesta. I finalment es realitza una valoració inicial del compliment dels requisits de disseny a l'utilitzar la tecnologia *Bluetooth Smart* per a la creació d'un sistema de posicionament en interiors.

Al capítol 4, es descriuen i es defineix l'entorn de test utilitzat per analitzar amb major profunditat les característiques de *Bluetooth Smart*. Es presenten els dispositius i les

seves característiques, el programari utilitzats i els diferents escenaris de test o proves. Alhora també es presenten els algorismes de posicionament i la seva implementació.

Al capítol 5, es presenten i discuteixen els resultats dels diversos experiments duts a terme durant el desenvolupament d'aquest projecte, des de l'anàlisi més bàsic de les característiques del senyal *Bluetooth Smart* fins als resultats d'aplicar els diferents mètodes de posicionament.

I en l'últim capítol, el capítol 6, es mostren les principals conclusions derivades de l'estudi dut a terme en aquest treball i s'aborden els possibles treballs futurs.

2. Estat dels sistemes de posicionament en interiors

Si s'examinen els Sistemes de Posicionament en Interiors (*IPS*) i les diferents aplicacions d'aquests, és fàcil veure que les característiques, el rendiment i els requeriments són diversos i canviants en funció de la tecnologia utilitzada i de la pròpia aplicació, tal i com mostren diversos estudis [2], [3], [4] i [5]. Per això en aquest apartat es presenten un conjunt de mètriques que permeten avaluar els punts forts i febles de cada sistema, establir comparacions entre ells i determinar la seva aplicabilitat. Tot seguit es presenten les tecnologies existents per al posicionament i es mostren quines mesures s'utilitzen habitualment. També s'analitzen els mètodes de posicionament més utilitzats en l'actualitat. I per acabar es realitza un recull dels sistemes actuals de posicionament en interiors basats en *Bluetooth Smart*.

2.1 Mètriques per als sistemes de posicionament en interiors

2.1.1 Exactitud

L'exactitud d'un sistema de posicionament està relacionada amb la capacitat d'obtenir mesures de la posició de l'objecte o de l'usuari amb un valor molt proper al valor verdader o real d'on es troba l'usuari. Estadísticament parlant, l'exactitud ens diu com de propera és la mitjana (μ) de les mesures de posició al valor verdader o real.

2.1.2 Precisió

La precisió d'un sistema de posicionament es la capacitat d'obtenir mesures molt semblants de posicionament les unes amb les altres. És a dir la precisió fa referència a la concordança en el valor obtingut en mesures successives sota les mateixes circumstàncies però sense tenir en compte que la mitjana d'aquestes sigui propera al valor real o verdader de la mesura. Estadísticament parlant, la precisió ens diu com de baixa és la desviació típica (σ) de les mesures de posició que realitzem.

2.1.3 Disponibilitat

La disponibilitat és el percentatge de temps durant el qual el servei de posicionament està disponible per al seu ús amb l'exactitud i la integritat requerida. Cal afegir que aquesta pot estar limitada per factors aleatoris com ara la congestió en les comunicacions i per factors externs com operacions de manteniment del sistema.

2.1.4 Àrea de cobertura

És l'àrea que està coberta per el sistema de posicionament. Cada sistema treballa en un rang diferent i els més eficaços són els que cobreixen una gran zona. En general, per als sistemes de posicionament, hi ha tres nivells de cobertura; locals, escalables i globals. La cobertura local es refereix a un àrea limitada ben definida, que no és extensible com ara una habitació individual o un edifici, mentre que la cobertura escalable es refereix a la capacitat d'un sistema per augmentar l'àrea mitjançant l'addició de dispositius. D'altra banda, la cobertura global es refereix a un sistema que té una àrea de cobertura que abasta tot el món, com ara *GPS*.

2.1.5 Escalabilitat

Un sistema de posicionament pot oferir serveis de localització en diferents regions o zones. A més, el nombre d'objectes o usuaris que el sistema pot posicionar amb una infraestructura determinada o en un moment donat pot ser limitat. Per tant l'escalabilitat d'un *IPS* garanteix que la funcionalitat del sistema es manté quan s'escala, es a dir es disminueix o s'incrementa en alguna de les següents dimensions: la geogràfica i/o en el nombre d'usuaris.

2.1.6 Cost

El cost d'un *IPS* es pot mesurar en diferents dimensions: cost econòmic, cost de temps, cost d'espai i cost d'energia. A més aquests es poden originar en diferents nivells del sistema: a nivell d'instal·lació i manteniment d'aquest, a nivell dels components d'infraestructura necessaris i a nivell dels dispositius de posicionament requerits. A més cal observar que el cost energètic es un dels elements crítics per tal evitar la interrupció del servei i poder oferir solucions amb un grau elevat de mobilitat.

2.1.7 Privacitat

La privacitat és molt important per a les persones que utilitzen els sistemes de posicionament, per tant és crucial el control sobre l'accés a les dades recopilades i sobre com s'utilitza la informació personal dels usuaris. Per això és necessari assegurar la privacitat dels usuaris, aplicant mecanismes de seguretat i protegint les dades contra intrusió, robatori i/o mal ús.

2.1.8 Robustesa i adaptabilitat

Una tècnica de posicionament robusta indica que el sistema pot funcionar amb normalitat, fins i tot quan alguns dels senyals no estan disponibles. D'altre banda l'adaptabilitat fa referència a la capacitat del sistema a fer front a canvis existents en el

medi o l'entorn de propagació, sense veure's alterat el funcionament d'aquest. Per acabar cal apreciar que un sistema que és capaç d'adaptar-se als canvis ambientals pot proporcionar una major precisió i exactitud en el posicionament que els sistemes que no poden adaptar-se.

2.2 Tecnologies de posicionament en interiors

2.2.1 Identificació per radiofreqüència (RFID)

La Identificació per Ràdio Freqüència (*RFID*) és un terme genèric utilitzat per descriure un sistema sense fils que transmet la identitat d'un objecte o persona mitjançant ones de ràdio. La tecnologia *RFID* s'utilitza habitualment per identificar automàticament objectes en grans sistemes. Per això aquestes sistemes es basen en un intercanvi de diferents senyals de ràdio entre dos components principals: els lectors *RFID* i les etiquetes *RFID*, que poden ser actives o passives. Aquesta tecnologia es pot utilitzar per al posicionament mitjançant l'ús de mesures dels senyals *RF* emesos, tal i com mostren diferents treballs [6], [7].

2.2.2 UltraWideband (UWB)

Els sistemes *UWB* es basen en l'ús d'un canal de comunicació en el qual el senyal d'informació que es propaga utilitza una gran porció de l'espectre freqüencial. Això permet que els transmissors *UWB* consumeixin molt poca energia i que es pugin transmetre grans quantitats de dades. Aquesta tecnologia es pot utilitzar per al posicionament mitjançant l'ús principalment de mesures del temps d'arribada (*TOA*) [8] o de la diferència de temps d'arribada (*TDOA*) [9] dels senyals *RF* i així obtenir la distància entre l'objectiu i el punt de referència.

2.2.3 Infrarojos

La comunicació sense fils per infrarojos fa ús de l'espectre invisible de la llum, situat just per sota de l'espectre visible, això fa que aquesta tecnologia sigui menys intrusiva en comparació amb el posicionament en interiors basat en llum visible. D'altre banda l'*IR* es pot utilitzar de dues maneres diferents: *IR* directa i *IR* difús. Així doncs aquesta tecnologia, donades les característiques del senyal infraroig, es pot utilitzar per al posicionament en espais de reduïdes dimensions, com ara una habitació, tal i com diferents estudis han explorat [10], [11].

2.2.4 Zigbee

L'estàndard *ZigBee* proporciona serveis de xarxa, seguretat i suport d'aplicacions que operen a la part superior de l'especificació *IEEE 802.15.4*. És tracta d'una xarxa d'àrea personal amb un abast de curta distància, taxes de transmissió reduïdes i baix consum. Aquests sistemes presenten dos tipus de dispositius físics diferents, anomenats nodes *ZigBee*: els dispositius amb funcions complertes (*FFD*) i els dispositius amb funció reduïda (*RFD*). Per acabar aquesta tecnologia pot utilitzar-se per aplicacions de posicionament mitjançant l'ús de comunicacions amb el node coordinador i la comunicació amb els nodes veïns, diferents projectes [12], [13] han analitzat les possibilitats d'aquesta tecnologia com a sistema de posicionament.

2.2.5 Xarxa d'àrea local sense fils (WLAN)

L'estàndard *WLAN IEEE 802.11* és la norma que defineix el protocol i la compatibilitat d'interconnexió d'equips de comunicacions a través de l'aire en una xarxa d'àrea local (*LAN*) mitjançant la detecció de portadora (*CSMA/CA*). Les mesures de posicionament més populars per aquesta tecnologia són el *RSS (Received Signal Strength)* [14], que és fàcil d'extreure i no requereixen interacció amb el dispositiu *WLAN*. Pel que fa a mesures de temps d'arribada (*TOA*) [15], diferència de temps d'arribada (*TDOA*) i angle d'arribada (*AOA*) són menys comuns en *WLAN* a causa de la seva complexitat.

2.2.6 Basats en tecnologia cel·lular

Els sistemes cel·lulars establerts per suportar les xarxes de comunicacions mòbils estan disponibles a la majoria de països i a més operen a bandes amb llicència, la qual cosa impedeixen la interferència amb altres dispositius. L'ús d'aquesta tecnologia per al posicionament utilitza habitualment mesures de *RSS (Received Signal Strength)* [16], tot i així altres treballs han investigat l'ús de mesures de *TOA/TDOA* [17],[18].

2.2.7 Bluetooth

Bluetooth [19], [20] i [21] és una tecnologia propietària per a xarxes d'àrea personal sense fils (*WPAN*). A més cal veure que el terme *Bluetooth* engloba un conjunt d'especificacions per a aplicacions sense fils de curt abast, que són generades i mantingudes pel *Bluetooth Special Interest Group (SIG)* [22]. Aquestes especificacions inclouen tant els components centrals – protocols i ràdio – com els perfils d'aplicacions que en fan ús. D'altre banda dins d'aquest conjunt d'especificacions es poden distingir dos conjunts: el *Bluetooth classic* i el *Bluetooth Smart*, anomenat també *Bluetooth Low Energy (BLE)*, introduït al 2010 en l'especificació 4.0 de *Bluetooth*. Tot i que tots dos grups operen a la banda *ISM* a 2,4 GHz, amb un rang de cobertura curt i amb una taxa

de bits reduïda no són compatibles entre ells, ja que els protocols utilitzats, les capes i les aplicacions són diferents. A més mentre que el *Bluetooth classic* es va dissenyar per oferir intercanvi de dades i serveis multimèdia, el *Bluetooth Smart* es va dissenyar com un estàndard de ràdio per l'intercanvi de dades amb un consum energètic reduït, que fes ús d'uns dispositius de baix cost i amb una complexitat reduïda. Pel que fa a les mesures de posicionament més habituals amb aquesta tecnologia són el RSS (*Received Signal Strength*), que és fàcil d'extreure i no requereixen interacció amb el dispositiu *Bluetooth*. Tot i que nombrosos estudis [23], [24], [25], [26] han explorat la capacitat del *Bluetooth classic* com a tecnologia de posicionament no ha estat fins la introducció de *Bluetooth Smart* quan realment, donades les característiques d'aquest, que s'han estès les possibilitats com a mètode de posicionament. A més amb la introducció, per part d'*Apple* de la tecnologia *iBeacon* [27], [28] basada en *Bluetooth Smart*, i la seva extensió a altres fabricants amb el nom de *Beacons* ha obert les portes a nous dissenys de sistemes de posicionament tal i com mostren la recent irrupció de projectes en proves basats en aquesta tecnologia a l'Aeroport de San Francisco [29], a l'Aeroport d'Amsterdam [30] i al metro de Londres [31].

2.2.8 Dead Reckoning

En la navegació estimada, un usuari o objecte pot determinar aproximadament la seva posició actual en conèixer la posició passada i la velocitat en què es mou. Per tant la navegació estimada és una tecnologia de navegació que requereix conèixer la posició inicial, i després s'afegeixen i es segueixen els canvis produïts, ja sigui en forma de coordenades cartesianes o de velocitat. Gran part dels desenvolupaments que fan ús d'aquesta tecnologia [32], [33], [34], [35], [36] exploten les capacitats dels *smartphones* i els seus sensors.

2.2.9 Basats en tecnologia d'imatge.

Els sistemes de posicionament basats en imatges es basen en aplicar tècniques de processament d'imatge i classificació amb la finalitat de captar els diferents elements que hi apareixen i així obtenir una estimació del moviment i/o caracterització de l'entorn on es troba l'usuari a partir de la informació aportada per les imatges. Aquests sistemes es poden classificar en dues categories principals: els sistemes *Egomotion*, que utilitzen el moviment de càmera respecte una escena rígida per estimar la posició actual de la càmera i així extreure el moviment de l'usuari o objectiu, i els sistemes de sensors estàtics que situen els objectes en moviment en les imatges. Hi ha una gran diversitat de sistemes de posicionament basats en tecnologia d'imatge, per exemple es poden diferenciar en funció del tipus de càmera utilitzada: si s'utilitza la càmera d'un

telèfon mòbil [37], [38], o si s'utilitza una càmera omnidireccional [39] o una càmera en tres dimensions, entre altres. De totes maneres el seu rendiment pot variar en funció de la quantitat d'informació que es pot extreure de les seves imatges i l'èxit d'aquestes tecnologies depèn de diferents factors, com ara la millora i la miniaturització dels actuadors, l'avanç en la tecnologia dels detectors, el desenvolupament d'algorismes de processament d'imatges, l'augment en les taxes de transmissió de dades i de les capacitats computacionals.

2.3 Tipus de mesures per al posicionament

2.3.1 Potència (RSS)

És habitual referir-se a aquest tipus de mesures de potència com a *RSS* (*received signal strength*). Aquesta mesura és útil perquè està relacionada amb la distància entre transmissor i receptor. De manera general, es pot dir que la dependència entre l'*RSS* en *dBW* i la distància *d* és:

$$RSS = \alpha - 10\gamma \log(d) \quad (1)$$

en què α és una constant que depèn, entre altres coses, de la potència transmesa i dels guanys de les antenes del transmissor i receptor, i γ és conegut com a *path loss exponent* i depèn de les condicions de propagació.

2.3.2 Temps d'arribada (TOA)

El temps d'arribada és una mesura que permet obtenir el temps (o retard) de propagació del senyal entre el transmissor i el receptor. Si aquest retard es multiplica per la velocitat de propagació del senyal, llavors s'obté una mesura de la distància entre ambdós dispositius, tal i com es mostra a l'expressió següent:

$$d = c(TOA - t_{tx}) \quad (2)$$

en què t_{tx} representa l'instant en què es va transmetre el senyal, el qual es rep en l'instant *TOA*, i *c* és la velocitat de propagació.

Com s'observa en l'expressió anterior, perquè el temps d'arribada del senyal sigui realment útil i permeti obtenir el retard de propagació (és a dir, $TOA - t_{tx}$) és necessari, d'una banda, conèixer l'instant de transmissió del senyal, i de l'altra, que les escales de temps del transmissor i del receptor siguin les mateixes (o si són diferents, que ho siguin d'una manera coneguda). Aquestes condicions no són fàcils d'aconseguir, i això fa que els sistemes basats en *TOA* tinguin una complexitat afegida.

2.3.3 Diferència de temps d'arribada (TDOA)

Una mesura de la diferència de temps d'arribada és la diferència dels instants d'arribada a un receptor de dos senyals emesos cadascun d'ells per un transmissor diferent. Encara que també es pot generar a partir d'un únic senyal enviat per un transmissor i rebut en dos receptors. La *TDOA*, escalada adequadament per la velocitat de propagació, proporciona la diferència de les distàncies del receptor als dos transmissors. Perquè això sigui així, és necessari que els dos transmissors transmetin els senyals de manera sincronitzada, però almenys s'evita el requisit que els transmissors i el receptor estiguin sincronitzats com passa amb les mesures *TOA*.

2.3.4 Desviació de freqüència (POA)

El receptor també pot mesurar la freqüència *Doppler* del senyal rebut o la diferència de freqüències *Doppler* de dos senyals. Tot i que tecnològicament la mesura de freqüències o d'instants d'arribada té implicacions molt diferents, conceptualment és similar al *TOA* o *TDOA*. Per tant així com el *TOA* indica la distància entre transmissor i receptor, la freqüència *Doppler* indica com varia la distància entre tots dos o, el que és el mateix, la velocitat relativa entre transmissor i receptor.

2.3.5 Angle d'arribada (AOA)

A diferència dels casos anteriors, amb la mesura de l'angle d'arribada no es dedueix un valor de distància, sinó que el receptor obté la direcció en què és el transmissor. Aquesta direcció es pot calcular comparant els retards o desfasaments del senyal rebut en diverses antenes de què disposi el receptor. O bé, si aquestes antenes tenen diagrames de radiació diferents i dependents de l'angle, es poden comparar les potències rebudes en cadascuna d'elles.

2.4 Mètodes de posicionament

2.4.1 Triangularització

La tècnica de localització o posicionament per triangularització utilitza les propietats geomètriques dels triangles per a calcular les ubicacions dels objectes o usuaris. Aquesta tècnica es pot dividir al seu torn en diverses subcategories o submètodes que són: *lateration*, *angulation* i el *posicionament hiperbòlic*.

2.4.1.1 Lateration

La *lateration*, anomenada també en alguns casos rang de mesura, calcula la posició d'un objecte o de l'usuari mitjançant el mesurament de la seva distància des de

múltiples punts de referència. Cal observar que el càlcul de la posició d'un objecte o un usuari en dues dimensions requereix mesuraments de distància respecte 3 punts de referència no alineats, mentre que es requereixen mesuraments de distància en 4 punts no coplanars per a posicionaments en l'espai. D'altra banda amb la finalitat de calcular la distància entre l'objectiu i els punts de referència hi ha principalment dos enfocaments, el temps de vol i l'atenuació, que es presenten a continuació.

Time of flight

En l'enfocament de *temps de vol*, es mesura el temps que triga el senyal, en la majoria dels casos, per viatjar entre l'objecte i el punt de referència a una velocitat coneguda. De tal manera que a partir de la velocitat coneguda i el temps mesurat es pot calcular la distància.

Atenuation

Mentre que en l'enfocament d'atenuació, es mesura la reducció gradual de la intensitat del senyal durant la transmissió que augmenta a mesura que augmenta la distància. Dit d'un altre manera es mesura les variacions de *RSS (Received Signal Strength)*. De tal manera que a partir d'una funció que relaciona l'atenuació i la distància per a un tipus concret d'emissió i una potència d'emissió inicial, és possible estimar la distància entre l'objectiu i a alguns punts de referència mitjançant el mesurament de la potència rebuda.

2.4.1.2 Angulation

L'angulació és un mètode similar a *lateration*, però en aquest cas s'utilitza la mesura d'angles per determinar la posició d'un objectiu, així com les distàncies. En altres paraules, es localitza o posiciona un objectiu mitjançant el càlcul d'angles en relació amb múltiples punts de referència. En general, dues dimensions angulars requereixen dos mesuraments d'angle i un mesurament de longitud (per exemple, la distància entre els punts de referència). I en tres dimensions es requereix un mesurament de la longitud, un mesurament de l'azimut, i dues mesures d'angle per a especificar una posició.

2.4.1.3 Posicionament hiperbòlic

En aquest mètode la posició que s'ha de calcular està definida sobre una determinada hipèrbola (en dues dimensions) o sobre una superfície hiperbòlica (en tres dimensions), els focus de la qual són les dues estacions transmissores (o receptors si

el que s'ha de posicionar és el transmissor). Per tant en aquest cas, la determinació de la posició consistirà a calcular la intersecció de diverses hipèrboles.

2.4.2 Fingerprinting

Aquest mètode determina la posició del objectiu mitjançant l'ús d'empremtes digitals d'alguna característica del senyal com ara el *RSS (Received Signal Strength)*. Cal afegir que aquest mètode consta de dues fases o etapes: l'etapa *offline* i l'etapa *online*. L'etapa *offline* es basa en generar prèviament una base de dades on es guarden les observacions que es fan en un conjunt de posicions conegudes, com ara les *RSS* mesurades a diversos punts d'accés *Wi-Fi*. Llavors a l'hora de calcular la posició d'un objectiu, en la fase *online*, aquest fa les observacions que s'utilitzin en el sistema en qüestió i es comparen amb les que hi ha a la base de dades. Les posicions corresponents a les entrades de la base de dades que continguin les "petjades" més similars a les observacions que està prenent l'objectiu s'utilitzaran per a calcular-ne la posició.

2.4.3 Proximitat

El mètode de posicionament basat en proximitat detecta la localització mitjançant l'anàlisi de la ubicació d'un objectiu respecte a una posició o àrea coneguda. La presència de l'objectiu es detecta utilitzant un fenomen físic, com ara la variació d'un camp electromagnètic, amb un rang d'abast limitat. Així doncs aquest mètode requereix situar un o més detectors en posicions conegudes. De tal manera que els detectors rastregen contínuament l'àrea on operen i si és detecta la presència d'un objectiu per un dels detector, se sap que la posició de l'objectiu es troba en l'àrea de proximitat definida per aquest.

2.5 Treballs i projectes actuals de IPS amb Bluetooth Smart

Donada la gran diversitat de tecnologies, tipus de mesures i mètodes de posicionament el nombre de treballs o projectes relacionats amb la implementació de sistemes de posicionament en interiors és extens. Tot i així pel que fa a l'ús de tecnologia *Bluetooth Smart* i dels Beacons com a tecnologia per al posicionament, donat que aquesta és força recent (*Bluetooth Smart*, es va introduir al 2010 i els Beacons al 2013), la quantitat de treballs es redueix considerablement i a més habitualment és difícil obtenir-ne detalls de la seva implementació, ja que gran part es troben encara en fase de desenvolupament, de proves o estudi. De totes maneres, en

l'àmbit acadèmic es poden destacar tres treballs o projectes, que es presenten a continuació.

El primer seria el dut a terme per *Nicola Cinefra* realitzat al *Politecnico de Milano* al 2013 [40]. En aquest treball es presenta un sistema de posicionament basat en *Bluetooth Low Energy* que fa ús de mesures de *RSSI* (Received Signal Strength Indicator). En aquest treball en primer lloc es realitza una calibració o modelització de l'entorn per determinar un model de pèrdues de propagació adient per l'entorn on s'ha de desplegar el sistema. Aquest model s'obté mitjançant l'ús d'un filtre de partícules (Particle Filter) que estima els paràmetres del model. Tot seguit s'aplica el mètode de la trilateració per determinar la posició de l'usuari i aquesta es millora mitjançant l'ús d'un filtre de Kalman. El resultat és un sistema amb una exactitud i precisió bastant bona amb un 50% de probabilitat d'estar dins el rang de ~1,5 metres quan l'usuari des d'on es determina la posició no es mou.

El segon és el desenvolupat per *Erik Dahlgren* i *Hasan Mahmood* a la *Chalmers University of Technology* al 2014 [41]. En aquest projecte s'estudia la implementació d'un sistema de posicionament basat en *Bluetooth Low Energy* que de nou fa ús de mesures de *RSSI* (Received Signal Strength Indicator). Els mètodes utilitzats en aquest treball per a determinar la posició es basen en la trilateració, en la trilateració iterativa, en filtres de partícules i en el fingerprinting. Amb aquesta aproximació s'obté que el mètode que ofereix més bons resultats és el filtre de partícules aconseguint una exactitud d'uns pocs metres i amb una precisió relativament alta.

L'últim treball en l'àmbit acadèmic és el realitzat per *Agustí Corbacho* a la *Universitat Politècnica de Catalunya* al 2014 [42]. En aquest es presenta un sistema de posicionament basat en *Bluetooth Low Energy* que també fa ús de mesures de *RSSI* (Received Signal Strength Indicator). L'enfocament d'aquest treball es basa en realitzar també una calibració o modelització de l'entorn per determinar un model de pèrdues de propagació adient per l'entorn on s'ha de desplegar el sistema basat en el model log-distance. I un cop obtingut el model s'aplica el mètode de la trilateració per determinar la posició de l'usuari. El resultat és un sistema amb una exactitud dins el rang de ~1–1.5 m en condicions de visió directa.

Al seu torn en l'àmbit industrial o comercial també es poden destacar diferents projectes o solucions entre ells els que ja s'han enunciat quan s'ha presentat la

tecnologia *Bluetooth*, com són els projectes en proves implantats a l'Aeroport de San Francisco [29], a l'Aeroport d'Amsterdam [30] i al metro de Londres [31].

El projecte de l'Aeroport de San Francisco i el de l'Aeroport d'Amsterdam fan ús de la solució comercial de *Indoo.rs* [43] basada en el mètode del fingerprinting de senyals *Wi-Fi* o de dispositius *Bluetooth Smart* per a determinar la ubicació de l'usuari. En l'enfocament fent ús de dispositius *Bluetooth Smart* s'assoleix una precisió dins el rang de ~2 m mentre que en l'enfocament amb el senyal *Wi-Fi* la precisió es troba dins el rang de ~5 m. Pel que fa al projecte en proves al metro de Londres aquest es basa en els dispositius *Bluetooth Smart* del fabricant *Estimote* [44] i fa ús del mètode de posicionament basat en la proximitat per oferir informació que facilita la navegació en l'interior de l'estació.

Per acabar amb la visió dels sistemes actuals de posicionament basats en *Bluetooth Smart*, durant el transcurs d'aquest projecte, s'ha presentat un dels primers projectes que fa ús d'aquesta tecnologia per al posicionament a Espanya. Es tracta del projecte implantat al museu de la *Real Academia de Bellas Artes de San Fernando* de Madrid [45]. Aquest es basa en els dispositius *Bluetooth Smart* del fabricant *Aruba Networks* [46] i l'aplicació mòbil *Musem Experience* [47] i fa ús del mètode de posicionament basat en la proximitat per oferir informació que facilita la navegació en l'interior del museu. Els creadors afirmen que són capaços de localitzar un visitant amb una precisió d'un metre.

3. Sistema de posicionament amb tecnologia Bluetooth

En aquest capítol, un cop vistes les diferents tecnologies, tècniques i mesures de posicionament, es descriuen els requisits de disseny d'aquest projecte. També es mostren les característiques principals de la tecnologia utilitzada i les mesures i mètodes de posicionament que es poden realitzar amb aquesta. I finalment es realitza una valoració inicial del compliment dels requisits de disseny.

3.1 Requisits de disseny

L'objectiu d'aquest projecte, en termes generals, és l'anàlisi de les capacitats de *Bluetooth Smart* com a tecnologia de posicionament en interiors per avaluar la seva viabilitat per a assistir a persones invidents o amb dificultats visuals. Però com ja s'ha vist hi ha un gran nombre de tecnologies existents per al posicionament en interiors. Així que el primer que cal presentar seria les característiques desitjades per un sistema de posicionament en interiors per assistir a persones invidents o amb dificultats visuals. Això permetrà en una primera aproximació determinar si les característiques de *Bluetooth Smart* satisfan les necessitats d'aquest sistema, i les avantatges i desavantatges d'aquest enfront les altres possibles tecnologies.

Un sistema de posicionament per interior per assistir a persones amb discapacitat visual hauria de presentar unes bones prestacions en termes d'exactitud i de precisió, és a dir s'haurien de poder obtenir mesures de la posició molt semblants entre elles en diferents iteracions de mesura, sota les mateixes condicions, i una mesura de la posició el més pròxima possible al valor real de posició. Però tal i com es veurà més endavant, en funció del servei que es vulgui oferir serà més important aconseguir una bona precisió que no pas una bona exactitud, encara que l'ideal seria aconseguir unes bones prestacions per als dos paràmetres. Al seu torn donat que es tracta d'un sistema de posicionament en temps real per assistir a persones, la seva disponibilitat hauria de ser elevada. Pel que fa a la seva àrea de cobertura hauria de ser gran, ja que això garanteix una inversió menor en infraestructura i redueix la seva complexitat. També hauria de ser un sistema escalable, és a dir s'hauria de poder garantir la funcionalitat del sistema quan el nombre d'usuaris per zona creix o quan la zona de cobertura s'amplia. Un altre dels paràmetres importants seria el cost d'aquest sistema, ja que un cost reduït facilitarà la seva adopció i implantació. D'altre banda s'hauria de garantir la privacitat dels usuaris, cal remarcar que aquest aspecte és força important donat que es tracta d'un sistema de posicionament que ha d'ubicar l'usuari en tot

moment i és necessari que s'utilitzi aquesta informació de posicionament legítimament i amb el consentiment de l'usuari. Per acabar el sistema hauria de ser robust i adaptable, de tal manera que aquest fos capaç de donar resposta a entorns canviants i seguir funcionant encara que algun dels seus elements no estigui disponible.

3.2 Bluetooth Smart

Un cop definits els requisits de disseny, a continuació es presenten les principals característiques de *Bluetooth Smart* la qual cosa permetrà determinar si aquesta tecnologia satisfà aquests requeriments de disseny.

3.2.1 Arquitectura de Bluetooth Smart

Bluetooth Smart està format per un conjunt de protocols i perfils que defineixen tota la funcionalitat. A la Figura 2 es pot veure la seva distribució per a constituir un dispositiu *Bluetooth Smart*, des de l'antena (part inferior) fins la interfície d'usuari (part superior).

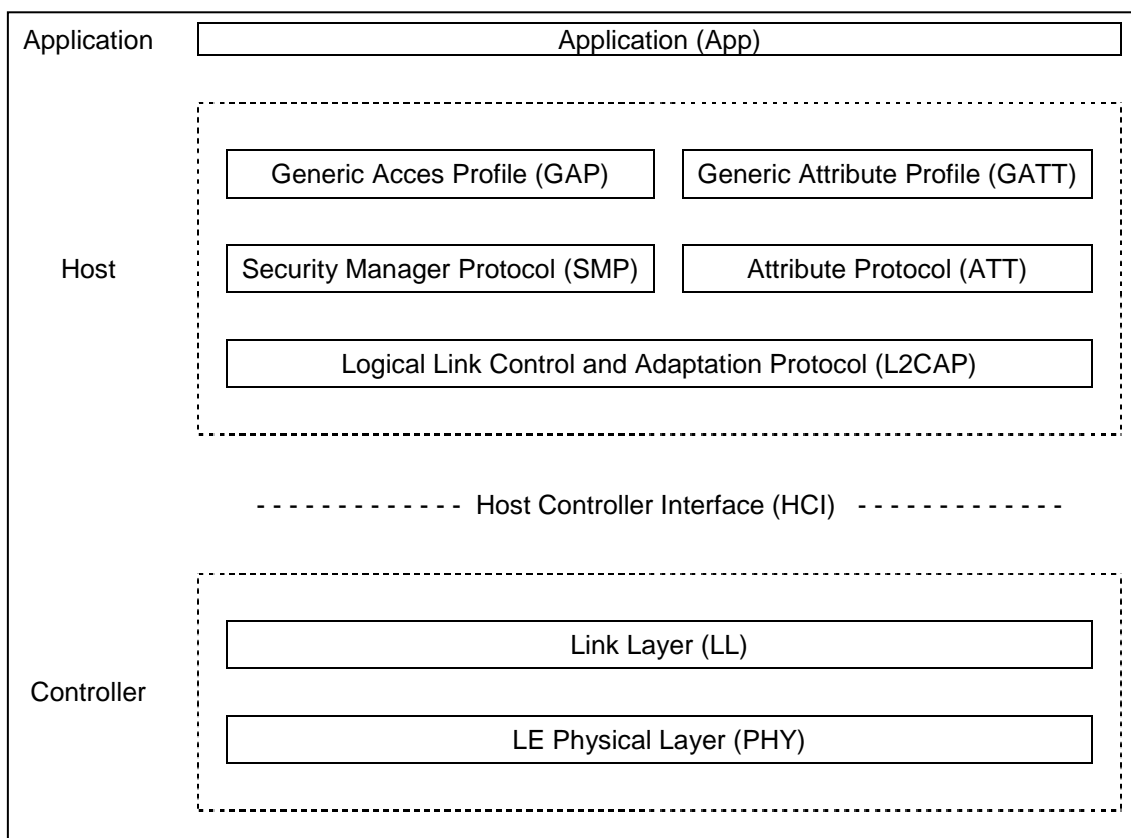


Figura 2: Pila de protocols de *Bluetooth Smart*

Tot seguit es presenten amb més detall alguna d'aquestes capes, ja que les característiques d'aquestes poden afectar al disseny d'un sistema de posicionament en interiors.

3.2.1.1 Capa física

La capa física (PHY) és la part que conté el circuit de comunicacions analògic, capaç de modular i desmodular els senyals analògics i transformar-los en símbols digitals. La banda de freqüència utilitzada és la banda l'ISM a 2,4 GHz que es divideix en 40 canals que van de 2,4000 GHz a 2,4835 GHz. Com es mostra a la Figura 3 d'aquests 40 canals, 37 s'utilitzen per a la transmissió de dades mitjançant una connexió i els últims tres canals (37, 38, i 39) s'utilitzen com a canals de radiodifusió per establir connexions i enviar dades de difusió (missatges broadcast).

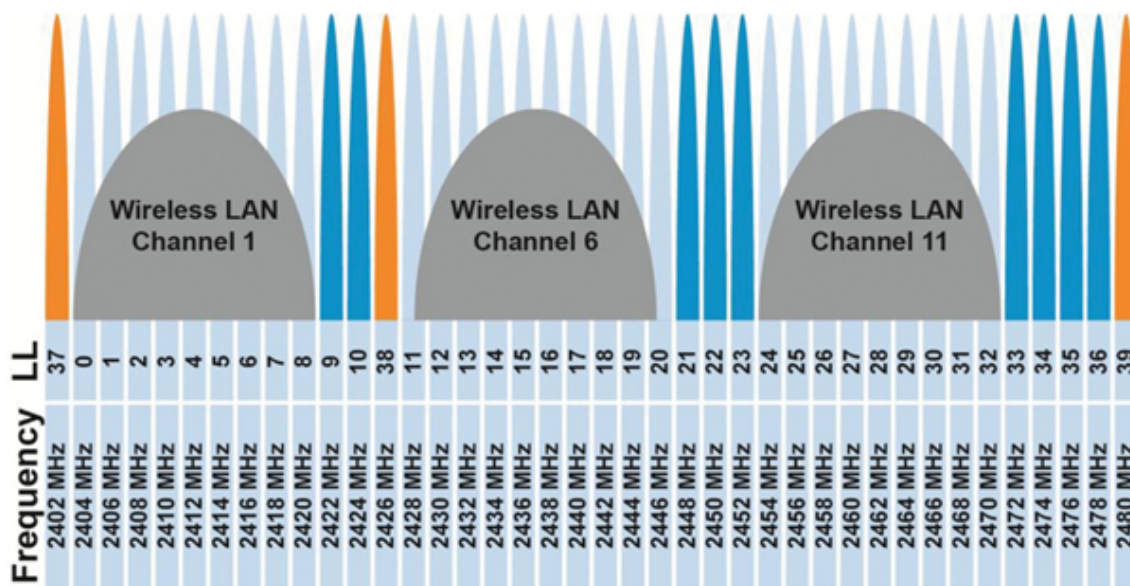


Figura 3: Canals freqüencials de Bluetooth Smart

Font: [48]

Es pot veure com els tres canals de radiodifusió estan col·locats estratègicament per evitar interferències degudes a la coexistència amb altres tecnologies com *IEEE 802.11* i *ZigBee*. D'altra banda *Bluetooth Smart* també utilitza la tècnica d'espectre eixamplat per salt de freqüència (FHSS) per reduir les possibles interferències, en la resta de canals, i disminuir la densitat espectral de potència.

La modulació escollida per codificar el flux de bits a través de l'aire és la modulació per desplaçament de freqüència gaussiana (Shift Keying Gaussian Frequency, *GFSK*), la mateixa modulació utilitzada al *Bluetooth clàssic* i a diversos protocols propietaris de comunicacions sense fils de baixa potència. Això dona lloc a que la velocitat de modulació per *Bluetooth Smart* es fixi a 1 Mbit/s, i que aquest sigui per tant el límit superior per al rendiment de transmissió d'aquesta tecnologia.

3.2.1.2 Capa d'enllaç

La capa d'enllaç és la part que es connecta directament amb la capa física, i normalment s'implementa com una combinació de maquinari i programari fet a mida. És l'única capa de tota la pila de protocols amb fortes restriccions temporals, ja que ha de treballar en temps real i és responsable de complir amb tots els requisits de temps definits per l'especificació. Per tant, generalment es manté aïllada de les capes superiors de la pila de protocols per mitjà d'una interfície estàndard, anomenada Host Controller Interface (HCI), que oculta la complexitat i els requisits de temps real a la resta de les capes.

En aquesta capa es defineixen uns rols, que són:

- *Advertiser*: Dispositiu que envia paquets de difusió.
- *Scanner*: Dispositiu que escaneja per cercar paquets de difusió.
- *Master*: Dispositiu que inicia una connexió i la gestiona després.
- *Slave*: Dispositiu que accepta una petició de connexió i segueix la sincronització marcada per un Master.

Aquests rols, són els que permeten establir les diferents topologies de xarxa i els diferents mecanismes de comunicació.

També en aquesta capa es defineixen les adreces dels dispositius *Bluetooth*. L'identificador fonamental d'un dispositiu *Bluetooth*, és similar a l'adreça *MAC d'Ethernet*, i no és més que un nombre de 48 bits (6 bytes) que identifica de forma exclusiva un dispositiu. Hi ha dos tipus d'adreces de dispositius i es poden configurar ambdues o una d'elles en un dispositiu en particular:

- *Direcció Pública del dispositiu*: És una direcció fixa del dispositiu programada de fàbrica. Que ha d'estar registrada amb l'Autoritat IEEE i mai canviarà durant la vida útil del dispositiu.
- *Direcció Aleatòria del dispositiu*: Aquesta adreça pot preprogramar-se en el dispositiu o generar-se dinàmicament en temps d'execució. I és la que ofereix les diferents funcionalitats de *Bluetooth Smart*.

3.2.1.3 Attribute Protocol (ATT)

El Protocol Atribut (ATT) és un protocol simple client/servidor sense estat basat en atributs proporcionats per un dispositiu. A *Bluetooth Smart*, cada dispositiu actua com un client, com un servidor, o com ambdues coses, independentment de si es tracta d'un mestre o esclau. Un client demana dades d'un servidor, i un servidor envia les

dades als clients. D'altre banda aquest protocol és estricta en la temporització i seqüenciació de les tasques: per exemple si una sol·licitud segueix pendent, perquè no s'ha rebut resposta encara no es realitzen més sol·licituds fins que no es rep i es processa la resposta. Això s'aplica a ambdues direccions de la comunicació i independentment del paper que desenvolupi cada node inclús si actuen alhora tant com a client i com a servidor.

3.2.1.4 Generic Attribute Profile (GATT)

El perfil d'atributs genèrics (GATT) es basa en el Protocol d'Atributs (ATT) i afegeix una jerarquia i una model d'abstracció de dades a la part superior d'aquest. En certa manera, es pot considerar la columna vertebral de la transferència de dades de *Bluetooth Smart* perquè defineix com s'organitzen les dades i com s'intercanvien entre aplicacions.

3.2.1.5 Generic Access Profile (GAP)

El Perfil d'Accés Genèric (GAP) defineix com els dispositius interactuen entre si en un nivell inferior. Es pot considerar que el GAP defineix la capa de control superior de *Bluetooth Smart*, atès que especifica com els dispositius duen a terme els procediments de control, tals com la detecció de dispositius, la connexió, el sistema de seguretat, i altres procediments per garantir la interoperabilitat i permetre que l'intercanvi de dades es pugui dur a terme entre dispositius de diferents fabricants.

3.2.2 Topologia de xarxa

Un dispositiu *Bluetooth Smart* es pot comunicar amb la resta de dispositius que l'envolten de dues maneres: radiodifusió (*broadcast*) o connexió (*connections*). Tot i que cada mecanisme de comunicació té les seves pròpies avantatges i limitacions tots dos estan subjectes a les directrius marcades per el Generic Access Profile (GAP) de *Bluetooth*.

3.2.2.1 Radiodifusió i observació

Fent ús d'una comunicació sense connexió (*broadcast*), es poden enviar dades a qualsevol dispositiu d'escaneig o receptor que es trobi dins l'abast de l'emissor. Tal i com es mostra a la Figura 4 aquest mecanisme essencialment permet enviar dades en un sol sentit a qualsevol dispositiu que sigui capaç de recopilar-les.

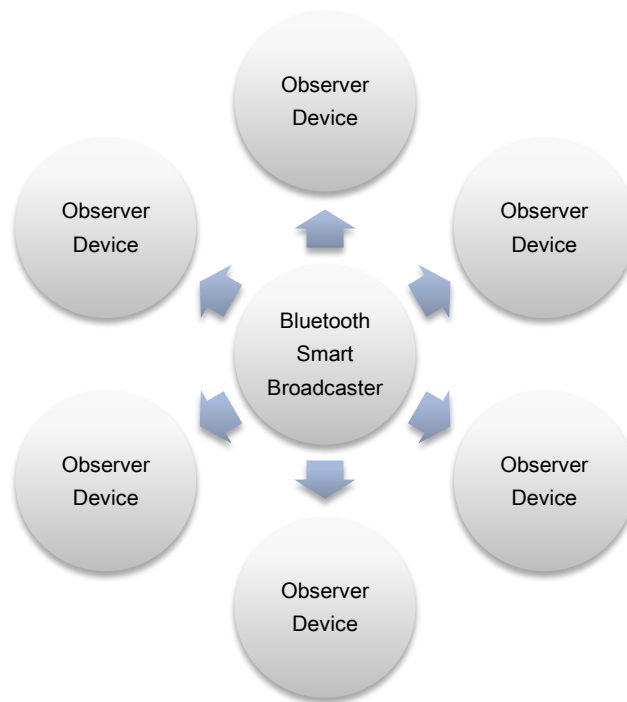


Figura 4: Topologia *broadcast* a *Bluetooth Smart*

En aquest mecanisme de comunicació es defineixen dos rols separats, que són:

- Radiodifusor (Broadcaster): Dispositiu que envia paquets de difusió (*missatges broadcast*) periòdicament a qualsevol dispositiu disposat a rebre'ls.
- Observador (Observer): Dispositiu que escaneja les freqüències preestablertes per rebre els paquets de difusió o publicitat (*missatges broadcast*) que s'estan difonent.

És important entendre les possibilitats que ofereix el mecanisme de radiodifusió (*broadcast*), ja que aquest és l'única manera amb la qual un dispositiu pot transmetre dades a més d'un dispositiu a la vegada tot aprofitant les característiques de difusió de *Bluetooth Smart*.

D'altra banda el paquet de difusió estàndard (*missatge broadcast*) conté una càrrega útil de 31 bytes, que s'utilitza per transmetre les dades que descriuen l'emissor i les seves capacitats, però també pot incloure qualsevol altra informació personalitzada que es vulgui transmetre a altres dispositius. A més si aquesta càrrega útil de 31 bytes estàndard no és prou gran com per encabir-hi totes les dades requerides, *Bluetooth Smart* també suporta una càrrega útil secundària opcional, anomenada resposta d'escaneig (Scan Response), que permet que els dispositius que detecten un dispositiu de difusió puguin sol·licitar una segona trama de difusió amb una càrrega addicional de 31 bytes.

Per acabar es pot afegir que la comunicació mitjançant radiodifusió és ràpida i fàcil d'utilitzar, i és una bona opció si només es vol difondre una petita quantitat de dades periòdicament o a múltiples dispositius a la vegada. Tot i així aquest mecanisme de comunicació presenta una limitació important, en comparació amb una connexió, i és que no hi ha cap mesura de seguretat o privacitat. És a dir qualsevol dispositiu observador és capaç de rebre les dades que es transmeten, i per tant no es adequat per a transmissió de dades sensibles.

3.2.2.2 Connexió

Una connexió és un intercanvi de dades permanent i periòdic de paquets entre dos dispositius. Per tant, és inherentment privat, ja que les dades són enviades i rebudes per només els dos nodes que participen en la connexió, i cap altre dispositiu pot accedir a aquestes a menys que sigui de manera indiscriminada mitjançant tècniques de *sniffing*. Per iniciar una connexió, un dispositiu central recull els paquets de sol·licitud de connexió enviats des d'un perifèric i després envia una sol·licitud al perifèric per establir una connexió exclusiva entre els dos dispositius. Un cop establerta la connexió, el perifèric deixar d'enviar missatges de sol·licitud de connexió i els dos dispositius poden començar el intercanvi de dades en ambdues direccions, com es mostra a la Figura 5.

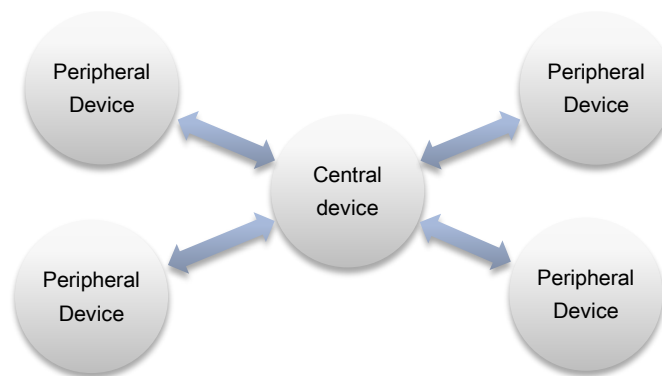


Figura 5: Topologia de connexió a *Bluetooth Smart*

En aquest mecanisme de comunicació també es defineixen dos rols separats, que són:

- Central (Master): Dispositiu que escaneja les freqüències preestablertes per a paquets de sol·licitud de connexió, i quan correspon inicia una connexió. Un cop establerta la connexió aquest gestiona la sincronització i inicia el intercanvi periòdic de dades.
- Perifèric (Slave): Dispositiu que envia periòdicament paquets de sol·licitud de connexió i accepta les connexions entrants. Un cop s'estableix una connexió,

segueix la sincronització establerta pel màster i intercanvia dades amb regularitat amb ell.

Per tant, una connexió no és més que el intercanvi de dades en certs instants temporals (esdeveniments de connexió) entre els dos nodes que hi participen. És important assenyalar que encara que el node central és el dispositiu que realitza l'establiment de la connexió, les dades es poden enviar de forma independent per part de qualsevol dels dispositius durant cada esdeveniment de connexió, i els rols no imposen restriccions en la prioritat o capacitat de transmissió. A més l'ús d'una connexió permet utilitzar un model de dades molt més ric, mitjançant capes i també permet reduir el consum d'energia, ja que es pot variar el retard entre els esdeveniments de connexió, o transmetre les dades només quan nous valors estan disponibles, en lloc d'haver d'anunciar o alertar contínuament sense saber qui està escoltant o amb quina freqüència.

Així doncs l'ús d'una comunicació amb connexió pot ser convenient si es necessita transmetre dades en ambdues direccions, o si es requereix una càrrega útil major a la capacitat permesa per els missatges *broadcast*.

3.2.3 Estats d'operació de Bluetooth Smart

Els dispositius *Bluetooth Smart* poden estar en diferents estats de funcionament i presentar diferents rols, com ja s'ha vist, depenent de la seva funcionalitat, la commutació entre un i altre és el que dona lloc a un sistema de baix consum. Els estats possibles són els següents:

- En espera (Standby): No transmet o rep paquets
- Radiodifonen (Advertising): Transmet missatges *broadcast* en els canals de radiodifusió
- Escanejant (Scanning): Busca dispositius de radiodifusió
- Inicialitzant (Initiating): Inicia la connexió amb un dispositiu de radiodifusió
- Connectant (Connection): Com a mestre: Es comunica amb un dispositiu que fa d'esclau. o com esclau: Es comunica amb un únic dispositiu, un mestre.

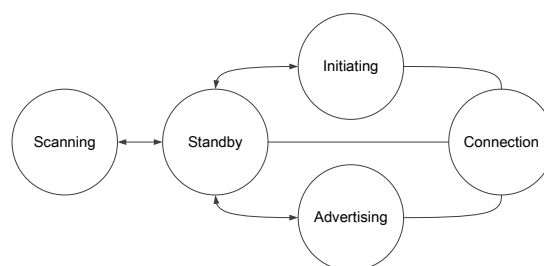


Figura 6: Estats d'operació d'un dispositiu *Bluetooth Smart*

3.2.4 Rang de cobertura de Bluetooth Smart

L'abast real de qualsevol dispositiu sense fil depèn d'una àmplia varietat de factors, com ara: l'entorn on opera, el disseny de l'antena, l'encapsulat, l'orientació del dispositiu, entre altres. Però com era d'esperar *Bluetooth Smart* es centra en comunicacions de curt abast. En general, segons el dispositiu, la potència de transmissió sol ser variable en un cert interval (típicament entre -30 i 0 dBm) el que permet variar l'abast. Tot i així cal observar que com més gran sigui la potència de transmissió més elevat serà l'abast o rang de cobertura, però per contra el consum de la bateria serà major, reduint-se el temps de vida útil d'aquesta. Per tant es pot veure que existeix un compromís entre potència transmesa, abast de transmissió i temps d'operació de la bateria.

Per acabar es pot afegir que és possible crear i configurar dispositius *Bluetooth Smart* que poden transmetre dades fins a 100 metres de distància o més, en condicions de Línia de Visió Directe (LOS) i fent ús d'un índex de modulació elevat. Tot i així el rang d'operació típic és entorn els 20 metres, realitzant un esforç conscient per reduir la potència de transmissió, mitjançant la disminució de l'abast, i així mantenir el temps de vida útil de la bateria sense que la distància de transmissió es converteixi en un inconvenient per a l'usuari final.

3.3 Mesures del senyal Bluetooth Smart per al posicionament

3.3.1 Transmitted Power Level (TPL)

Una de les primeres mesures disponibles a *Bluetooth Smart* per al posicionament és el nivell de potència de transmissió (Transmitted Power Level, TPL). L'especificació de *Bluetooth* indica que els dispositius amb una potència de transmissió entre +4 dBm i +20 dBm obligatòriament han de realitzar un control de potència. La raó d'això és doble, d'una banda el control de potència s'utilitza per conservar l'energia quan el transmissor és capaç d'utilitzar una alta potència de transmissió, i així ajustar la potència a les necessitats de l'enllaç, i d'altra banda s'utilitza per mitigar les interferències. El *TPL* es mesura en dBm, es representa amb un enter de 8 bits amb signe i el seu valor màxim és de +20 dBm. Pel que fa al valor mínim no està definit i ve establert pel proveïdor del dispositiu. Així doncs el nucli d'aquesta paràmetre és que els dispositius *Bluetooth* amb alta potència de transmissió redueixen aquest per estalviar energia quan la qualitat de l'enllaç és bona. L'exemple més típic d'aquest control de potència es troba quan els dispositius de comunicació estan a prop els uns dels altres i tot seguit la distància entre dispositius augmenta, de tal manera que també

augmentarà el seu TPL per compensar el increment de distància. Basant-se en això, és possible derivar una mètrica de distància, a partir del factor d'increment de la potència de transmissió.

3.3.2 Received Signal Strength Indicator (RSSI)

Un altre de les mesures disponibles a *Bluetooth Smart* per al posicionament és l'indicador d'intensitat de senyal rebuda (Received Signal Strength Indicator, RSSI). El valor de *RSSI* és una indicació de la intensitat del senyal experimentada pel receptor d'un paquet *Bluetooth* i es representa mitjançant un enter de 8 bits amb signe que per *Bluetooth Smart* pren valors entre -127 dBm i 20 dBm, on un valor major indica un senyal rebut de major potència, i per tant, de major qualitat. El valor de *RSSI* es pot obtenir tant durant l'escaneig de dispositius de radiodifusió, com durant una connexió activa amb un altre dispositiu. Una diferència important entre *Bluetooth clàssic* i *Bluetooth Smart* és la manera en com es pot obtenir el valor de *RSSI*. A *Bluetooth clàssic* existeixen dues variants per obtenir aquets valor: en les primeres versions de *Bluetooth* només es pot obtenir aquest paràmetre durant una connexió activa entre dos dispositius mentre que en especificacions posteriors (de la 1.2 en endavant) el valor del *RSSI* es pot obtenir durant les cerques de dispositius sense la necessitat d'establir una connexió prèviament. A *Bluetooth Smart* aquest procediment d'obtenció del valor de *RSSI* millora encara més, i es pot obtenir quan es reben els paquets de radiodifusió (missatges broadcast). Tot i així la possibilitat d'obtenir el valor de *RSSI* durant una connexió activa entre dispositius també es conserva. Per acabar per a convertir el valor de *RSSI* en una mesura de distància, hi ha diversos algorismes com es veurà més endavant, però gairebé tots ells es basen en el coneixement d'un valor de referència per endavant, per exemple el nivell de potència del transmissor o la mesura *RSSI* a una distància fixa i coneguda.

3.3.3 Inquiry Response Rate (IRR)

Un altre dels paràmetres disponibles a *Bluetooth Smart* per a la implementació d'un sistema de posicionament en interiors és la taxa de resposta d'interrogació (Inquiry Response Rate, IRR). Aquest paràmetre no és un terme definit per l'especificació *Bluetooth*. Sinó que aquest paràmetre es basa en utilitzar les característiques de *Bluetooth* en el punt on es fan les cerques per descobrir dispositius propers. De tal manera que els dispositius que es troben propers al dispositiu cercador, i que estan en mode visible respondran a la sol·licitud de cerca amb un missatge de resposta de cerca. Llavors la idea és que en cada punt o ubicació on el dispositiu realitza una cerca rebrà respostes dels diferents nodes i també rebrà un nombre diferent de respostes de

cada node. Unint aquests dos paràmetres es pot formar un atribut que en principi és únic per a cada posició o punt a l'àrea on s'ha de desplegar el sistema de posicionament.

3.4 Mètodes de posicionament pel senyal Bluetooth Smart

3.4.1 Trilateració a partir de la mesures d'atenuació

La trilateració és un dels mètodes més utilitzat per a determinar o estimar posicions. Per poder-se aplicar es requereix realitzar el mesurament o estimació de la distància entre l'objecte del qual es vol conèixer la seva posició i uns punts de referència, de posició coneguda. Cal recordar que el càlcul de la posició d'un objecte o un usuari en dues dimensions requereix mesuraments de distància respecte 3 punts de referència no alineats, mentre que es requereixen mesuraments de distància en 4 punts no coplanars per a posicionaments en l'espai. Un cop es disposa de tres o més punts de referència, aquests es consideren com els centres de tres o més cercles (en funció del nombre de punts de referència) i les distàncies mesurades o estimades es tracten com els radis d'aquests cercles. De tal manera que la posició relativa o absoluta de l'usuari o objectiu es converteix en el punt d'intersecció entre aquests cercles. A la Figura 7 es pot veure una representació gràfica del mètode de la trilateració descrit per el cas de dues dimensions.

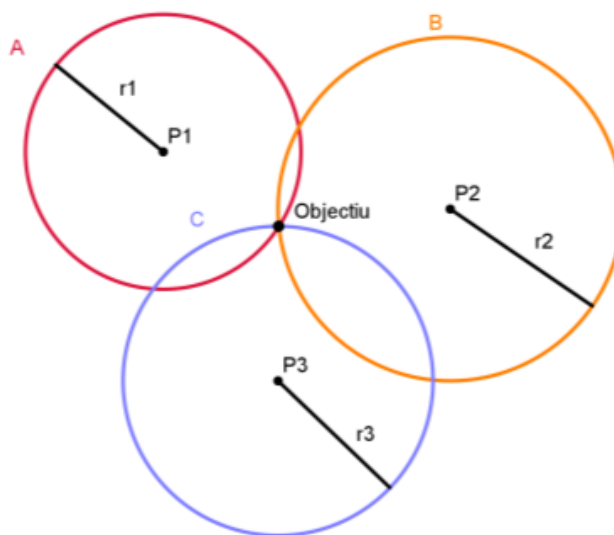


Figura 7: Exemple de posicionament mitjançant trilateració en dues dimensions

Com a resultat d'això, s'obté un sistema d'equacions sobredeterminat amb almenys tres equacions, una per cada cercle i dos valors desconeguts comuns (x, y) per el cas de dues dimensions i un sistema sobredeterminat amb almenys quatre equacions, una per cada cercle i tres valors desconeguts comuns (x, y, z). Per a resoldre aquest sistema hi ha diferents enfocaments, però usualment s'utilitza l'enfocament de mínims

quadrats per a estimar la posició que presenta el menor error quadràtic (Minimum Square Error, *MSE*). Tot i així la part crítica del posicionament mitjançant trilateració no és la resolució d'aquest sistema sobredeterminat sinó que la precisió i exactitud d'aquesta metodologia de posicionament ve determinada per una bona mesura o estimació de la distància entre l'usuari o objectiu i els punts de referència. En la majoria dels sistemes de posicionament aquests punts de referència es componen de nodes, anomenats balisa, o punts d'accés a una xarxa sense fils. I les distàncies es poden estimar a partir de la conversió dels paràmetres del senyal rebut. Tal i com ja s'ha presentat amb anterioritat les mesures típiques per aquesta estimació de distància són el temps de vol (Time Of Flight, TOF) i l'atenuació de la potència rebuda (Received Signal Strength Indicator, RSSI). Per tant combinant aquestes mesures amb el coneixement de les coordenades de les balises es pot determinar la posició de l'usuari o objectiu.

Donat que en aquest treball s'utilitza tecnologia *Bluetooth Smart*, caldrà recórrer a mesures d'atenuació de la potència rebuda (Received Signal Strength Indicator, RSSI), ja que tal i com ja s'ha vist de les tres mesures disponibles a *Bluetooth Smart* aquesta és la que millor s'adapta a aquesta metodologia de posicionament.

3.4.2 Fingerprinting

El mètode *Fingerprinting* de posicionament es basa en dividir l'àrea on opera aquest sistema en múltiples regions o cel·les. Com ja s'ha vist aquest mètode consta de dues fases o etapes. En la primera etapa, la etapa *offline* o etapa d'entrenament es realitza una associació de cada cel·la o regió amb alguns atributs únics per trencar la similitud existent entre ells. En el context de posicionament sense fil, aquests atributs poden ser paràmetres del senyal, com ara l'atenuació de la potència rebuda (Received Signal Strength Indicator, RSSI) o la taxa de resposta d'interrogació (Inquiry Response Rate, IRR), entre altres. En aquesta etapa, es mesuren els atributs i s'assignen a cada regió o cel·la del sistema. Per exemple, si s'utilitza el *RSSI* com un atribut, es pot calcular la mitjana de valors de *RSSI* per cada balisa en cada regió. De tal manera que cada regió dona lloc a una empremta digital que consisteix en diverses mitjanes de *RSSI* i la posició d'aquesta en la quadrícula que defineix l'àrea de treball. D'aquesta manera, es construeix una base de dades d'empremtes digital, on es possible identificar cada regió.

En la segona etapa, anomenada etapa *online* és on es du a terme l'estimació de la posició real. En aquesta etapa un usuari o objectiu intenta determinar la seva posició

en base als valors presents a la base de dades. Cada vegada que l'usuari vol determinar la seva posició, realitza els mesuraments dels mateixos atributs que s'han fet servir a l'etapa *offline* i es compararen amb els valors que hi ha emmagatzemats a la base de dades. Per exemple, en el cas que s'utilitzi com a atribut mesures de *RSSI*, el node mòbil obtindria els valors de *RSSI* de totes les balises disponibles i les compararia amb les empremtes digitals que s'emmagatzemen a la base de dades. De tal manera que la posició en qüestió vindrà determinada per la millor coincidència dels valors mesurats amb l'empremta digital.

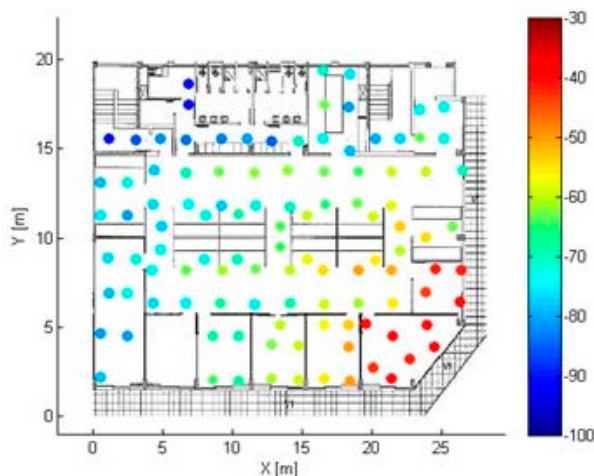


Figura 8: Exemple de posicionament mitjançant el mètode fingerprinting
Font: [49]

De nou donat que en aquest treball s'utilitza tecnologia *Bluetooth Smart*, caldrà recórrer a mesures d'atenuació de la potència rebuda (Received Signal Strength Indicator, *RSSI*), encara que també es podrien utilitzar mesures del nivell de potència de transmissió (Transmitted Power Level, *TPL*) o de la taxa de resposta d'interrogació (Inquiry Response Rate, *IRR*). De totes maneres donada la facilitat per obtenir els valors de *RSSI* amb *Bluetooth Smart* i que és present a tots els paquets de transmissió és més adient recórrer a aquest tipus de mesures.

3.4.3 Proximitat

El mètode basat en la proximitat consisteix en la localització d'un dispositiu en funció de la seva distància respecte a un altre dispositiu o balisa. En l'especificació més recent de *Bluetooth Smart* [50] és defineix un perfil anomenat "Proximity Profile" que permet la monitorització de la proximitat entre dos dispositius *Bluetooth*. El perfil de proximitat defineix el comportament que ha de presentar un dispositiu quan s'allunya d'un altre dispositiu ja sigui perquè es cau la connexió o perquè es produeix una pèrdua o un augment de la potència rebuda per sobre d'un nivell predeterminat, provocant una alerta immediata. Aquesta alerta es pot utilitzar per notificar a l'usuari

quan els dispositius s'han separat. I com a conseqüència d'aquesta, un dispositiu pot adoptar altres mesures, per exemple, pot bloquejar un dels dispositius de manera que ja no sigui utilitzable. Al seu torn el perfil de proximitat també es pot utilitzar per definir el comportament quan els dos dispositius s'apropen de manera que s'estableixi una connexió o per definir el comportament quan es produeix una pèrdua de la potència rebuda per sota d'un nivell preestablert. Així doncs tal i com es mostra a la Figura 9 aquest perfil permet definir diferents regions o zones i a cadascuna d'elles associar-li una acció determinada.

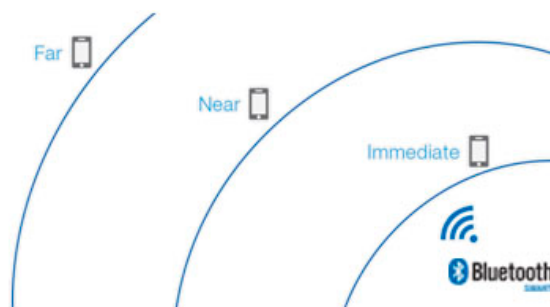


Figura 9: Exemple de posicionament mitjançant el mètode basat en proximitat

3.5 Anàlisi inicial de Bluetooth Smart com a tecnologia per IPS

Un cop presentades les principals característiques de *Bluetooth Smart* ja s'està en disposició de realitzar un valoració inicial de les capacitats d'aquesta tecnologia per utilitzar-se en un sistema de posicionament en interiors per assistir a persones amb discapacitat visual. La primera característica que cal destacar és que la tecnologia *Bluetooth Smart* utilitza una banda freqüencial lliure (banda ISM a 2,4 GHz), la qual cosa permet implementar aquesta tecnologia sense haver d'adquirir un llicència de banda freqüencial. Al seu torn donat que es tracta d'una banda freqüencial acceptada mundialment, no cal dissenyar diferents sistemes ni adaptar-se a diferents bandes freqüencials en funció de la regió on s'implementi. A més la disposició estratègica dels canals de *broadcast* i l'ús de la tècnica d'espectre eixamplat per salt de freqüència (FHSS) permeten reduir les possibles interferències. Cal observar que aquesta característica tindrà un impacte directe en el cost de la solució, en la seva robustesa i adaptabilitat, i en la seva escalabilitat. Un altre característica important és la taxa de transmissió reduïda, cal apreciar que en un sistema de posicionament no es requereix la transmissió d'un gran volum de dades sinó més aviat un volum petit però enviat amb certa freqüència, així doncs *Bluetooth Smart* permet transmetre aquest volum de dades fent un ús eficient de les capacitats energètiques el que de nou repercutirà en el cost de la solució i en la seva vida útil. Un altre de les característiques importants és la capacitat d'ajustar la potència de transmissió i el interval de transmissió, que com ja

s'ha vist està estretament relacionat amb l'abast de transmissió i que per tant afectarà tant a l'exactitud, a la precisió i l'àrea de cobertura del sistema o solució. Un altre de les característiques destacable per un sistema de posicionament són els dos mecanismes de comunicació existents a *Bluetooth Smart*, en concret el mecanisme de comunicació *broadcast* o radiodifusió que permet que qualsevol dispositiu rebi els missatges *broadcast* sense necessitat d'establir una connexió. És important observar que el fet que no s'hagi d'establir cap connexió entre emissor i receptor garanteix una privacitat de cara a l'usuari final del sistema, ja que a priori no hi ha una interacció entre emissor i receptor. Encara que, com ja s'ha comentat, la comunicació *broadcast* no és adequada per la transmissió de dades sensibles, ja que tots els dispositius a l'abast de l'emissor reben les dades i aquestes no presenten cap tipus de protecció. Tot i que això pot semblar un desavantatge per a un sistema de posicionament realment representa una avantatge ja que garanteix que qualsevol receptor a l'abast de l'emissor rebi la informació necessària per al posicionament i sense necessitat d'establir una connexió com ja s'ha mencionat, la qual cosa garanteix en gran part la privacitat del sistema o solució. Per acabar la tecnologia *Bluetooth Smart* presenta diferents mesures que es poden utilitzar per a un sistema de posicionament, tot i que en destaca la mesura de *RSSI* per la seva facilitat per obtenir-la i per que es sempre present independentment de la configuració dels dispositius o del mecanisme de comunicació. Alhora amb aquest tipus de mesura es poden aplicar diferents mètodes de posicionament el que permetrà triar entre diferents opcions.

Per tant com a valoració inicial es pot dir que *Bluetooth Smart* presenta unes bones característiques per un sistema de posicionament en interiors i que en gran part dona resposta als requisits de disseny plantejats. A més en comparació amb altres tecnologies aptes per a un sistema de posicionament *Bluetooth Smart* sembla ser una de les tecnologies que millors prestacions ofereix. Per exemple *ZigBee* també ofereix unes bones prestacions però té l'inconvenient que no està integrada en els telèfons intel·ligents d'avui dia, és a dir es requereix un receptor específic, el que en dificulta la seva implantació i n'incrementa el cost. Un altre possible alternativa seria l'ús de les xarxes sense fils Wi-Fi que tenen l'avantatge que en una gran quantitat de localitzacions interiors ja hi ha una infraestructura desplegada, tot i així tenen un alt consum energètic que en dificulta la seva adopció i n'incrementa el cost. Altres tecnologies com ara *RFID*, *UWB* o *Infrarojos* també podrien ser una alternativa però el seu abast és reduït o bé de nou requereixen receptors específics o que existeixi visió directa entre emissor i receptor. És a dir *Bluetooth Smart* ofereix l'equilibri òptim entre la infraestructura, la fiabilitat, la robustesa i la precisió requerides.

4. Entorn de proves

Un cop presentats els requisits de disseny i les principals característiques de la tecnologia *Bluetooth Smart* i de haver realitzat un anàlisi inicial de la viabilitat d'aquesta tecnologia com a sistema de posicionament en interiors. En aquest capítol, es descriuen i es defineix l'entorn de test utilitzat per analitzar amb major profunditat les característiques de *Bluetooth Smart*. Alhora també es presenten els algorismes de posicionament i la seva implementació.

4.1 Dispositius i software

4.1.1 Elecció dels dispositius: Beacons/Dispositius Bluetooth Smart

Tal i com s'ha vist al capítol anterior, la implementació d'un dispositiu *Bluetooth Smart* és força complexa, donada la complexitat de la seva pila de protocols i el nombre de capes existents. Per això alhora d'escollir els diferents dispositius per avaluar la funcionalitat d'aquesta tecnologia existeix un dilema entre solucions en les quals s'ha d'implementar gairebé tota la pila de protocols com podria ser els dispositius *Bluetooth Smart* de *Nordic Semiconductor* [51], els de *Texas Instruments* [52], o derivats d'aquests com *LightBlue* [53] i solucions amb la pila de protocols ja implementada, i en les quals es treballa en la última capa, a la capa d'aplicació. Dins d'aquest grup existeix un conjunt de dispositius anomenats *iBeacons* o *Beacons*, que no són més que uns dispositius *Bluetooth Smart* amb una implementació determinada dels protocols per oferir serveis de proximitat, basats en l'especificació de proximitat de *Bluetooth Smart*. El més important, d'aquesta tecnologia es que permet a un dispositiu realitzar determinacions amb molta exactitud i precisió del que és a prop, poden arribar assolir una exactitud de l'orde d'uns quants centímetres. Al seu torn, la informació de localització amb alta precisió i exactitud està disponible per a les aplicacions amb facilitat, el que permet als desenvolupadors crear nous tipus d'experiències mitjançant la incorporació d'aquesta informació a les aplicacions. Els *iBeacons* o *Beacons* són només dispositius de transmissió. És a dir recordant els mecanismes de comunicació de *Bluetooth Smart*, aquests utilitzen el mecanisme de radiodifusió o *broadcast*. Encara que hi ha alguns models que també suporten la comunicació mitjançant connexió, però aquesta principalment queda reservada a tasques de configuració. Així doncs aquests dispositius transmeten periòdicament identificadors numèrics que s'assignen a accions en el dispositiu receptor. Com a resultat d'això, el "protocol" que s'utilitza és simple i és bàsicament un vehicle per lliurar identificadors numèrics als clients propers.

De nou al mercat existeix una gran varietat de fabricants de *iBeacons* o *Beacons* com ara *Estimote*, *StickNFind*, *Kontakt*, *Radius Networks*, *Blue Sense Networks*, *BeaconInside*, *Sensorberg*, *Glimworm Beacons*, entre altres. En aquest sentit alhora d'escollir entre un o un altre s'ha prioritzat per les seves funcionalitats afegides, com potser la gestió centralitzada o la personalització dels dispositius, el temps que porten implantats al mercat i l'experiència en sistemes d'assistència. De tal manera que per l'elaboració d'aquest treball s'ha optat per els dispositius de *Kontakt* [54], fabricant europeu, nascut al any 2013 com una solució d'informació per a persones invidents en museus.

4.1.2 Beacons de Kontakt i les seves característiques

En aquest subapartat es presenten les diferents característiques i paràmetres dels dispositius de *Kontakt* amb la finalitat de mostrar quines d'elles són útils per a la implementació d'un sistema de posicionament.

4.1.2.1 Paràmetres: UUID, Major and Minor als Beacons de Kontakt

L'identificador universal únic de proximitat (Universally Unique Identifier, UUID), el Major, i el Minor en conjunt constitueixen un identificador únic per a cada Beacon i són els components clau de tots els paquets de radiodifusió o missatges *broadcasts* transmesos contínuament pels Beacons. Decidir com configurar aquests paràmetres, és una consideració clau a l'hora de pensar en la implementació dels Beacons, sobretot en termes d'organització i gestió, ja que aquest paràmetres són els que permeten determinar en última instància de quin Beacon s'ha rebut el missatge. L'objectiu del UUID de proximitat és distingir tots els Beacons que formen part d'una xarxa dels que pertanyen a un altre xarxa. Mentre que el Major dins aquesta xarxa definida per l'UUID permet crear grups de Beacons, per exemple per agrupar el Beacons que es troben en un mateix espai, i el Minor és el que permet identificar individualment cada Beacon dins una xarxa i dins de cada grup.

L'estructura típica de l'identificador d'un Beacon és la que es pot veure a la Taula 2 i consta: del UUID, que conté 32 dígit hexadecimals, dividits en 5 grups i separats per guions i del Major i Minor que cadascun conté un enter sense signe amb valors entre 1 i 65535.

UUID	Major	Minor
F7826DA6-4FA2-4E98-8024-BC5B71E0893E	59192	22271

Taula 2: Identificadors als Beacons de Kontakt

Per entendre millor la utilitat d'aquests identificadors a continuació es presenta un exemple. Se suposa que es vol implementar un sistema de localització basat en Beacons en una xarxa de museus, que està format per quatre museus situats en ubicacions diferents, i es volen utilitzar els Beacons per oferir als visitants una experiència interactiva quan entren a qualsevol del museus i proporcionar-los informació sobre les col·leccions individuals quan s'acosten a cada exposició. De tal manera que una possible assignació d'identificadors és la que es mostra a la Figura 10. On s'ha assignat un únic UUID a la xarxa de museus, amb la finalitat que el dispositiu de l'usuari, pugui monitoritzar les quatre ubicacions físiques utilitzant aquest UUID únic i així identificar quan ha entrat o ha sortit de qualsevol dels museus pertanyents a la xarxa de museus. El Major, ens indica en quin museu dels quatre es troba actualment l'usuari i així la aplicació pot actuar en conseqüència, per exemple, oferint suggeriments d'esdeveniments, mapes, guies d'àudio, o altres continguts. I el Minor es pot utilitzar per identificar les col·leccions existents dins de cada museu, o les exposicions individuals dins de la col·lecció, proporcionant informació més detallada sobre l'exposició, com potser una guia d'àudio per aquesta exposició.



Figura 10: Exemple d'assignació d'identificadors als Beacons

Font: [55]

Per tant per a un sistema de posicionament basat en Beacons resulta indispensable l'ús d'aquests tres paràmetres, ja que són els que permetran identificar i definir la ubicació de cada Beacon, des de la qual l'usuari podrà determinar la seva ubicació. A més amb una estratègia d'identificadors ven plantejada es podria fins i tot incloure informació de les coordenades específiques d'on s'ubica cada Beacon, per exemple assignat la posició com a valor de Major i Minor.

4.1.2.2 Interval de radiodifusió als Beacons de Kontakt

L'ajust del interval de transmissió determina la freqüència amb la qual els Beacons transmetran el missatge de radiodifusió o *broadcast*. Usualment aquest es mesura en milisegons, però pot mesurar-se en segons pels intervals més grans. Cal observar que

la configuració triada per al interval de transmissió i per a la potència de transmissió, tenen un gran impacte en la forma en què la xarxa de Beacons funciona. Per tant, l'elecció de la configuració òptima està determinada en gran mesura per les necessitats específiques de cada aplicació. En el cas del interval de transmissió, aquest afecta considerablement a la estabilitat del senyal i la durada de la bateria. Per tant l'elecció de la configuració correcta és molt important per assegurar una xarxa de Beacons amb un funcionament correcte i eficient. Tal i com es mostra a la Taula 3 com més baix sigui el interval, el temps de vida útil de la bateria del dispositiu serà menor. En aquesta mateixa taula es pot observar que la configuració recomanada per Apple per als iBeacons té un impacte considerable en la vida útil de la bateria del dispositiu. Usualment no és necessari fer ús d'un interval tant reduït però aquest pot millorar l'estabilitat de senyal rebut i permet millorar l'exactitud en el posicionament.

Interval	Interval used in:	Tx Power	Expected range	Expected Battery life
100ms	Apple iBeacon profile	-12 dBm	35 m	Up to 7 months
350ms	Kontakt Beacon profile	-12 dBm	35 m	Up to 2 years
1000ms	Custom profile	-12 dBm	35 m	Up to 4 years

Taula 3: Efectes del interval de transmissió en la vida útil de la bateria

Una avaluació detallada, realitzada pel propi fabricant – *Kontakt* - [56], dels diferents intervals de transmissió ha demostrat que valors alts del interval (més de 700 ms) causen grans problemes amb l'estabilitat del senyal. Mentre que també s'ha determinat que l'ús d'un interval de 350 ms ofereix l'equilibri perfecte entre l'estabilitat del senyal i la vida útil de la bateria. A la Figura 11 es pot apreciar la relació entre l'estabilitat i el interval de transmissió del senyal.

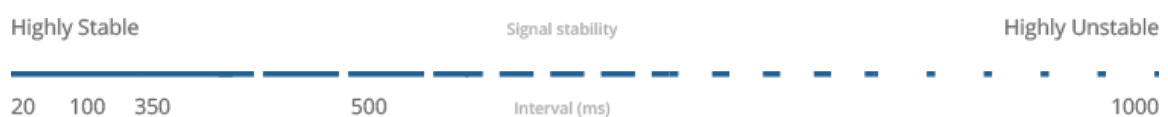


Figura 11: Efectes del interval de transmissió en l'estabilitat del senyal transmès

Font: [56]

Per acabar altres estudis, realitzats també pel propi fabricant – *Kontakt* - [56] han determinat que el interval de transmissió afecta directament a l'exactitud del posicionament de l'usuari, cal remarcar que aquesta millora en l'exactitud es produeix en la identificació de l'usuari quan aquest es troba en moviment, i que no s'aprecia gaire diferència en posicionaments estàtics. Tal i com es pot veure a la Figura 12 quan

més petit és el interval més exactitud s'aconsegueix al posicionar un usuari en moviment.

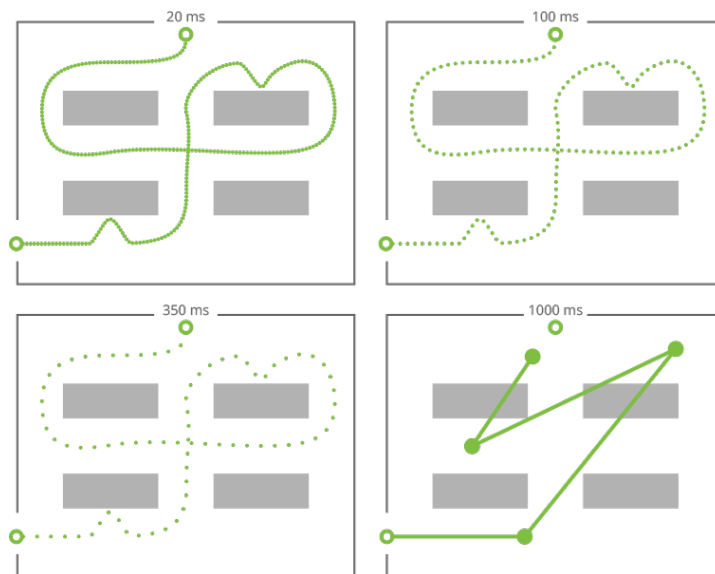


Figura 12: Efectes del interval de transmissió en la exactitud del posicionament
Font: [56]

4.1.2.3 Potència de transmissió als Beacons de Kontakt

L'abast màxim del senyal transmès, com ja s'ha vist, depèn de l'ajust de potència de transmissió, així com d'altres factors com l'entorn de propagació, ja que els senyals poden patir interferències, difraccions o absorpcions. Tot i que la potència de transmissió predeterminada als Beacons de kontak és de -12 dBm , amb un abast d'uns 20 metres, l'usuari la pot ajustar segons el valors de la Taula 4 per tal de variar l'abast i adaptar-se a l'entorn de treball.

Hexadecimal value	iOS App	Decimal value	RSSI (1 metre)	Range (metres)
e2	0	-30 dBm	-115 dBm	2
Ec	1	-20 dBm	-84 dBm	4
f0	2	-16 dBm	-81 dBm	10
f4	3	-12 dBm	-77 dBm	20
f8	4	-8 dBm	-72 dBm	30
Fc	5	-4 dBm	-69 dBm	40
00	6	0 dBm	-65 dBm	60
04	7	4 dBm	-59 dBm	70

Taula 4: Valors de potència de transmissió disponibles als Beacons de Kontakt

4.1.2.4 Estructura del paquet de radiodifusió als Beacons de Kontakt

Els paquets de radiodifusió o *broadcast* són els missatges que els Beacons transmeten contínuament anunciant la seva presència als dispositius propers. L'estructura d'aquest paquet consta d'una constant inicial de 9 bytes, de l'identificador de proximitat (Proximity UUID) amb una longitud de 16 bytes, del Major i del Minor amb una longitud cadascun de 2 bytes i l'últim byte és l'utilitza't per calcular la distància entre l'usuari i el Beacon ja que és el que conté el valor de *RSSI* (Received Signal Strength Indication). A l'apartat "*Advertising packet structure*" de l'annex es pot veure amb més detall la seva arquitectura. A més cal afegir que per a un sistema de posicionament basat en Beacons aquest és el paquet d'informació indispensable, ja que és el que permet obtenir tota la informació necessària per a realitzar el posicionament.

4.1.2.5 Serveis presents als Beacons de Kontakt

Els Beacons de *Kontakt* implementen vuit serveis. Cinc d'elles són propis de l'estàndard *Bluetooth* amb un identificador únic de 16 bits (Universally Unique Identifiers, UUID) i els altres tres són els serveis personalitzats amb UUID generada explícitament amb 128-bits. Cada servei conté una o més característiques que emmagatzemen valors d'informació o de control. A l'apartat "*Kontakt Beacon services*" de l'annex es pot veure amb major detall tots els serveis i les seves característiques.

4.1.2.6 Estructura de la resposta d'escaneig als Beacons de Kontakt

El paquet de resposta d'escaneig conté informació bàsica sobre un Beacon. Una vegada que un paquet de radiodifusió o missatge *broadcast* s'ha rebut per un dispositiu d'escaneig (per exemple un dispositiu mòbil), aquest pot sol·licitar més informació. Llavors el Beacon respon amb el paquet de resposta d'escaneig. Aquest paquet només s'envia una vegada i tot seguit el Beacon torna a enviar paquets de radiodifusió o missatges *broadcast*. La longitud del paquet és variable (fins a un màxim de 31 bytes), depenent de la longitud del nom del dispositiu. El paquet de resposta d'escaneig conté la següent informació: el nom del dispositiu, la potència de transmissió, el Beacon ID, la versió de firmware i el nivell de la bateria. A l'apartat "*Scan response packet structure*" de l'annex es pot veure amb més detall la seva arquitectura.

4.1.3 Aplicacions

Alhora de treballar amb Beacons és indispensable la creació d'aplicacions o l'ús d'aplicacions de tercers, ja sigui per a dispositius mòbils o receptors fets a mida, que

puguin explotar la informació proporcionada per aquests. Tot seguit es presenten les aplicacions utilitzades en el desenvolupament d'aquest treball.

4.1.3.1 SDK de Kontakt

Kontakt a més d'oferir Beacons disposa d'un seguit de llibreries que faciliten el treball amb aquest dispositius. En concret *Kontakt* ofereix una API Rest que permet accedir mitjançant diferents llenguatges de programació a tots els dispositius, esdeveniments, accions, emmagatzemats al cloud de Kontakt.io. De tal manera que es poden gestionar de manera remota i centralitzada les propietats dels Beacon, assignar dispositius a esdeveniments concrets o *managers*, i definir les diferents accions per a cada dispositiu. Al seu torn també ofereix una *SDK* per a *iOS*, basada en dues llibreries natives de *iOS*: *Core Location* i *Core Bluetooth*, que faciliten la programació d'aplicacions que interaccionin amb els Beacons d'aquest fabricant en sistemes *iOS*. Finalment també ofereix una *SDK* per *Android*, basada en la implementació de *Bluetooth Low Energy* de la *SDK d'Android*. Aquesta implementació de *BLE* a la *SDK d'Android* es va introduir en la versió d'*Android 4.3* (Nivell d'API 18) i dona suport per a implementar el rol central o *master* de *Bluetooth Smart* i proporciona les funcions necessàries a les aplicacions per detectar dispositius, consulta els serveis que ofereixen, i llegir/escriure les seves característiques. Per això tant, si s'utilitza la *SDK d'Android* com derivades d'aquestes com pot ser la *SDK de Kontakt*, els dispositius amb una versió d'*Android* anterior a la 4.3 no podran interactuar amb els Beacons.

Tot i que el aquest treball es pot realitzar i implementar en sistemes *iOS*, s'ha escollit desenvolupar-lo en sistemes *Android* degut al coneixement previ del llenguatge de programació d'aquesta plataforma i a la disponibilitat de diferents dispositius basats en *Android* i de les eines de desenvolupament.

Així doncs, tant si s'opta per utilitzar l'*SDK d'Android* com la *SDK de Kontakt* totes dues permeten:

- Escanejar la presència de Beacons en segon pla.
- Monitoritzar Beacons en segon pla.
- Llegir i escriure les característiques d'un determinat Beacon.

Per tant, assoleixen els requisits necessaris per aplicacions de posicionament en interiors que són:

- Escaneig de dispositius *Bluetooth Smart*.
- Identificació de Beacons *Bluetooth Smart*.

- Obtenció de dades dels missatges de radiodifusió o *broadcast*, per extreure les mesures.

4.1.3.2 Altres aplicacions

Alternativament també es poden utilitzar altres aplicacions de tercers per tal d'avaluar el correcte funcionament dels Beacons. En l'àmbit d'aquest treball s'ha fet ús de les aplicacions proporcionades pel fabricant *Nordic Semiconductor*: *nRF Master Control Panel*, *nRF Beacon*, *nRF Proximity* i *nRF Toolbox*. Les aplicacions d'aquest fabricant tenen una importància especial, ja que és l'encarregat de dissenyar i fabricar els integrats *Bluetooth Smart* (Nordic nRF51822) que incorporen els dispositius de *Kontakt*. Al seu torn també s'ha fet servir l'aplicació *LightBlue* i *BLE reader*, l'aplicació per *iOS* de *Kontakt* que permet gestionar i administrar els Beacons d'aquest fabricant i el panell web d'administració de *Kontakt*.

4.2 Descripció de l'escenari de proves

Per a l'avaluació i anàlisi de la tecnologia *Bluetooth Smart* i dels Beacons per al disseny d'un sistema de posicionament en interiors per assistir a persones amb problemes visuals s'ha definit diferents escenaris en una vivenda de 86.78 metres quadrats. A la Figura 13, es pot veure la distribució de les diferents zones de la vivenda i les seves dimensions.



Figura 13: Plànol de la vivenda on s'han definit els diferents escenaris de proves

El primer escenari (Figura 14) que s'ha definit serveix per avaluar el comportament del senyal *Bluetooth Smart* i dels Beacons en situacions en les quals l'emissor i el receptor es troben propers. Alhora amb aquest escenari s'han obtingut les dades necessàries per a confirmar si el valor de *RSSI* mesurat a un metre es correspon amb el valor especificat per el fabricant.

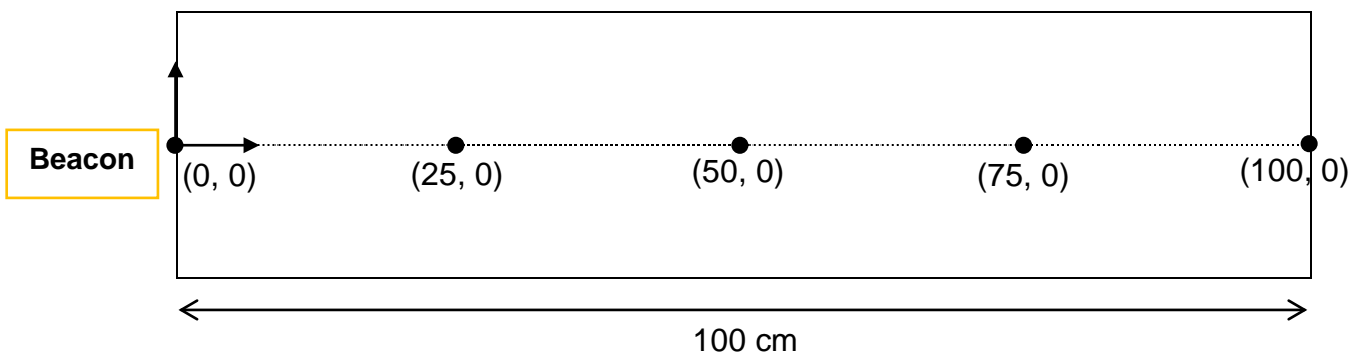


Figura 14: Plànol de l'escenari de proves 1.

El segon escenari (Figura 15 i Figura 16) que s'ha definit serveix per avaluar el comportament del senyal *Bluetooth Smart* i dels Beacons a l'incrementar la distància entre el dispositiu mòbil (receptor) i els Beacon (emissor) .

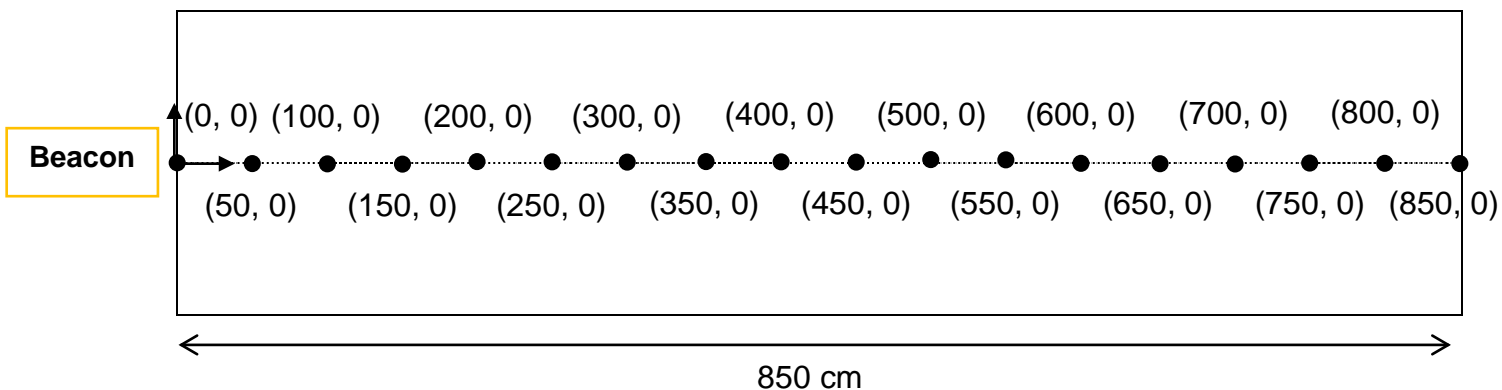


Figura 15: Plànol de l'escenari de proves 2.

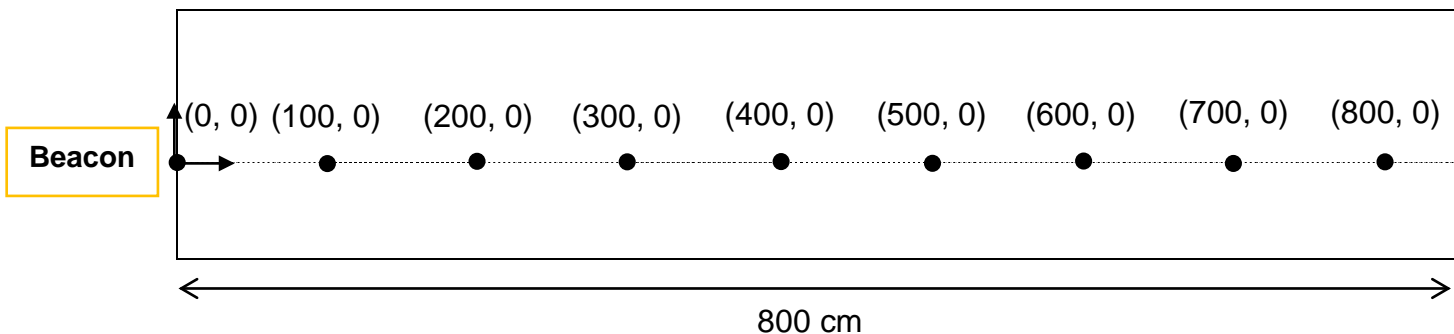


Figura 16: Plànol de l'escenari de proves 3.

El tercer escenari (Figura 17) que s'ha definit serveix per avaluar el comportament del senyal *Bluetooth Smart* i dels Beacons, ja dins un cas d'un sistema de posicionament en interiors basat en tres dispositius però restringit a una habitació. A l'apartat "*Plànol i distribució dels dispositius a l'escenari room1*" de l'annex es pot trobar una descripció més detallada de la distribució d'aquest escenari.

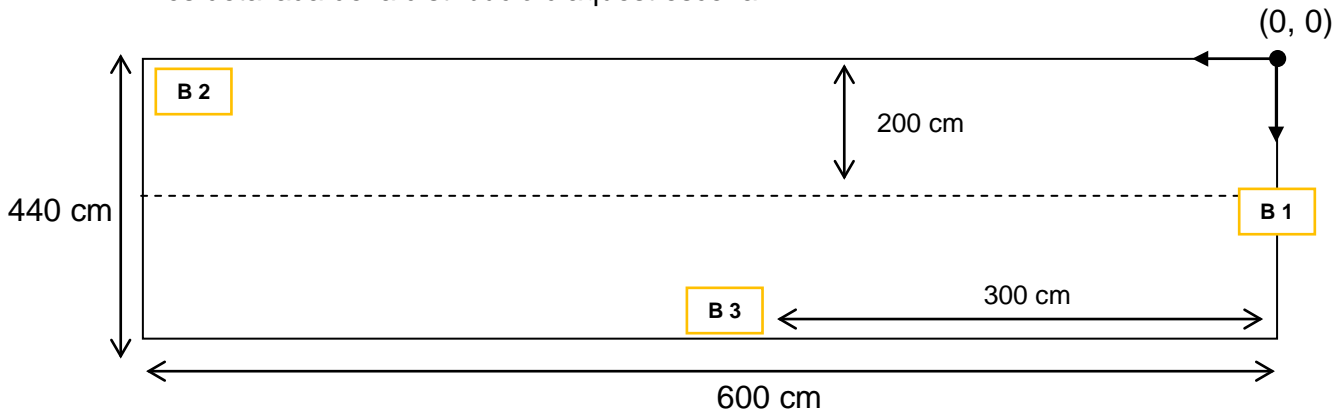


Figura 17: Plànol de l'escenari de proves 4

Per acabar s'ha definit un quart escenari que serveix per avaluar el comportament del senyal *Bluetooth Smart* i dels Beacons, dins un cas d'un sistema de posicionament en interiors basat en diversos dispositius i incloent tota la vivenda. A l'apartat "*Plànol i distribució dels dispositius a l'escenari building1*" de l'annex es pot trobar una descripció més detallada de la distribució d'aquest escenari.

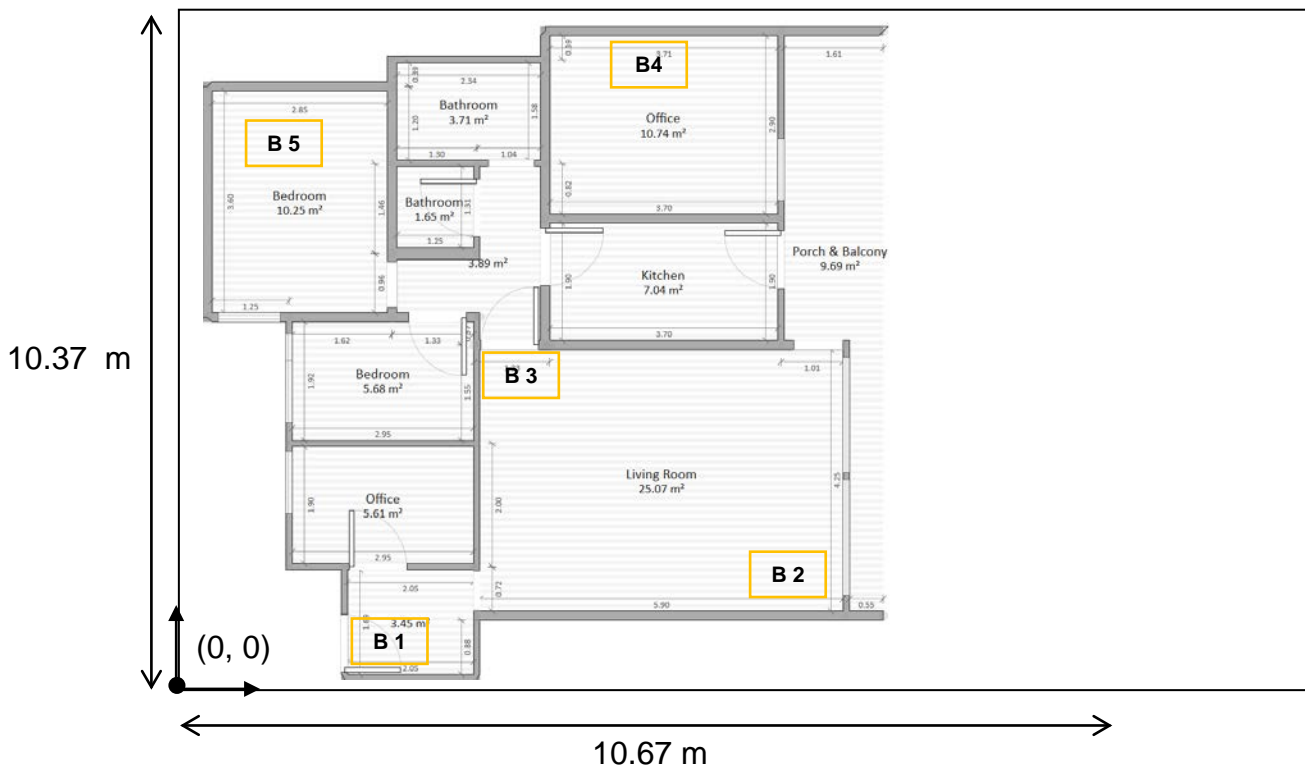


Figura 18: Plànol de l'escenari de proves 5.

Al seu torn s'han utilitzat cinc Bluetooth Beacons de *Kontakt* i un cloud Beacon de *Kontakt* per a definir diferents configuracions i avaluar com afecta el nombre de dispositius i la seva ubicació en el rendiment d'un sistema de posicionament.



Figura 19: Bluetooth Beacon i Cloud Beacon

Font: [54]

Tot i que el Cloud Beacon també pot actuar com un Bluetooth Beacon, aquest incorpora una connexió *Wi-Fi*, la qual cosa permet gestionar i canviar la configuració dels Beacons que es troben al seu abast (entorn un radi de 50 metres) de forma remota. Així doncs en l'àmbit d'aquest treball el Cloud Beacon només s'ha utilitzat com a dispositiu de control i gestió de la resta de dispositius i s'ha omès la seva funcionalitat com a Bluetooth Beacon.

A la Figura 20 es mostra un exemple de distribució dels diferents dispositius en una localització determinada. Cal observar que el Cloud Beacon està situat al mig de tota la zona on opera el sistema i la resta de dispositius s'ha situat de manera estratègica per tal de cobrir de la millor manera possible la resta de zona on opera al sistema. Així doncs amb aquest exemple ja es disposa d'una primera idea de com situar els dispositius i de com s'integren els uns amb els altres dins de la solució completa.

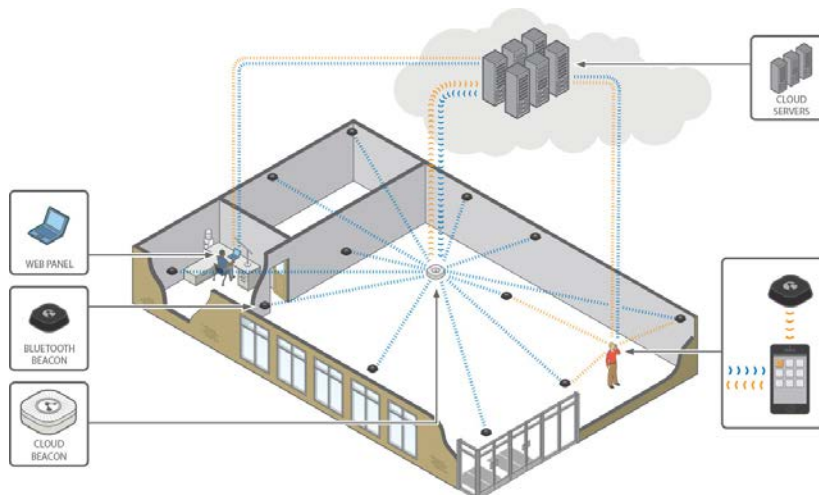


Figura 20: Exemple de distribució de dispositius a una localització

Font: [57]

4.3 Obtenció del dataset (*Mesures RSSI*)

Una part important d'aquest treball consisteix en l'obtenció d'un dataset de dades *Bluetooth Smart* per tal de poder avaluar amb posterioritat les seves característiques. Amb aquesta finalitat s'ha desenvolupat diferents aplicacions *Android*, mostrades a continuació, que permeten generar un fitxer de dades separades per comes “.csv” amb el contingut d'escanejar o rastrejar el missatges de radiodifusió o *broadcast*. Aquestes dades es poden processar amb posterioritat amb eines d'anàlisi com ara el software estadístic *R* o *Matlab* per tal d'extreure el comportament dels dispositius i del senyal *Bluetooth Smart* en els diferents escenaris i configuracions.

4.3.1 Aplicacions Android

4.3.1.1 Beacon Logger amb la *SDK d'Android*

Beacon Logger és una aplicació Android desenvolupada per capturar totes les dades enviades per als Beacons mitjançant la transmissió de missatges de radiodifusió o *broadcast* i així poder-les analitzar amb posterioritat amb altres eines. L'aplicació es basa en l'aplicació de mostra d'escaneig de dispositius *BLE* del portal de desenvolupadors d'Android. *Beacon Logger* permet escanejar l'entorn per descobrir dispositius *Bluetooth Smart* que estan transmeten missatges de radiodifusió o *broadcast* i els llista, mostrant el seu nom, l'adreça *MAC*, el *RSSI* i la distància. L'aplicació permet seleccionar quins Beacons es volen escanejar i el nombre de mesuraments que es volen obtenir de cadascun. A més permet configurar els valors del model utilitzat per a calcular la distància. Totes les dades obtingudes es guarden en un arxiu de valors separats per comes (CSV) per tal de poder ser processades i analitzades per altres programes.

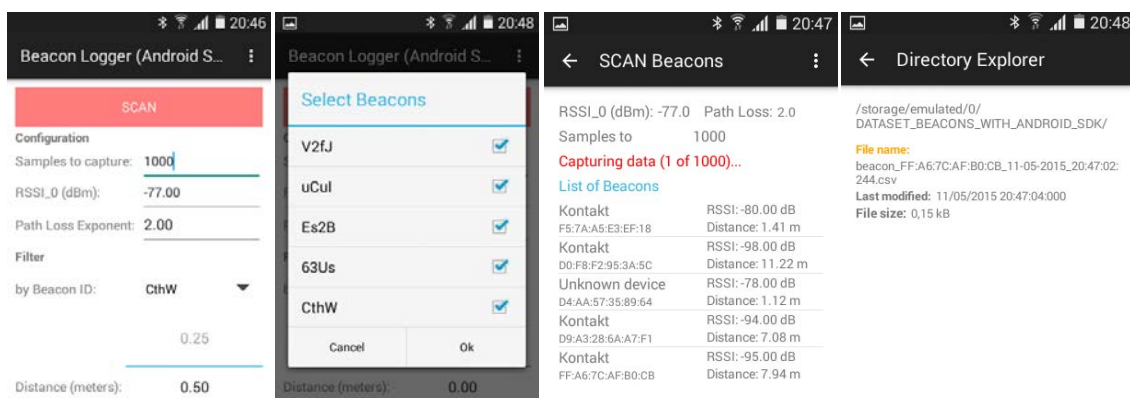


Figura 21: Interfícies d'usuari de Beacon Logger Android *SDK* i funcionalitats

A tall d'exemple a la Taula 5 es mostra l'estructura de l'arxiu separat per comes (CSV) capturat en un dels experiments per a un dispositiu determinat mitjançant l'aplicació Beacon Logger amb la *SDK d'Android*.

Device Name	Address	Distance	RSSI	TX Power	System timestamp	Distance of measurement
Kontakt	D0:F8:F2:95:3A:5C	0.40	-69.00	-77.00	28/04/2015 17:03:01:143	1.00
Kontakt	D0:F8:F2:95:3A:5C	0.35	-68.00	-77.00	28/04/2015 17:03:01:738	1.00
Kontakt	D0:F8:F2:95:3A:5C	0.40	-69.00	-77.00	28/04/2015 17:03:02:106	1.00
Kontakt	D0:F8:F2:95:3A:5C	0.56	-72.00	-77.00	28/04/2015 17:03:02:467	1.00

Taula 5: Format de l'arxiu de captura de dades, arxiu separat per comes (CSV)

Es pot observar que es disposa de 7 paràmetres: *Device Name*, que és el nom definit pel fabricant del dispositiu; *Address*, que és un codi que identifica el Beacon; *Distance*, que és la mesura de la distància obtinguda a l'aplicar el model log-distance amb els paràmetres definits a l'aplicació i a partir del valor de *RSSI* rebut; *RSSI*, que és l'indicador de potència de senyal rebut en el receptor en dBm; *TX Power*, que és la potència de transmissió utilitzada en el Beacon transmissor en dBm; *System timestamp*, que ens indica el moment en que es rep cada mostra i el *Distance of measurement*, que ens indica a quina distància s'ha capturat la mostra.

4.3.1.2 Beacon Logger amb la *SDK de Kontakt*

Aquesta aplicació presenta la mateixes funcionalitats que l'anterior però es basa en l'aplicació de mostra de *Kontakt* per *Android*. La idea d'utilitzar les dues aplicacions sorgeix de la necessitat de comprovar que la *SDK de Kontakt*, donat que està pensada per treballar exclusivament amb dispositius de *Kontakt* i que per tant coneix amb detall les característiques dels dispositius, no realitzi un tractament específic de les dades.

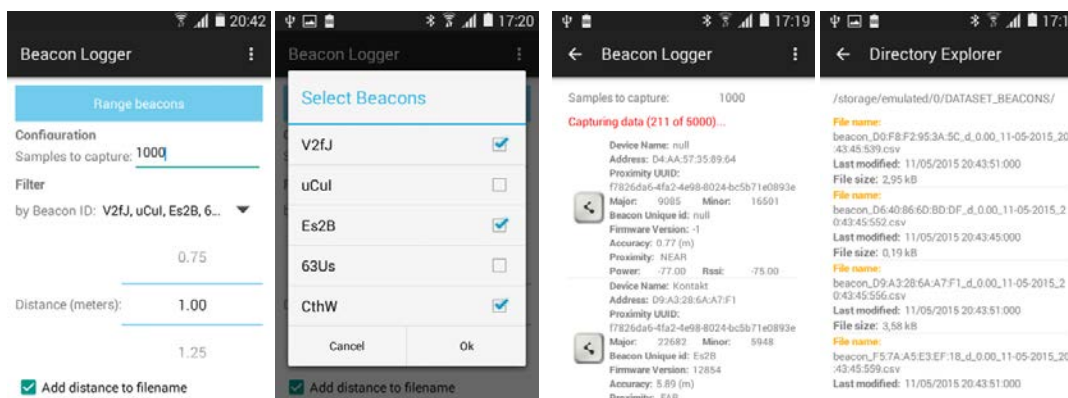


Figura 22: Interfícies d'usuari de Beacon Logger Kontakt *SDK* i funcionalitats

A tall d'exemple a la Taula 6 es mostra l'estructura de l'arxiu separat per comes (CSV) capturat en un dels experiments per a un dispositiu determinat mitjançant l'aplicació Beacon Logger amb la SDK de *Kontakt*.

Device Name	Address	Accuracy	Battery Level	Major	Minor	Rssi	TxPower
Kontakt	D0:F8:F2:95:3A:5C	0.29	100	54125	64809	-68.00	-77.00
Kontakt	D0:F8:F2:95:3A:5C	0.29	100	54125	64809	-68.00	-77.00
Kontakt	D0:F8:F2:95:3A:5C	0.29	100	54125	64809	-68.00	-77.00
Kontakt	D0:F8:F2:95:3A:5C	0.33	100	54125	64809	-69.00	-77.00

Firmware Version	Beacon Unique ID	Proximity UUID	Proximity
12854	V2fJ	f7826da6-4fa2-4e98-8024-bc5b71e0893e	IMMEDIATE
12854	V2fJ	f7826da6-4fa2-4e98-8024-bc5b71e0893e	IMMEDIATE
12854	V2fJ	f7826da6-4fa2-4e98-8024-bc5b71e0893e	IMMEDIATE
12854	V2fJ	f7826da6-4fa2-4e98-8024-bc5b71e0893e	IMMEDIATE

Beacon Timestamp Discovered	System timestamp	Distance of measurement
17/05/2015 17:20:48:570	17/05/2015 17:20:48:583	1.00
17/05/2015 17:20:48:570	17/05/2015 17:20:48:683	1.00
17/05/2015 17:20:48:570	17/05/2015 17:20:48:708	1.00
17/05/2015 17:20:48:570	17/05/2015 17:20:48:806	1.00

Taula 6: Format de l'arxiu de captura de dades, arxiu separat per comes (CSV)

Es pot observar que es disposa de 15 paràmetres: *Device Name*, que és el nom definit pel fabricant del dispositiu; *Address*, que és un codi que identifica el Beacon; *Accuracy*, que és la mesura de la distància obtinguda a l'aplicar el model de *Kontakt* a partir del valor de *RSSI* rebut; *Battery Level*, que indica el nivell de bateria del dispositiu en tant per cent; *Major* i *Minor*, identificadors definits prèviament; *RSSI*, que és l'indicador de potència de senyal rebut en el receptor en dBm; *TX Power*, que és la potència de transmissió utilitzada en el Beacon transmissor en dBm; *Firmware Version*, que és un indicador de la versió de programari instal·lada en el dispositiu; *Beacon Unique ID*, que és un codi que identifica el Beacon; *Proximity UUID*, identificador definit prèviament; *Proximity*, string que indica la proximitat entre Beacon i usuari (immediate, near, far); *Beacon Timestamp Discovered*, que ens indica el moment en que s'ha descobert el dispositiu; *System timestamp*, que ens indica el moment en que es rep cada mostra i el *Distance of measurement*, que ens indica a quina distància s'ha capturat la mostra.

Amb una primera comparació entre l'estructura presentada a la Taula 5 i la presentada a la Taula 6 s'observa que amb l'aplicació que fa ús de la SDK de *Kontakt* és possible

obtenir molta més informació dels dispositius. Tot i així cal remarcar que amb les dades que es poden recopilar amb l'aplicació que fa ús de la *SDK d'Android* ja hi ha prou informació per implantar un sistema de posicionament, ja que els paràmetres indispensables són: la mesura de *RSSI*, la potència de transmissió i l'adreça del dispositiu.

4.4 Mesura o estimació de la distància

Abans de veure les diferents implementacions dels mètodes de posicionament, donat que molts d'ells requereixen la mesura o estimació d'una distància per poder-se aplicar, cal mostrar com es pot obtenir una mesura o estimació d'aquesta distància a partir de la modelització de l'entorn de propagació.

Cal recordar que a *Bluetooth Smart* la manera de mesurar o estimar la distància entre els Beacons i l'usuari és mitjançant les mesures de *RSSI*, i que aquest està inclòs en tots els paquets de radiodifusió o *broadcats* de *Bluetooth Smart*. Per tant per a transformar la mesura de *RSSI* en una distància es poden utilitzar diferents models de pèrdues de propagació a fi d'obtenir una distància amb una bona exactitud. A més a l'utilitzar *Bluetooth Smart* es pot ajustar el interval de radiodifusió per variar el nombre de mostres de *RSSI* que s'utilitzen i la potència de transmissió per adaptar-se a l'entorn.

Com que el *RSSI* no és una altre cosa que un indicador de la potència del senyal rebut pel receptor cal tenir en compte que aquesta potència del senyal disminueix sobretot a causa de la variació de la distància, però també hi ha altres factors que afecten en major o menor mesura a la potència del senyal en funció de si els dispositius estan en condicions de línia de visió directa (Line Of Sight, LOS) o no. Aquesta pèrdua de potència o atenuació és coneix amb el nom de *Path Loss* i pot ser deguda a algun o alguns dels efectes següents:

- A les pèrdues de propagació en espai lliure (Free Space Loss): assumint condicions de línia de visió directe (LOS) entre el transmissor i el receptor, la pèrdua en espai lliure és la degradació del senyal a causa de la distància.
- Al esvaniment (*Fading*): és la variació del senyal rebut al llarg del temps i depèn de les condicions ambientals o de l'entorn de propagació i del moviment dels dispositius.
- Al multicamí (*Multipath*): que provoca que el senyal arribi diverses vegades i de diferent manera al dispositiu receptor a causa de reflexions, de la difracció i de

la dispersió i depèn de la distribució interior com ara els mobles, les parets, els objectes, entre altres.

- A la refracció: que és un canvi en la direcció d'una ona electromagnètica causada per canvis en el medi on viatgen els senyals.
- Al soroll i les interferències: que són senyals no desitjats en el mitjà de transmissió que distorsionen el senyal original. Es poden intentar evitar augmentant la potència de transmissió.

Així doncs es pot considerar que les principals atenuacions sofertes per una ona electromagnètica en un ambient interior es deuen a l'esvaniment i al multicamí i canvien en cada escenari, ja que depenen d'alguns factors com ara la distribució dels mobles, les interferències amb el cos humà o la ubicació de les parets.

Per tant, es pot dir que el *RSSI* és un procés aleatori i que les pèrdues de propagació s'han de modelar, ja sigui amb un model teòric o empíric. A més, en els casos en què no hi hagi visió directa, el mesurament de distància és més complicat i cal recórrer a algorismes de reconfiguració per obtenir unes bones estimacions de distància.

4.4.1 Models de pèrdues de propagació o *path loss*

En diversos treballs s'han abordat diferents models de propagació en interiors com ara el model *log-normal* [58], [59], [60] o el model de la *ITU* [61], [62] o transformacions d'aquets. Tot i així el model *log-normal*, anomenat també *log-distance*, és el que habitualment s'adopta per a realitzar la estimació o mesura de les distàncies ja que se sol ajustar força bé a les característiques de la propagació del senyal en interiors.

4.4.1.1 Model de pèrdues de propagació Log-distance

Aquest model es basa en el fet que el *RSSI* segueix una distribució log-normal amb la distància i es aplicable dins d'un edifici o en zones densament poblades. Així, el model de pèrdues de propagació s'expressa com:

$$PL(dB) = P_{TX}(dBm) - P_{RX}(dBm) = PL_0(dB) + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + Xg(dB) \quad (3)$$

On les pèrdues de propagació totals PL és la diferència entre la potència transmesa i la potència rebuda. I s'expressa en funció de les pèrdues de propagació PL_0 a una distància d_0 de referència. El fenomen de la propagació multicamí es representa per n , que és coneix com a *path loss exponent*. Mentre que Xg representa l'esvaniment que

pateix el senyal transmès i es correspon a una variable aleatòria normal amb mitjana zero.

Així doncs aplicant una transformació al model, aquest es pot expressar en funció del *RSSI* com:

$$RSSI = RSSI_0 - 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) - Xg \quad (4)$$

On $RSSI_0$ és la potència del senyal mesurat a una distància d_0 i $RSSI$ és l'indicador de potència rebuda.

Llavors a partir d'aquest model es pot obtenir la distància com:

$$d = d_0 \cdot 10^{\left(\frac{RSSI_0 - RSSI - Xg}{10 \cdot n} \right)} \quad (5)$$

El *path loss exponent* (n) varia en funció de l'entorn de propagació i de la freqüència utilitzada, però a la Taula 7 es mostren els valors més habituals per a determinats entorns.

Localització	N
Espai lliure	2
Àrea urbana	2.7 a 3.5
Dins d'una edificació amb visió directa	1.6 a 1.8
Dins d'una edificació sense visió directa	4 a 6
Oficina	2 a 3

Taula 7: Valors típics del path loss exponent (n)

4.4.1.2 Model de pèrdues de propagació definit per la ITU

Pel que fa al model de propagació en interiors recomanat per la *ITU* aquest ve definit per:

$$L = 20 \cdot \log_{10}(f) + N \cdot \log_{10}(d) + L_f(n) - 28 \quad (6)$$

On L es refereix a la pèrdua total de potència deguda al trajecte, f a la freqüència de transmissió en MHz, N al coeficient de pèrdues de potència (definit per la *ITU* en funció de l'entorn), d a la distància en metres, n al nombre de pisos entre transmissor i receptor i $L_f(n)$ al factor de la pèrdua degut a la penetració del terra i es calcula també mitjançant unes expressions definides per la *ITU*. Aquest model es aplicable per a

freqüències de 900 Mhz a 5.2 GHz i per a una a tres plantes. Els valors més habituals del coeficient de pèrdues de potència N es mostren a la Taula 8.

Freqüència	Oficina	Àrea comercial
1.8 GHz	30	22
2.4 GHz	30	-
5.2 GHz	31	-

Taula 8: Valors típics del coeficient de pèrdues de potència N

I els del factor de pèrdues per penetració $L_f(n)$ a la Taula 9.

Freqüència	Nombre de plantes	Oficina	Àrea comercial
1.8 GHz	N	$15+4(n-1)$	$6+3(n-1)$
2.4 GHz	-	14	-
5.2 GHz	-	16 (una planta)	-

Taula 9: Valors típics del factor de pèrdues per penetració $L_f(n)$

4.4.1.3 Model de pèrdues de propagació de Kontakt

La *SDK* de *Kontakt* per *Android* incorpora també un mètode propi per calcular la distància a partir del valor de *RSSI*. Aquest mètode s'anomena *getAccuracy()* i es troba a la classe *BeaconDevice* del paquet *com.kontakt.sdk.android.device* i calcula la distància seguint un model propi de pèrdues de propagació. El model es basa en diversos experiments empírics en localitzacions interiors on la distància s'obté a partir de l'ajust de la corba que defineix el model de propagació.

```
protected static double getAccuracy(int txPower, double rssi) {
    if (rssi == 0) {return -1.0; // if we cannot determine accuracy, return -1.}
    double ratio = rssi*1.0/txPower;
    if (ratio < 1.0) { return Math.pow(ratio,10);}
    else {
        double accuracy = (0.89976)*Math.pow(ratio,7.7095) + 0.111;
        return accuracy;
    }
}
```

Taula 10: Model de pèrdues de propagació de Kontakt

De totes maneres la veritat és que el valor de *RSSI* fluctua ràpidament amb el temps i això fa que sigui difícil calcular la distància amb una alta exactitud, però pot ser una bona estimació que es pot millorar mitjançant altres tècniques de posicionament. A més cal recordar que com més gran sigui la potència de transmissió més gran és l'abast del sistema i la seva exactitud millora. D'altra banda, com més petit és el interval de transmissió, el *RSSI* serà més estable i la precisió serà millor. Així, tot i que el *RSSI* no és el paràmetre ideal per al posicionament, degut a la seva variabilitat, hi ha nombroses solucions comercials que en fan ús i presenten un bon rendiment i exactitud. Per tant amb una correcta modelització es possible obtenir les mesures de distància per un sistema de posicionament en interiors.

4.5 Algorismes de posicionament

Un altre part important d'aquest projecte consisteix en l'avaluació i implementació de diferents mètodes de posicionament a partir de les dades proporcionades pel senyal *Bluetooth Smart*.

4.5.1 Trilateration

Com ja s'ha vist un dels mètodes per a determinar la posició de l'usuari o objectiu és la trilateració, però abans de poder aplicar aquest mètode es necessari mesurar o estimar la distància entre els Beacons, que es troben en una posició coneguda, i el dispositiu de l'usuari, mitjançant l'aplicació d'algun dels models presentats amb anterioritat.

Llavors aquest mètode a partir de la mesura o estimació de les distàncies des del almenys tres punts de referències forma cercles o esferes, en funció de si es treballa en el pla o en l'espai, i la intersecció d'aquests tres dóna la ubicació de l'usuari. Hi ha diversos mètodes matemàtics per a resoldre les equacions de trilateració o intersecció. Però el primer pas és linealitzar les equacions dels cercles o esferes que tenen com a radi la distància entre un punt de referència i el receptor. Així doncs la distància entre emissor i receptor ve donada per:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = r_i^2 \quad (7)$$

On (x, y, z) és la posició objectiu, (x_i, y_i, z_i) és la posició on es troba el Beacon i i r_i és la distància entre la posició objectiu i el Beacon i . Llavors com es disposa de més d'un punt de referència es pot formular un sistema de la forma:

$$A \cdot x = b \quad (8)$$

On

$$A = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n - x_1 & y_n - y_1 & z_n - z_1 \end{pmatrix}; \quad x = \begin{pmatrix} x - x_1 \\ y - y_1 \\ z - z_1 \end{pmatrix}; \quad b = \begin{pmatrix} b_{21} \\ b_{31} \\ \dots \\ b_{n1} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$b_{n1} = \frac{1}{2}(r_i^2 - r_n^2 + d_{n1}^2) \quad (10)$$

on d_{n1} és la distància entre el beacon n i el beacon 1 i r_i és la distància entre la posició objectiu i el Beacon i .

Malauradament aquesta resolució no presenta una bona exactitud en el càlcul de la posició i cal recórrer a altres mètodes matemàtics, presentats a continuació, per resoldre el sistema de trilateració amb millors resultats. Encara que aquests mètodes de trilateració necessiten un mínim de 4 Beacons per a treballar en l'espai i 3 Beacons per a treballar en el pla.

4.5.1.1 Mètodes matemàtics per a la resolució de la trilateració

Els mètodes matemàtics analitzats i implementats en aquest projecte són el mètode de mínims quadrats lineal (Linear Least Squares, LSQ), el mètode de mínims quadrats no lineals (Non Linear Least Squares NLS), el mètode del centroide i el mètode de la intersecció de cercles. Aquests mètodes són els que s'utilitzaran per al posicionament en la secció d'avaluació.

Mètode de mínims quadrats lineal

Aquest mètode consisteix a minimitzar la suma dels quadrats dels errors residuals del sistema lineal. La funció a minimitzar és:

$$S = (b - A \cdot x)^T (b - A \cdot x) \quad (11)$$

Que té la següent solució:

$$x = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot b \quad (12)$$

On $A^T \cdot A$ determina si el mètode és òptim per al posicionament o no. Si $A^T \cdot A$ és no singular i ven condicionada, es pot utilitzar la solució presentada a (12). Si $A^T \cdot A$ és singular i mal condicionada cal realitzar una descomposició del valor singular (SVD) i s'utilitza la solució següent:

$$x = A' \cdot b \quad (13)$$

On A' és la pseudo inversa d' A .

Aquest mètode és àmpliament utilitzat en els sistemes de posicionament basats en trilateració. A més l'exactitud d'aquesta es pot millorar mitjançant una matriu de ponderació W .

A la Taula 11 es mostra una implementació particular d'aquest mètode en una funció escrita en R , per operar en els escenaris utilitzats en aquest treball. En aquesta implementació es fan servir tres Beacons (tres posicions conegudes, $[b_n_x, b_n_y]$, i tres estimacions de distància $[p1, p2, p3]$), ja que aquest s'ha implementat per al posicionament en dues dimensions. Al tractar-se de posicionament en dues dimensions el nombre mínim de dispositius per poder determinar la posició és tres, i per tant s'ha implementat aquest cas. Alhora això permet minimitzar el nombre de dispositius necessaris i es pot dir que és el pitjor cas alhora de calcular la posició, ja que amb més dispositius es possible obtenir més estimacions de distància i així millorar el càlcul de la posició.

```
calculate_Position_LSQ <- function(b1x, b1y, b2x, b2y, b3x, b3y, p1, p2, p3){

  # Calculem la distància entre beacons
  d12 = sqrt((b2x-b1x)^2+(b2y-b1y)^2)
  d13 = sqrt((b3x-b1x)^2+(b3y-b1y)^2)

  B <- matrix(c(1/2*(p1^2-p2^2+d12^2), 1/2*(p1^2-p3^2+d13^2)),nrow = 2, ncol = 1, byrow=TRUE)
  A <- matrix(c(b2x-b1x, b2y-b1y, b3x-b1x, b3y-b1y),nrow = 2, ncol = 2, byrow=TRUE)

  # Càlcul de la posició (xu,yu) mitjançant el mètode lineal de mínims quadrats
  if(det(crossprod(A,A)) != 0){
    sol_lsq = (solve(crossprod(A,A))) %*% (crossprod(A,B))
  }

  sol = c(sol_lsq[1]+b1x, sol_lsq[2]+b1y)

  sol
}
```

Taula 11: Funció en R resolució posició mètode de mínims quadrats lineal.

Mètode de mínims quadrats Nolineal

Aquest mètode consisteix en minimitzar la suma dels quadrats dels errors. Així doncs, la funció a minimitzar és l'error quadrat de les distàncies

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^n (\hat{r}_i - r_i)^2 = \sum_{i=1}^n f_i(x, y, z)^2 \quad (14)$$

On

$$f_i(x, y, z) = \hat{r}_i - r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - r_i \quad (15)$$

A la Taula 12 es mostra una implementació particular d'aquest mètode en una funció escrita en R, per treballar en els escenaris definits en aquest treball. De nou en aquesta implementació es fan servir tres Beacons (tres posicions conegudes, $[b_n_x, b_n_y]$, i tres estimacions de distància $[r1, r2, r3]$), ja que s'ha implementat aquest mètode per al posicionament en dues dimensions.

```
calculate_Position_NLSQ <- function(b1x, b1y, b2x, b2y, b3x, b3y, r1, r2, r3){
  start_point <- c(0, 0);

  fun <- function(point) (sqrt((point[1]-b1x)^2+(point[2]-b1y)^2)-r1)^2 + (sqrt((point[1]-b2x)^2
+ (point[2]-b2y)^2)-r2)^2 + (sqrt((point[1]-b3x)^2 + (point[2]-b3y)^2)-r3)^2;

  sol <- optim(start_point, fun);

  sol$par;
}
```

Taula 12: Funció en R resolució posició mètode de mínims quadrats nolineal.

Mètode del centroide

Aquest mètode consisteix en calcular el centre geomètric o centroide d'un polígon definit per diversos punts. El valor mitjà dels vèrtex del polígon són les coordenades del centroide i es correspon amb la posició de l'usuari. Per aplicar aquest mètode en primer lloc cal determinar la regió on es troba l'usuari i, a continuació, calcular el centroide d'aquesta regió. Per exemple a la Figura 23, els valors de *RSSI* mesurats des del nodes de referència fins al receptor donen lloc a quatre distàncies. Llavors es poden extreure quatre arcs a partir d'aquestes distàncies i es poden obtenir quatre

punts d'intersecció A, B, C i D. Aquest quatre punts defineixen un polígon amb les següents coordenades $A(x_1, y_1), B(x_2, y_2), C(x_3, y_3), D(x_4, y_4)$ i les coordenades de l'usuari són (x, y) que es corresponen amb el centroid del polígon, que ve donat per:

$$(x, y) = \left(\frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4}, \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} \right) \quad (16)$$

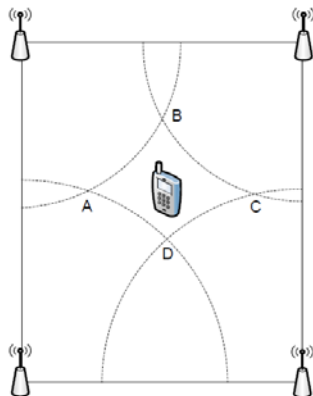


Figura 23: Exemple de posicionament mitjançant el mètode del centroid
Font: [60]

A la Taula 13 es mostra una implementació particular d'aquest mètode en una funció escrita en R, per treballar en els escenaris definits en aquest treball. En aquesta implementació es fan servir quatre Beacons (quatre posicions conegudes, $[b_n_x, b_n_y]$). Tot i que en aquest cas de el nombre de dispositius mínim per calcular una posició també és de tres (ja que és el nombre mínim de vèrtexs per obtenir un polígon, i calcular el seu centroid), s'han utilitzat quatre punts perquè això permet definir millor les regions dins la vivenda (cada rectangle format pels quatre vèrtexs defineix una zona de la vivenda).

```
# Resolució de la posició mitjançant Centroid Positioning

# Definim les coordenades dels quatre punts definits per la intersecció de quatre arcs
b1x = 1.66; b1y = 3.13;
b2x = 1.14; b2y = 2.78;
b3x = 2.52; b3y = 1.63;
b4x = 3.30; b4y = 2.08;

# Càlcul de la posició (xu,yu) mitjançant el càlcul del centroid del polígon
sol = c((b1x+b2x+b3x+b4x)/4, (b1y+b2y+b3y+b4y)/4)
```

Taula 13: Funció en R resolució posició mètode centroid

Mètode de la intersecció de cercles

Aquest mètode consisteix en calcular la intersecció de diferents cercles. A partir de les distàncies obtingudes de la mesura de *RSSI* per a cada Beacon, es pot formular un sistema d'equacions com el següent:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = r_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = r_3^2 \end{cases} \quad (17)$$

Desenvolupant cada equació del sistema i restant a l'equació 1 la 2 i a la 2 l'equació 3 és possible obtenir un sistema de la forma:

$$\begin{cases} Ax + By = C \\ Dx + Ey = F \end{cases} \quad (18)$$

On:

$$A = (-2x_1 + 2x_2), \quad B = (-2y_1 + 2y_2), \quad C = r_1^2 - r_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2$$

$$D = (-2x_2 + 2x_3), \quad B = (-2y_2 + 2y_3), \quad C = r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2$$

Resolent el sistema anterior es possible trobar la posició de l'usuari com:

$$x = \frac{CD - FA}{BD - EA}, \quad y = \frac{AE - DB}{CE - FB} \quad (19)$$

A la Taula 14 es mostra una implementació particular d'aquest mètode en una funció escrita en *R*, per treballar en els escenaris descrits en aquest treball. En aquest cas també es fan servir tres Beacons (tres posicions conegudes, $[b_n_x, b_n_y]$), i tres estimacions de distància $[r1, r2, r3]$, ja que s'ha implementat aquest mètode per al posicionament en dues dimensions.

```
calculate_Position_IntersectionsCircles <- function(b1x, b1y, b2x, b2y, b3x, b3y, r1, r2, r3){
  A <- rbind(c((-2*b1x + 2*b2x), (-2*b1y + 2*b2y)), c((-2*b2x + 2*b3x), (-2*b2y + 2*b3y)))
  B <- c((r1^2-r2^2-b1x^2+b2x^2-b1y^2+b2y^2), (r2^2-r3^2-b2x^2+b3x^2-b2y^2+b3y^2))
  sol = solve(A, B)
  sol
}
```

Taula 14: Funció en *R* resolució posició mètode intersecció cercles

Diferents treballs [60], [63], [42] han estudiat el rendiment d'aquestes mètodes de resolució i tots ells conclouen que en la majoria d'entorns el que millors resultats ofereix és el de mínims quadrats lineal (LSQ), i a més és més simple d'implementar i requereix un cost computacional menor. Per això en aquest treball es farà principalment ús d'aquest mètode. A més cal recordar que la part crítica del posicionament mitjançant trilateració no és la resolució d'aquest sistema sobredeterminat sinó que la precisió i exactitud d'aquesta metodologia de posicionament ve determinada per una bona mesura o estimació de la distància entre l'usuari o objectiu i els punts de referència.

4.5.2 Fingerprinting

En aquest treball també s'ha volgut avaluar el rendiment del mètode de posicionament basat en el *fingerprinting*. Però donades les limitacions temporals del projecte s'ha optat per fer ús d'una aplicació comercial anomenada *Indoo.rs* [43], enlloc de desenvolupar des de zero totes les funcionalitats necessàries per implementar una solució de posicionament basada en *fingerprinting*. *Indoo.rs* és una solució comercial per al posicionament en interiors mitjançant dispositius *BLE* i/o *WiFi*. La companyia ofereix una solució de programari anomenada "*Measurement Tool*" que permet definir les característiques de l'edifici on es realitzarà la localització, i capturar les empremtes digitals (*fingerprints*) al llarg de tot l'edifici. A més permet afegir informació addicional com parets, zones o departaments i rutes amb la finalitat de millorar l'exactitud i la precisió del sistema. Al seu torn ofereix una *SDK* per tal d'implementar aplicacions que facin ús de les dades capturades amb la seva aplicació.

4.5.3 Proximity

També s'ha volgut avaluar el rendiment del mètode de posicionament basat en la *proximitat*. En aquest cas tampoc s'ha desenvolupat des de zero aquesta funcionalitat sinó que s'ha fet ús dels serveis oferts per *Kontakt*. Tal i com ja s'ha vist a *Bluetooth Smart* existeix el "*Proximity Profile*" i els Beacons de *Kontakt* l'implementen. Això permet definir tres regions o zones de detecció: *immediate* (uns pocs centímetres), *near* (uns pocs metres) i *far* (diversos metres) i assignar a cadascuna una acció. Tot i que no proporciona la localització específica de l'usuari pot ser útil per a proporcionar-li informació en funció de la regió o zona on es troba.

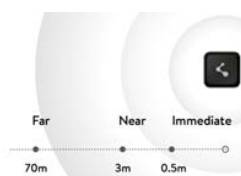


Figura 24: Regions o zones de proximitat al protocol de Kontakt

5. Avaluació dels resultats de posicionament

En aquesta capítol es presenten i discuteixen els resultats dels diversos experiments duts a terme durant el desenvolupament d'aquest projecte. Les mesures i els experiments s'han realitzat amb un telèfon *Samsung Galaxy Young 2* i un *Ipad de quarta generació* en els diferents escenaris definits prèviament. Les mesures del senyal *Bluetooth* s'han obtingut amb les aplicacions descrites anteriorment i el tractament de les dades s'ha realitzat principalment amb el software estadístic *R*.

5.1 Anàlisis previ del senyal Bluetooth Smart

D'ara en endavant a no ser que s'indiqui el contrari totes les mesures s'han realitzat amb una potència de transmissió de -12 dBm ($RSSI_0 = -77 \text{ dBm}$) i un interval de transmissió de 350 ms , que són els valors per defecte indicats per el fabricant dels dispositius. D'altra banda en els diferents escenaris s'han pres 1000 mostres per cada Beacon i per cada posició i per cada experiment, amb la finalitat de disposar de prou mostres per realitzar diferents anàlisis. En aquest punt és important destacar que per a un sistema de posicionament mitjançant *Bluetooth Smart*, donat que la velocitat mitjana d'una persona és vora 1 m/s , és disposa aproximadament d'un segon per adquirir les dades i calcular la posició. Així doncs recordant el interval de radiodifusió o transmissió que és variable entre 20 ms i 350 ms per un bon rendiment, vol dir que en un segon es disposarà d'entre 50 mostres i 3 mostres , en funció del interval per a determinar la posició de l'usuari. Per tant alhora d'avaluar el comportament del senyal *Bluetooth Smart* mitjançant l'anàlisi i el tractament de les dades serà necessari tindre en consideració aquesta limitació en el nombre màxim de mostres disponibles per tal de proporcionar un bona experiència d'usuari en una aplicació real de la solució proposada.

A continuació es mostren les diferents proves realitzades en el transcurs d'aquest treball des de l'anàlisi més bàsic de les característiques del senyal *Bluetooth*, en concret la caracterització de les mesures del *RSSI* i la seva variació en variar la distància o al llarg del temps, fins als resultats d'aplicar els diferents mètodes de posicionament.

La primera prova ha consistit en avaluar el comportament dels valors de *RSSI* mesurats a 1 metre de distància, per a cada Beacon. Tal i com es mostra a la Figura 25, els valors estan força concentrats tot i que presenten una certa variabilitat i en

funció del dispositiu s'allunyen uns 7 dBm del valor, indicat per el fabricant, de $RSSI$ mesurat a un metre que és de -77 dBm per a una $P_{TX} = -12$ dBm.

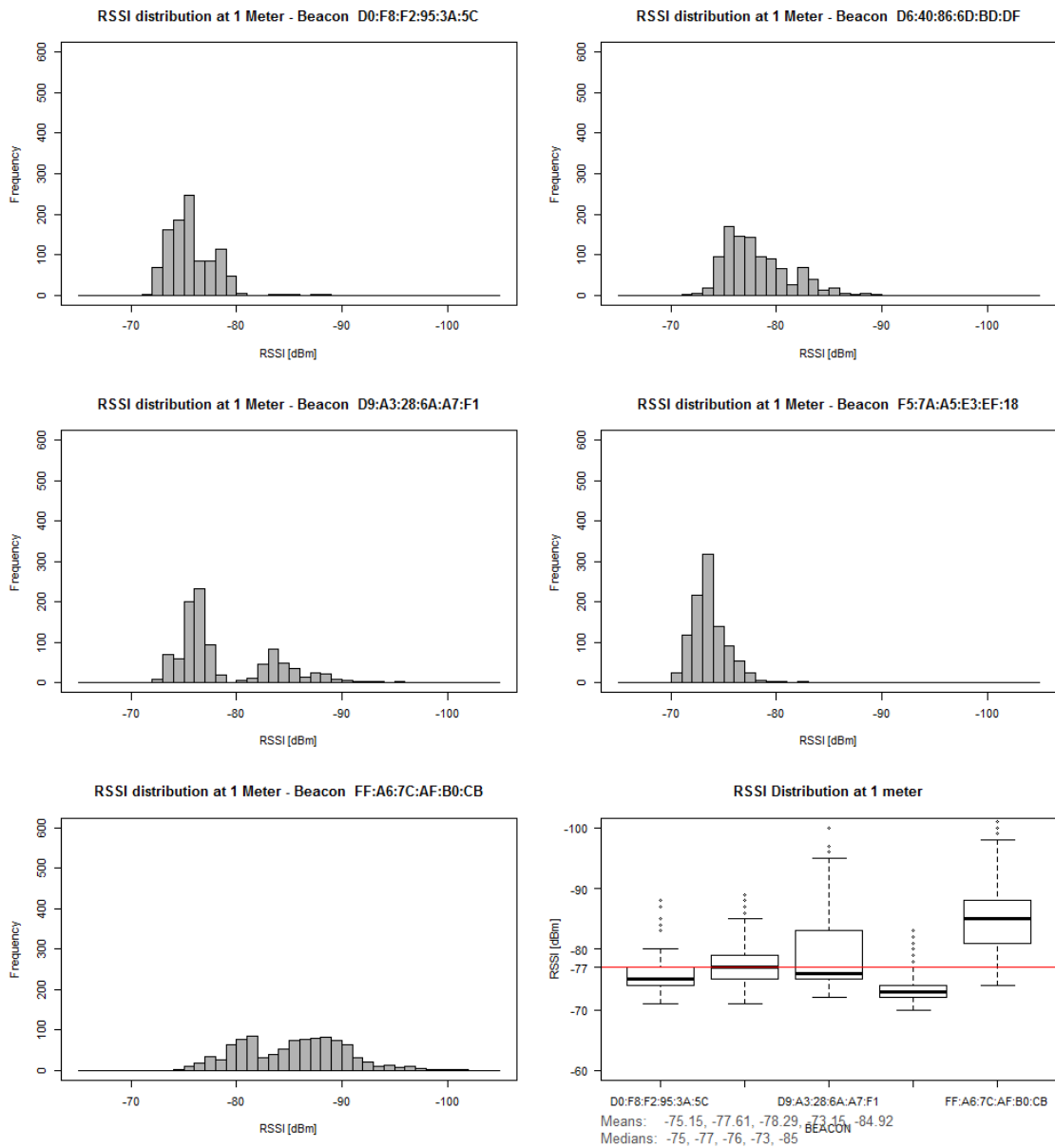


Figura 25: Distribució RSSI a 1 metre de distància – Beacons tots, a l'escenari 1

Si es recorda el model de pèrdues de propagació, en ell s'utilitza com a paràmetre la mesura del $RSSI$ a una distància coneguda. Per facilitar aquest valor sol ser el $RSSI$ mesurat a un metre, ja que així la distància de referència és un metre. Per tant és necessari caracteritzar correctament el valor de $RSSI$ mesurat a un metre. Amb aquesta finalitat s'ha procedit a realitzar diverses iteracions de mesura dels valors de $RSSI$ a un metre i s'ha realitzat la mitjana, els resultats es mostren a la Taula 15, on s'aprecia que el valor aportat pel fabricant difereix, és més proper als -70 dBm que no pas als -77 dBm proposat per aquest.

	D0:F8:F2:95:3A:5C	D6:40:86:6D:BD:DF	D9:A3:28:6A:A7:F1	F5:7A:A5:E3:EF:18	FF:A6:7C:AF:B0:CB
It. 1	-75.146	-77.610	-78.287	-73.149	-84.924
It. 2	-69.520	-74.991	-75.734	-69.749	-71.231
It. 3	-70.567	-70.439	-70.770	-68.653	-68.417
It. 4	-67.828	-63.582	-66.577	-64.741	-68.293
It. 5	-67.864	-63.556	-66.508	-64.890	-68.303
It. 6	-67.626	-63.710	-66.496	-64.720	-68.050
Promig	-69.76	-68.98	-70.73	-67.65	-71.54

Taula 15: Promig RSSI a 1 metre – Beacons tots i diverses iteracions, a l'escenari 1

També s'ha avaluat la variació del valor de *RSSI* mesurat al llarg del temps per a una distància fixa d'un metre. El resultat es pot veure a la Figura 26, on s'observa que el *RSSI* no es manté constant, sinò que oscil·la entre -60 dBm i -68 dBm i presenta un valor promig de -63.77 dBm i una mitjana de 64 dBm .

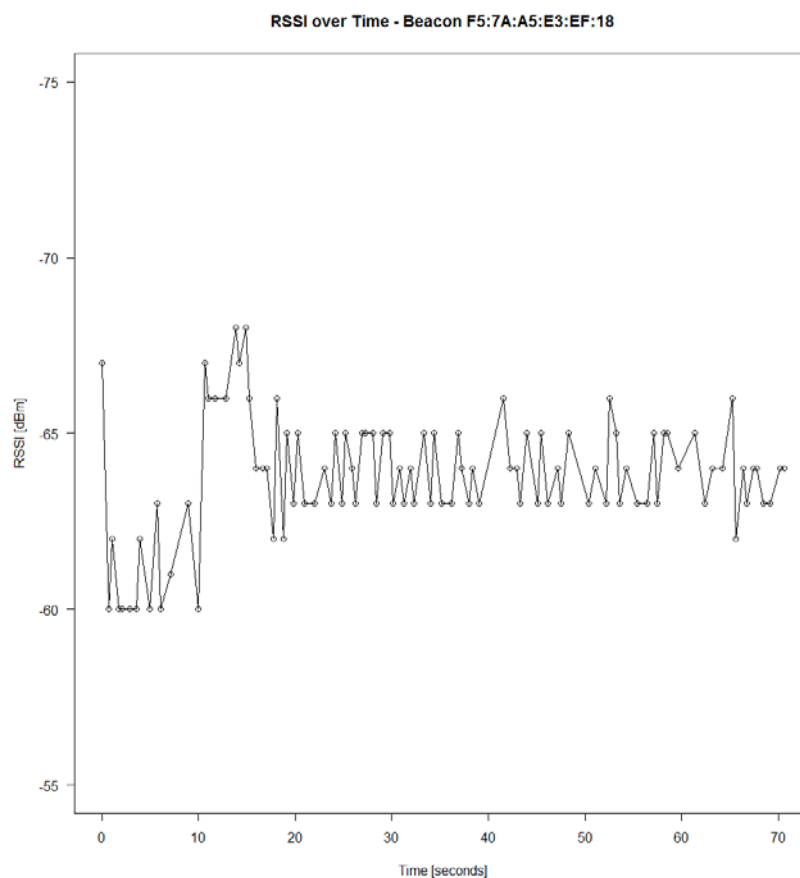


Figura 26: Variació RSSI al llarg del temps per un Beacon, a l'escenari 1

Un altre de les proves realitzades ha consistit en avaluar la fluctuació dels valors de *RSSI* al incrementar la distància. Com és d'esperar al incrementar la distància el valor de *RSSI* mesurat tendeix a decreïxer, degut al esvaniment del senyal. Tot i així cal apreciar que a determinades distàncies el valor de *RSSI* s'incrementa una mica, aquest és un efecte molt comú a la radiofreqüència i té a veure amb l'efecte multicamí del senyal.

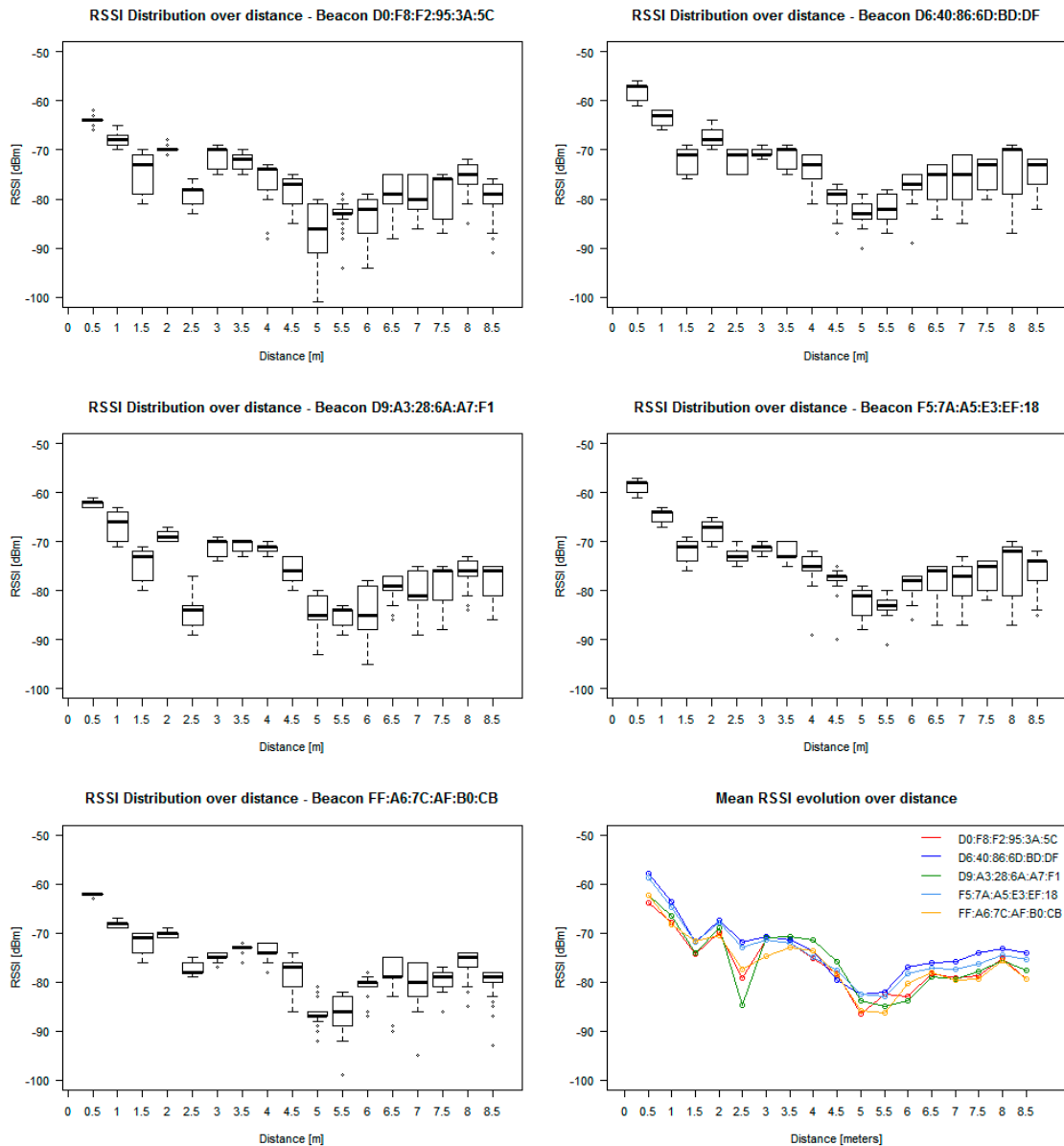


Figura 27: Distribució RSSI - Beacons tots de 0.5 metres a 8.5 metres, a l'escenari 2

5.2 Avaluació del model de pèrdues de propagació

El següent pas ha consistit en avaluar com afecten els paràmetres n , $path\ loss\ exponent$ i Xg del model de pèrdues de propagació *log-distance* en l'estimació de la distància. Per això s'ha procedit a determinar aquest paràmetres a partir de l'ajust de la corba que defineix el model de propagació a un conjunt de dades donat, procés conegut amb el nom de *curve fitting*. Tot seguit amb els paràmetres obtinguts s'ha procedit a calcular la distància entre receptor i emissor en un segon conjunt de dades en el mateix escenari. De tal manera que s'ha pogut determinar que amb una bona caracterització d'aquest dos paràmetres és possible assolir, en condicions de visió directa, un error mig en el càlcul de la distància comprès aproximadament entre 1 i 3 metres.

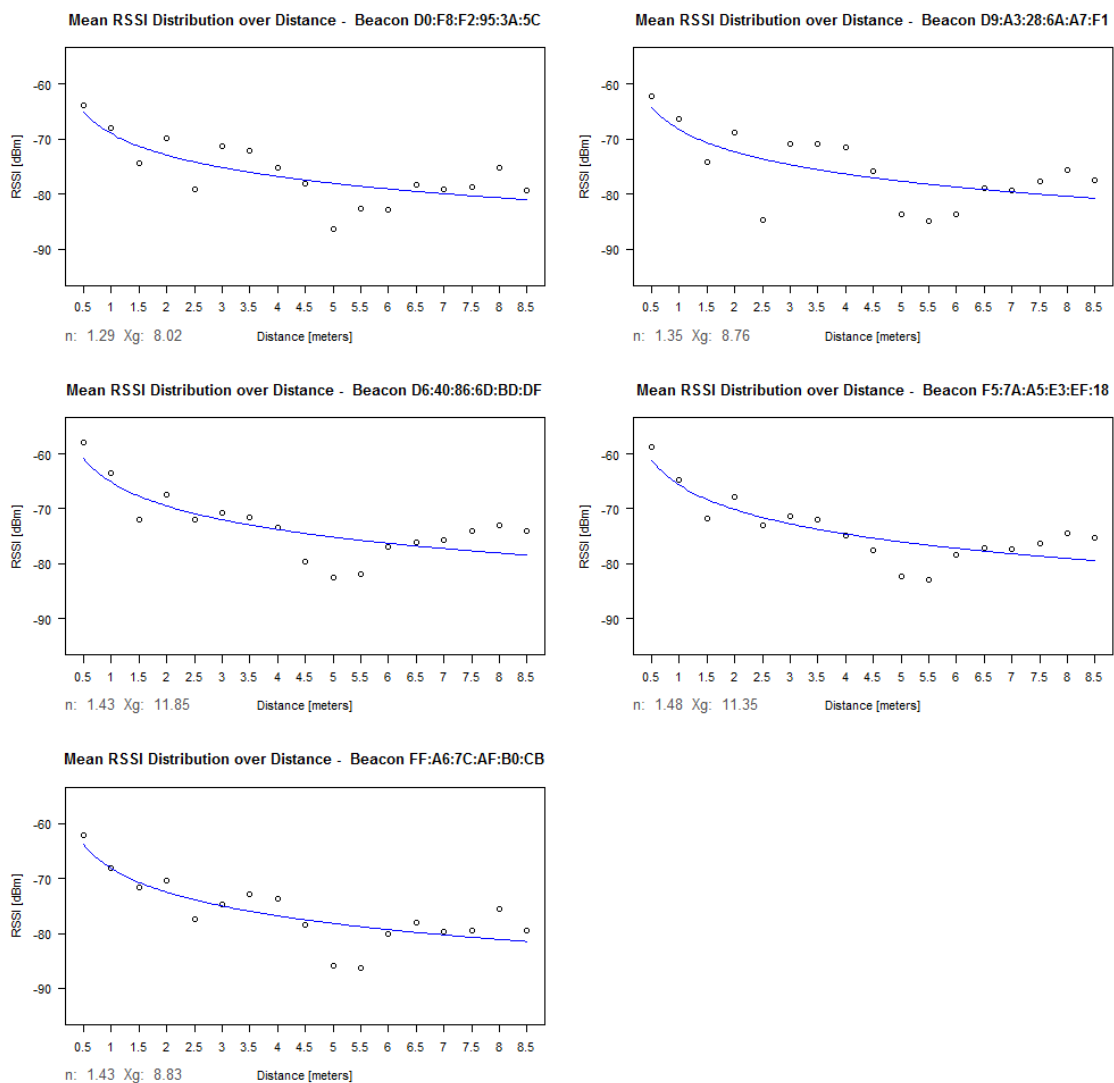


Figura 28: Modelització model pèrdues propagació – Beacons tots, a l'escenari 2

5.2.1 Model de propagació per al Beacon D0:F8:F2:95:3A:5C a l'escenari 2

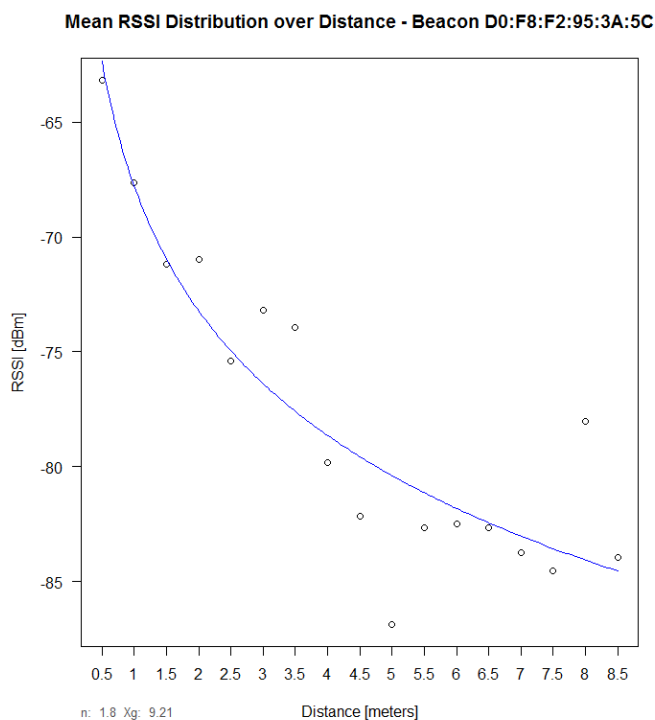


Figura 29: Modelització model propagació - Beacon D0:F8:F2:95:3A:5C, a l'escenari 2

Distància real	Iteració 1		Iteració 2		Iteració 3	
	Distància calculada	Error	Distància calculada	Error	Distància calculada	Error
0.50	0.55	-0.05	0.56	-0.06	0.54	-0.04
1.00	0.98	0.02	0.97	0.03	0.99	0.01
1.50	1.55	-0.05	1.45	0.05	1.50	0.00
2.00	1.51	0.49	1.52	0.48	1.55	0.45
2.50	2.65	-0.15	2.53	-0.03	2.57	-0.07
3.00	1.99	1.01	2.02	0.98	1.98	1.02
3.50	2.20	1.30	2.28	1.22	2.10	1.40
4.00	4.65	-0.65	4.35	-0.35	4.27	-0.27
4.50	6.29	-1.79	5.03	-0.53	4.97	-0.47
5.00	11.47	-6.47	10.73	-5.73	10.06	-5.06
5.50	6.68	-1.18	5.36	0.14	6.42	-0.92
6.00	6.56	-0.56	5.35	0.65	5.75	0.25
6.50	6.68	-0.18	3.78	2.72	3.88	2.62
7.00	7.69	-0.69	4.98	2.02	4.26	2.74
7.50	8.50	-1.00	5.52	1.98	5.16	2.34
8.00	3.70	4.30	3.01	4.99	2.63	5.37
8.50	7.91	0.59	5.97	2.53	5.63	2.87
	Error mig	1.20	Error mig	1.44	Error mig	1.52

Taula 16: Resultats estimació distància - Beacon D0:F8:F2:95:3A:5C, a l'escenari 2

5.2.2 Model de propagació per al Beacon D6:40:86:6D:BD:DF a l'escenari 2

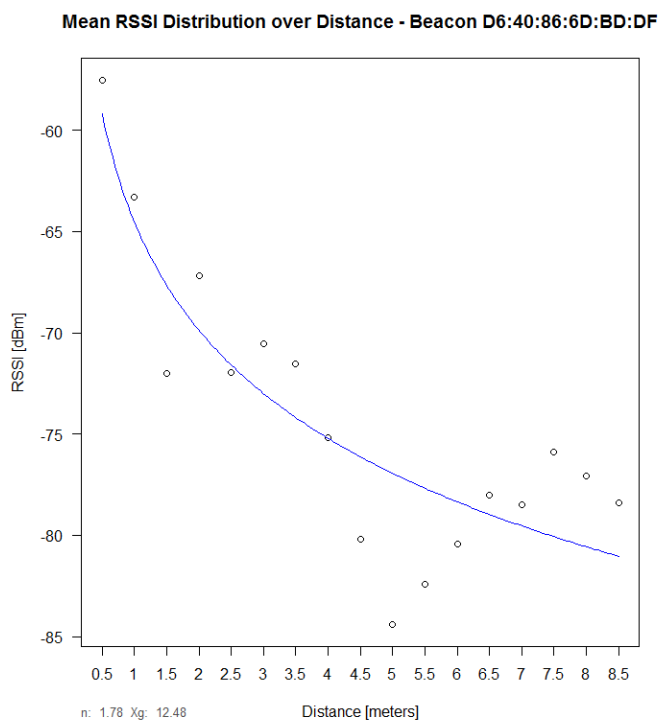


Figura 30: Modelització model propagació - Beacon D6:40:86:6D:BD:DF, a l'escenari 2

Distància real	Iteració 1		Iteració 2		Iteració 3	
	Distància Calculada	Error	Distància calculada	Error	Distància calculada	Error
0.50	0.40	0.10	0.43	0.07	0.40	0.10
1.00	0.86	0.14	0.82	0.18	0.87	0.13
1.50	2.64	-1.14	2.48	-0.98	2.77	-1.27
2.00	1.41	0.59	1.50	0.50	1.52	0.48
2.50	2.61	-0.11	2.74	-0.24	2.92	-0.42
3.00	2.17	0.83	2.17	0.83	2.28	0.72
3.50	2.48	1.02	2.28	1.22	2.66	0.84
4.00	3.96	0.04	2.85	1.15	2.95	1.05
4.50	7.60	-3.10	7.13	-2.63	6.73	-2.23
5.00	13.09	-8.09	9.74	-4.74	9.40	-4.40
5.50	10.13	-4.63	9.47	-3.97	8.67	-3.17
6.00	7.82	-1.82	4.87	1.13	4.70	1.30
6.50	5.72	0.78	4.19	2.31	3.82	2.68
7.00	6.10	0.90	4.76	2.24	4.13	2.87
7.50	4.35	3.15	3.25	4.25	3.45	4.05
8.00	5.06	2.94	3.53	4.47	3.16	4.84
8.50	6.02	2.48	3.25	5.25	2.85	5.65
	Error mig	1.87	Error mig	2.13	Error mig	2.13

Taula 17: Resultats estimació distància - Beacon D6:40:86:6D:BD:DF, a l'escenari 2

5.2.3 Model de propagació per al Beacon D9:A3:28:6A:A7:F1 a l'escenari 2

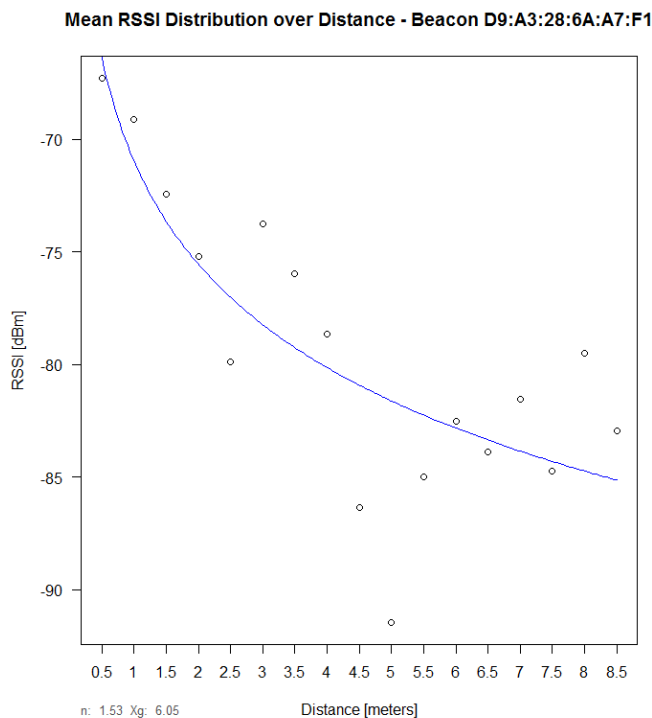


Figura 31: Modelització model propagació - Beacon D9:A3:28:6A:A7:F1, a l'escenari 2

Distància real	Iteració 1		Iteració 2		Iteració 3	
	Distància calculada	Error	Distància calculada	Error	Distància calculada	Error
0.50	0.45	0.05	0.45	0.05	0.46	0.04
1.00	0.87	0.13	0.90	0.10	0.80	0.20
1.50	2.47	-0.97	2.36	-0.86	2.31	-0.81
2.00	1.19	0.81	1.21	0.79	1.18	0.82
2.50	8.57	-6.07	10.88	-8.38	9.58	-7.08
3.00	1.60	1.40	1.54	1.46	1.42	1.58
3.50	1.64	1.86	1.63	1.87	1.55	1.95
4.00	1.88	2.12	1.73	2.27	1.65	2.35
4.50	3.82	0.68	3.43	1.07	3.17	1.33
5.00	10.94	-5.94	11.22	-6.22	10.88	-5.88
5.50	12.50	-7.00	10.67	-5.17	10.70	-5.20
6.00	10.70	-4.70	9.71	-3.71	7.63	-1.63
6.50	6.73	-0.23	4.48	2.02	4.71	1.79
7.00	7.26	-0.26	5.06	1.94	4.03	2.97
7.50	5.38	2.12	4.41	3.09	4.23	3.27
8.00	4.88	3.12	3.11	4.89	2.78	5.22
8.50	7.18	1.32	3.62	4.88	3.46	5.04
	Error mig	2.28	Error mig	2.87	Error mig	2.78

Taula 18: Resultats estimació distància - Beacon D9:A3:28:6A:A7:F1, a l'escenari 2

5.2.4 Model de propagació per al Beacon F5:7A:A5:E3:EF:18 a l'escenari 2

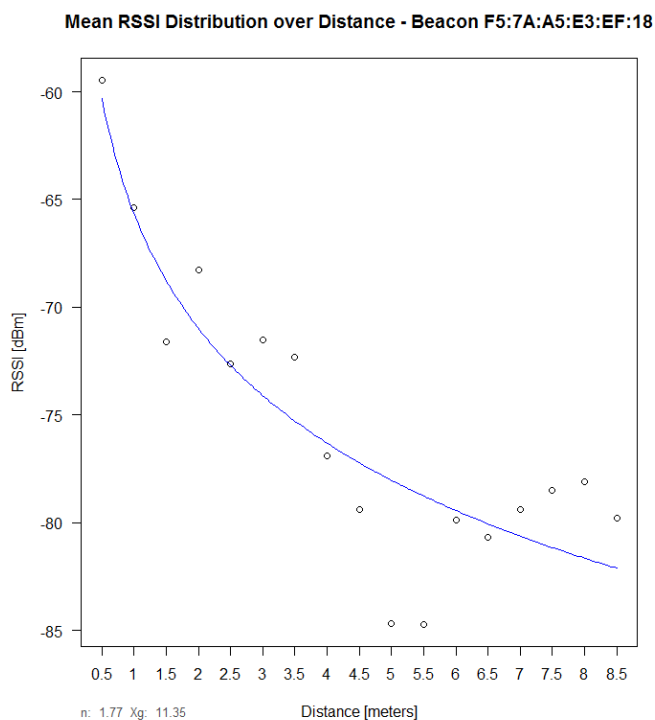


Figura 32: Modelització model propagació - Beacon F5:7A:A5:E3:EF:18, a l'escenari 2

Distància real	Iteració 1		Iteració 2		Iteració 3	
	Distància calculada	Error	Distància calculada	Error	Distància calculada	Error
0.50	0.45	0.05	0.43	0.07	0.38	0.12
1.00	0.96	0.04	0.90	0.10	0.88	0.12
1.50	2.17	-0.67	2.30	-0.80	2.13	-0.63
2.00	1.40	0.60	1.28	0.72	1.22	0.78
2.50	2.48	0.02	2.57	-0.07	2.53	-0.03
3.00	2.14	0.86	2.08	0.92	2.16	0.84
3.50	2.38	1.12	2.39	1.11	2.56	0.94
4.00	4.32	-0.32	3.21	0.79	3.18	0.82
4.50	5.97	-1.47	4.54	-0.04	4.62	-0.12
5.00	11.86	-6.86	9.21	-4.21	8.41	-3.41
5.50	11.95	-6.45	9.02	-3.52	8.61	-3.11
6.00	6.38	-0.38	5.02	0.98	4.99	1.01
6.50	7.08	-0.58	3.81	2.69	4.91	1.59
7.00	5.97	1.03	4.81	2.19	4.49	2.51
7.50	5.33	2.17	4.05	3.45	3.86	3.64
8.00	5.04	2.96	3.17	4.83	3.55	4.45
8.50	6.28	2.22	2.86	5.64	3.54	4.96
	Error mig	1.64	Error mig	1.89	Error mig	1.71

Taula 19: Resultats estimació distància - Beacon F5:7A:A5:E3:EF:18, a l'escenari 2

5.2.5 Model de propagació per al Beacon FF:A6:7C:AF:B0:CB a l'escenari 2

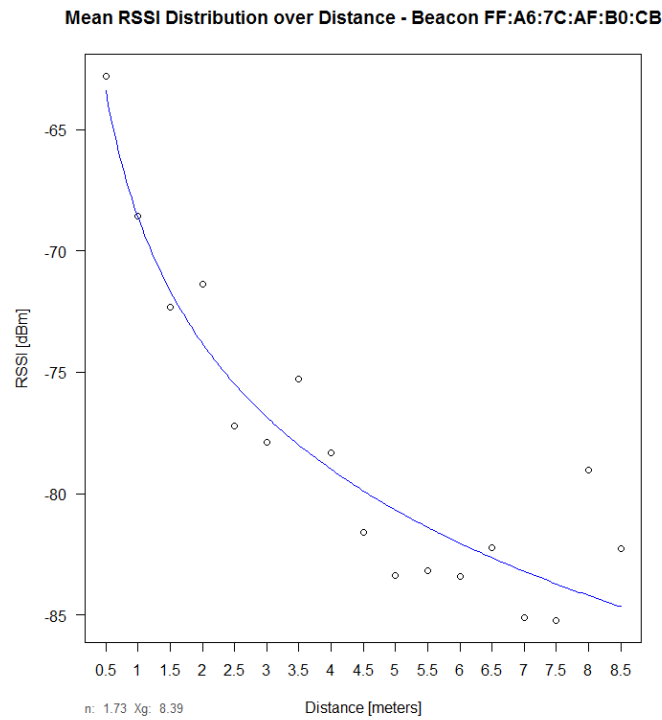


Figura 33: Modelització model propagació - Beacon FF:A6:7C:AF:B0:CB, a l'escenari 2

Distància real	Iteració 1		Iteració 2		Iteració 3	
	Distància calculada	Error	Distància calculada	Error	Distància calculada	Error
0.50	0.46	0.04	0.44	0.06	0.44	0.06
1.00	0.99	0.01	1.05	-0.05	1.04	-0.04
1.50	1.63	-0.13	1.71	-0.21	1.50	0.00
2.00	1.45	0.55	1.41	0.59	1.50	0.50
2.50	3.14	-0.64	3.48	-0.98	2.88	-0.38
3.00	3.44	-0.44	3.53	-0.53	3.45	-0.45
3.50	2.43	1.07	2.38	1.12	2.54	0.96
4.00	3.64	0.36	3.43	0.57	3.35	0.65
4.50	5.62	-1.12	4.83	-0.33	4.84	-0.34
5.00	7.14	-2.14	8.49	-3.49	7.71	-2.71
5.50	6.93	-1.43	6.20	-0.70	7.99	-2.49
6.00	7.18	-1.18	7.55	-1.55	6.09	-0.09
6.50	6.14	0.36	3.56	2.94	4.55	1.95
7.00	9.00	-2.00	4.25	2.75	6.02	0.98
7.50	9.12	-1.62	5.49	2.01	5.56	1.94
8.00	4.01	3.99	2.75	5.25	2.67	5.33
8.50	6.15	2.35	6.25	2.25	5.65	2.85
	Error mig	1.14	Error mig	1.49	Error mig	1.28

Taula 20: Resultats estimació distància - Beacon FF:A6:7C:AF:B0:CB, a l'escenari 2

5.3 Aplicació i anàlisi dels algorismes de posicionament

5.3.1 Trilateració

Abans de procedir a aplicar els diferents mètodes de resolució de la trilateració, s'han avaluat aquests mètodes, mitjançant un escenari en el qual les distàncies reals entre els Beacons i l'usuari es coneixia, alhora que també es coneixia la posició dels diferents Beacons. De tal manera que s'ha pogut comprovar, com ja s'ha dit amb anterioritat, que la part crítica del posicionament mitjançant trilateració no és la resolució del sistema sobredeterminat sinó que la precisió i exactitud d'aquesta metodologia de posicionament ve determinada per una bona mesura o estimació de la distància entre l'usuari o objectiu i els punts de referència.

Avaluació de la resolució de la trilateració mitjançant el mètode LSQ

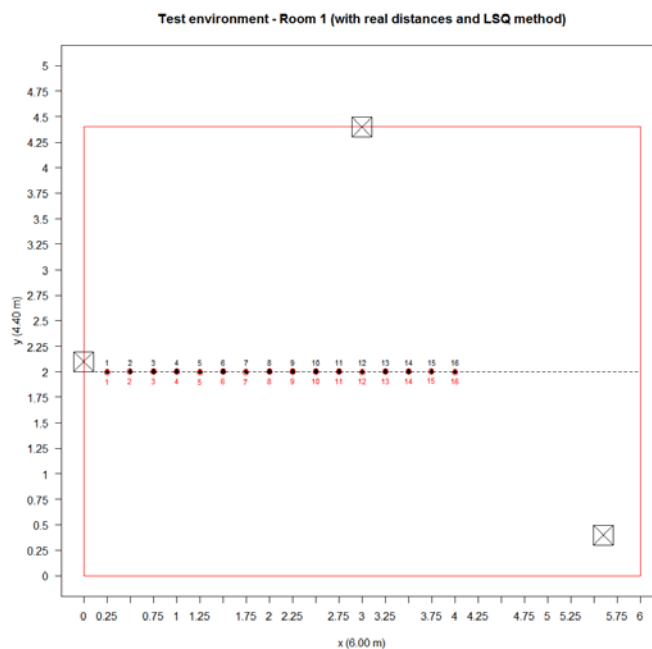


Figura 34: Avaluació resolució de la trilateració amb el mètode LSQ

Posició real	(0.25, 2.00)	(0.50, 2.00)	(0.75, 2.00)	(1.00, 2.00)
Posició calculada	(0.2530, 1.9962)	(0.4952, 1.9996)	(0.7486, 2.0026)	(1.0003, 2.0030)
Error	(-0.0030, 0.0038)	(0.0048, 0.0004)	(0.0014, -0.0026)	(-0.0003, -0.0030)
Error absolut	0.0049	0.0048	0.0029	0.0030
Posició real	(1.25, 2.00)	(1.50, 2.00)	(1.75, 2.00)	(2.00, 2.00)
Posició calculada	(1.2519, 1.9957)	(1.4996, 1.9986)	(1.7475, 1.9964)	(1.9987, 1.9996)
Error	(-0.0019, 0.0043)	(0.0004, 0.0014)	(0.0025, 0.0036)	(0.0013, 0.0004)
Error absolut	0.0047	0.0014	0.0044	0.0014
Posició real	(2.25, 2.00)	(2.50, 2.00)	(2.75, 2.00)	(3.00, 2.00)
Posició calculada	(2.2511, 2.0012)	(2.4986, 2.0013)	(2.7489, 2.0024)	(3.0000, 1.9978)

Error	(-0.0011, -0.0012)	(0.0014, -0.0013)	(0.0011, -0.0024)	(0.0000, 0.0022)
Error absolut	0.0017	0.0019	0.0026	0.0022
Posició real	(3.25, 2.00)	(3.50, 2.00)	(3.75, 2.00)	(4.00, 2.00)
Posició calculada	(3.2506, 2.0001)	(3.4993, 2.0004)	(3.7487, 2.0044)	(3.9997, 1.9982)
Error	(-0.0006, -0.0001)	(0.0007, -0.0004)	(0.0013, -0.0044)	(0.0003, 0.0018)
Error absolut	0.0007	0.0008	0.0046	0.0018
			Error promig	0.0027

Taula 21: Resultats resolució de la trilateració amb el mètode LSQ

Avaluació de la resolució de la trilateració mitjançant el mètode NLSQ

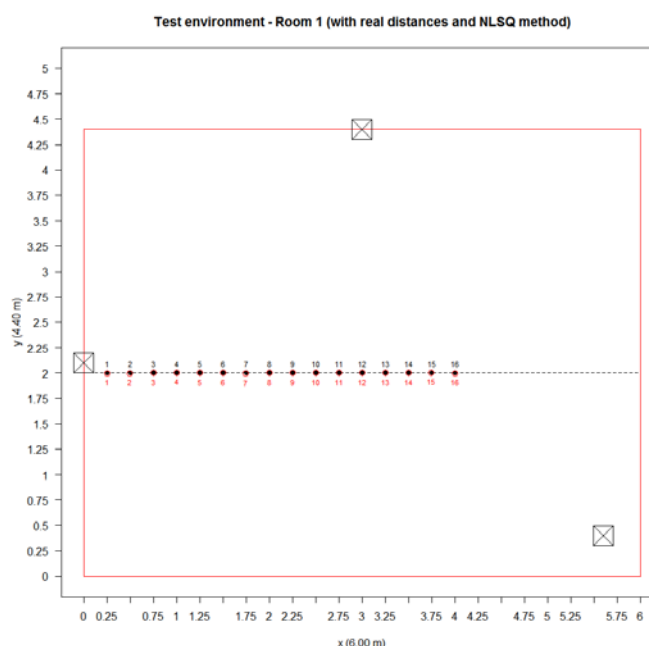


Figura 35: Avaluació resolució de la trilateració amb el mètode NLSQ

Posició real	(0.25, 2.00)	(0.50, 2.00)	(0.75, 2.00)	(1.00, 2.00)
Posició calculada	(0.2518, 1.9980)	(0.4968, 1.9976)	(0.7501, 2.0005)	(0.9991, 2.0051)
Error	(-0.0018, 0.0020)	(0.0032, 0.0024)	(-0.0001, -0.0005)	(0.0009, -0.0051)
Error absolut	0.0027	0.0040	0.0005	0.0052
Posició real	(1.25, 2.00)	(1.50, 2.00)	(1.75, 2.00)	(2.00, 2.00)
Posició calculada	(1.2503, 1.9988)	(1.4989, 1.9997)	(1.7472, 1.9965)	(1.9986, 2.0004)
Error	(-0.0003, 0.0012)	(0.0011, 0.0003)	(0.0028, 0.0035)	(0.0014, -0.0004)
Error absolut	0.0013	0.0011	0.0045	0.0015
Posició real	(2.25, 2.00)	(2.50, 2.00)	(2.75, 2.00)	(3.00, 2.00)
Posició calculada	(2.2507, 2.0030)	(2.4984, 2.0018)	(2.7485, 2.0028)	(3.0005, 1.9990)
Error	(-0.0007, -0.0030)	(0.0016, -0.0018)	(0.0015, -0.0028)	(-0.0005, 0.0010)
Error absolut	0.0031	0.0024	0.0032	0.0011

Posició real	(3.25, 2.00)	(3.50, 2.00)	(3.75, 2.00)	(4.00, 2.00)
Posició calculada	(3.2508, 2.0016)	(3.4995, 2.0008)	(3.7485, 2.0041)	(3.9996, 1.9981)
Error	(-0.0008, -0.0016)	(0.0005, -0.0008)	(0.0015, -0.0041)	(0.0004, 0.0019)
Error absolut	0.0018	0.0009	0.0043	0.0019
			Error promig	0.0025

Taula 22: Resultats resolució de la trilateració amb el mètode NLSQ

Avaluació resolució de la trilateració amb el mètode de la Intersecció de cercles

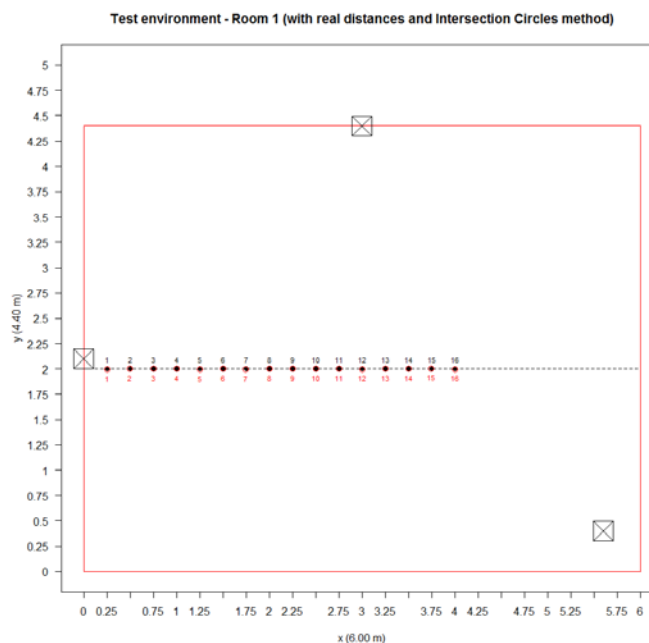


Figura 36: Avaluació resolució de la trilateració amb el mètode Intersecció cercles

Posició real	(0.25, 2.00)	(0.50, 2.00)	(0.75, 2.00)	(1.00, 2.00)
Posició calculada	(0.2530, 1.9962)	(0.4952, 1.9996)	(0.7486, 2.0026)	(1.0003, 2.0030)
Error	(-0.0030, 0.0038)	(0.0048, 0.0004)	(0.0014, -0.0026)	(-0.0003, -0.0030)
Error absolut	0.0049	0.0048	0.0029	0.0030
Posició real	(1.25, 2.00)	(1.50, 2.00)	(1.75, 2.00)	(2.00, 2.00)
Posició calculada	(1.2519, 1.9957)	(1.4996, 1.9986)	(1.7475, 1.9964)	(1.9987, 1.9996)
Error	(-0.0019, 0.0043)	(0.0004, 0.0014)	(0.0025, 0.0036)	(0.0013, 0.0004)
Error absolut	0.0047	0.0014	0.0044	0.0014
Posició real	(2.25, 2.00)	(2.50, 2.00)	(2.75, 2.00)	(3.00, 2.00)
Posició calculada	(2.2511, 2.0012)	(2.4986, 2.0013)	(2.7489, 2.0024)	(3.0000, 1.9978)
Error	(-0.0011, -0.0012)	(0.0014, -0.0013)	(0.0011, -0.0024)	(0.0000, 0.0022)
Error absolut	0.0017	0.0019	0.0026	0.0022
Posició real	(3.25, 2.00)	(3.50, 2.00)	(3.75, 2.00)	(4.00, 2.00)
Posició calculada	(3.2506, 2.0001)	(3.4993, 2.0004)	(3.7487, 2.0044)	(3.9997, 1.9982)
Error	(-0.0006, -0.0001)	(0.0007, -0.0004)	(0.0013, -0.0044)	(0.0003, 0.0018)

Error absolut	0.0007	0.0008	0.0046	0.0018
			Error promig	0.0027

Taula 23: Resultats resolució de la trilateració amb el mètode Intersecció cercles

Si es compara els resultats obtinguts a la Taula 21, amb els de la Taula 22 i amb els de la Taula 23, s'observa que no hi ha gaire diferència entre aplicar un mètode o un altre per calcular la posició mitjançant la resolució de la trilateració. Tot i així, donat que diferents treballs [60], [63], [42] han estudiat també el rendiment d'aquest mètodes de resolució i tots ells conclouen que en la majoria d'entorns el que millors resultats ofereix és el de mínims quadrats lineal (LSQ), i a més és més simple d'implementar. Per tant es més adient fer ús d'aquest. D'altra banda l'estudi d'aquests resultats també permet afirmar, com ja s'ha mencionat amb anterioritat, que la part crítica del posicionament mitjançant trilateració no és la resolució del sistema sinó que l'exactitud ve donada per una bona estimació de distància entre usuari i Beacons. Ja que tal i com es mostra en els exemples anteriors, on s'ha utilitzat la distància real, els resultats són molt propers al valor real de posició.

5.3.1.1 Posicionament mitjançant trilateració a nivell d'habitació

Trilateració amb el mètode de mínims quadrats lineals (LSQ)

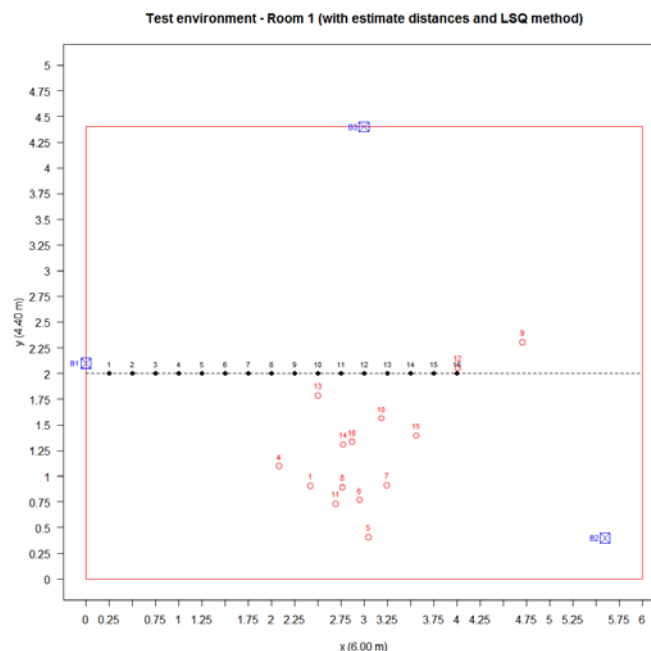


Figura 37: Posicionament mitjançant trilateració a nivell d'habitació – mètode LSQ

Posició real	(0.25, 2.00)	(0.50, 2.00)	(0.75, 2.00)	(1.00, 2.00)
Posició calculada	(2.42, 0.91)	(1.99, -1.34)	(1.87, -0.70)	(2.08, 1.10)
Error	(-2.17, 1.09)	(-1.49, 3.34)	(-1.12, 2.70)	(-1.08, 0.90)

Error absolut	2.43	3.66	2.93	1.41
Posició real	(1.25, 2.00)	(1.50, 2.00)	(1.75, 2.00)	(2.00, 2.00)
Posició calculada	(3.05, 0.41)	(2.95, 0.77)	(3.24, 0.91)	(2.77, 0.89)
Error	(-1.80, 1.59)	(-1.45, 1.23)	(-1.49, 1.09)	(-0.77, 1.11)
Error absolut	2.40	1.90	1.85	1.35
Posició real	(2.25, 2.00)	(2.50, 2.00)	(2.75, 2.00)	(3.00, 2.00)
Posició calculada	(4.71, 2.30)	(3.19, 1.56)	(2.69, 0.73)	(4.01, 2.06)
Error	(-2.46, -0.30)	(-0.69, 0.44)	(0.06, 1.27)	(-1.01, -0.06)
Error absolut	2.48	0.81	1.27	1.01
Posició real	(3.25, 2.00)	(3.50, 2.00)	(3.75, 2.00)	(4.00, 2.00)
Posició calculada	(2.50, 1.79)	(2.77, 1.31)	(3.56, 1.40)	(2.87, 1.34)
Error	(0.75, 0.21)	(0.73, 0.69)	(0.19, 0.60)	(1.13, 0.66)
Error absolut	0.78	1.00	0.63	1.31
			Error promig	1.70

Taula 24: Resultats posicionament mitjançant trilateració a nivell d'habitació – mètode LSQ

Trilateració amb el mètode de mínims quadrats no lineals (NLSQ)

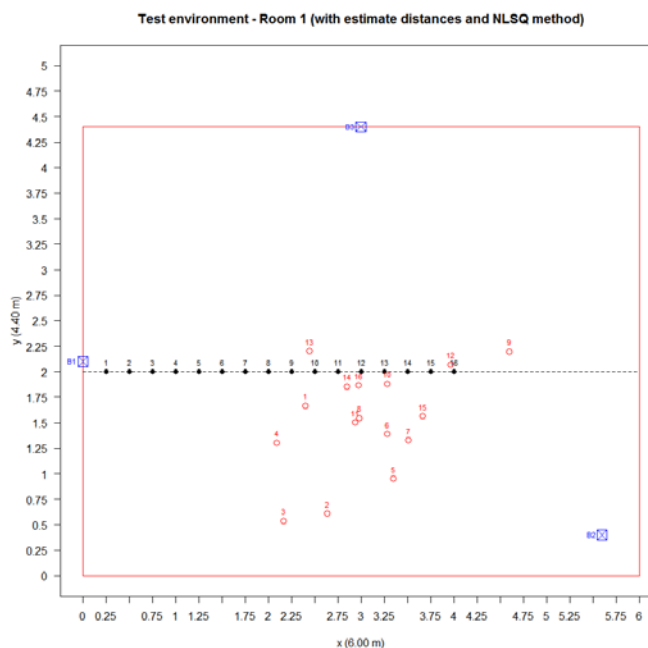


Figura 38: Posicionament mitjançant trilateració a nivell d'habitació – mètode NLSQ

Posició real	(0.25, 2.00)	(0.50, 2.00)	(0.75, 2.00)	(1.00, 2.00)
Posició calculada	(2.40, 1.67)	(2.63, 0.61)	(2.16, 0.54)	(2.09, 1.30)
Error	(-2.15, 0.33)	(-2.13, 1.39)	(-1.41, 1.46)	(-1.09, 0.70)
Error absolut	2.18	2.55	2.03	1.30
Posició real	(1.25, 2.00)	(1.50, 2.00)	(1.75, 2.00)	(2.00, 2.00)
Posició calculada	(3.35, 0.95)	(3.28, 1.39)	(3.51, 1.33)	(2.98, 1.55)

Error	(-2.10, 1.05)	(-1.78, 0.61)	(-1.76, 0.67)	(-0.98, 0.45)
Error absolut	2.35	1.89	1.88	1.08
Posició real	(2.25, 2.00)	(2.50, 2.00)	(2.75, 2.00)	(3.00, 2.00)
Posició calculada	(4.60, 2.20)	(3.29, 1.88)	(2.94, 1.50)	(3.96, 2.07)
Error	(-2.35, -0.20)	(-0.79, 0.12)	(-0.19, 0.50)	(-0.96, -0.07)
Error absolut	2.36	0.79	0.53	0.97
Posició real	(3.25, 2.00)	(3.50, 2.00)	(3.75, 2.00)	(4.00, 2.00)
Posició calculada	(2.44, 2.20)	(2.85, 1.85)	(3.66, 1.56)	(2.97, 1.86)
Error	(0.81, -0.20)	(0.65, 0.15)	(0.09, 0.44)	(1.03, 0.14)
Error absolut	0.83	0.67	0.44	1.03
			Error promig	1.43

Taula 25: Resultats posicionament mitjançant trilateració a nivell d'habitació – mètode NLSQ

5.3.1.2 Posicionament mitjançant trilateració a nivell de vivenda

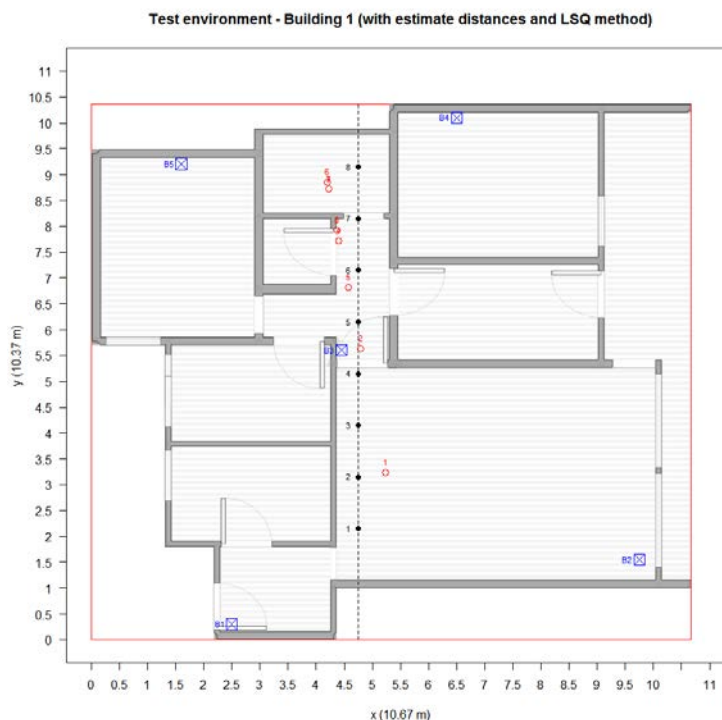


Figura 39: Posicionament mitjançant trilateració a nivell de vivenda – mètode LSQ

Posició real	(4.75, 2.15)	(4.75, 3.15)	(4.75, 4.15)	(4.75, 5.15)
Posició calculada	(5.23, 3.24)	(4.79, 5.63)	(4.22, 8.73)	(4.40, 7.72)
Error	(-0.48, -1.09)	(-0.04, -2.48)	(0.53, -4.58)	(0.35, -2.57)
Error absolut	1.19	2.48	4.61	2.59
Posició real	(4.75, 6.15)	(4.75, 7.15)	(4.75, 8.15)	(4.75, 9.15)
Posició calculada	(4.57, 6.82)	(4.19, 8.86)	(4.22, 8.72)	(4.37, 7.93)

Error	(0.18, -0.67)	(0.56, -1.71)	(0.53, -0.57)	(0.38, 1.22)
Error absolut	0.69	1.80	0.77	1.28
			Error promig	1.93

Taula 26: Resultats posicionament mitjançant trilateració a nivell de vivenda – mètode LSQ

5.3.2 Fingerprinting

Un cop avaluat el rendiment de la trilateració s'ha procedit a analitzar el rendiment del mètode de posicionament basat en el fingerprinting.

5.3.2.1 Captura de les dades necessàries pel fingerprinting

El primer pas ha consistit en crear el plànol de la vivenda, definit les parets i els punts d'interès, i després capturar totes les empremtes digitals (fingerprintings). Per això s'han distribuït cinc Beacons al llarg de tota la vivenda amb la finalitat d'oferir una bona coberta en qualsevol punt d'aquesta. Tot seguit, amb l'ajut de l'eina *Measurement Tool* d'Indoor.rs [43], s'ha procedit a capturar i emmagatzemar cada empremta digital. A la Figura 40 es pot veure el resultat de tot aquest procés.



Figura 40: Indoor.rs Mesurament Tool

Un cop capturades i emmagatzemades totes les empremtes digitals s'ha procedit a comprovar a través de l'obtenció de la Figura 41, proporcionada per Indoor.rs a través del panell d'administració [64], que la distribució dels Beacons al llarg de tota la vivenda ofereix una bona cobertura. Aquesta figura, anomenada heat map, no és més que una representació o indicació de la quantitat de senyal/s *Bluetooth Smart* que hi ha present en un determinat punt. Quan més vermella és una zona de la figura indica que hi ha més senyals disponibles, mentre que quan una zona és blanca ens indica que la disposició del Beacons implantada no ofereix cobertura en aquesta zona. Entre

aquests dos extrems trobem zones verdes i zones grogues, de nou són un indicatiu de la presència de menys (verd) o més (groc) senyals. Si examinem amb més detall la figura obtinguda, es pot observar que la zona vermella no es troba al centre de la vivenda, sinó que està desplaçada a la part superior on hi ha un major nombre de parets degut a la divisió de les habitacions. Això permet oferir una major cobertura en aquesta zona, a priori més complicada, i mantenir un nivell de cobertura prou bo per a la resta de la vivenda.

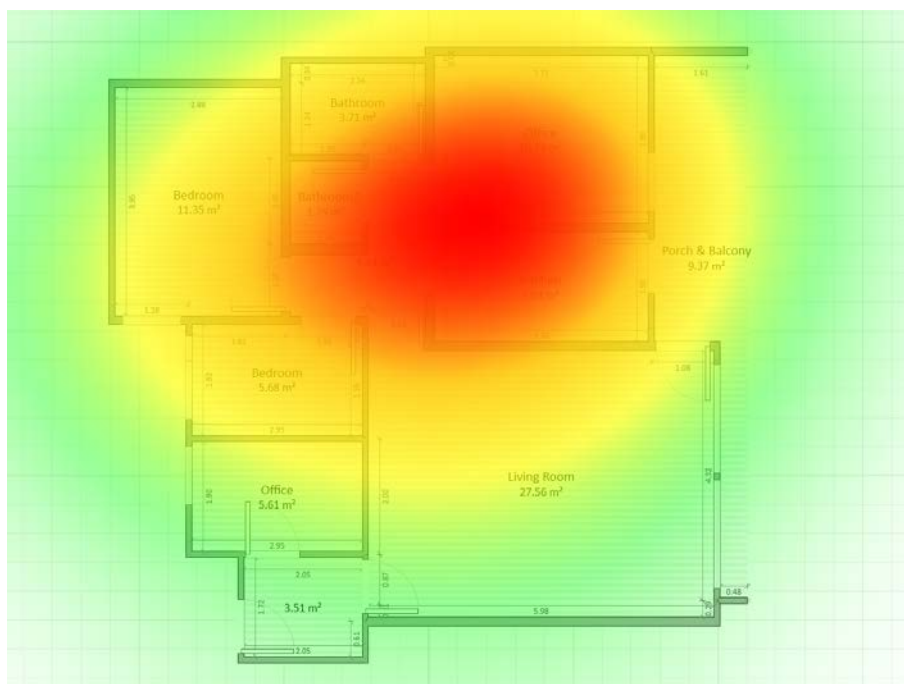


Figura 41: Distribució del senyal Bluetooth al llarg de la vivenda (heat map)

5.3.2.2 Posicionament mitjançant fingerprinting a nivell de vivenda

Arribats aquest punt, ja s'ha completat la fase *offline* del fingerprinting i per tant es pot procedir a realitzar la fase *online*. És a dir determinar la ubicació de l'usuari a partir de la informació capturada en la fase *offline*. Amb aquesta finalitat s'ha avaluat el posicionament a nivell d'habitació per a totes les estàncies de la vivenda. Per analitzar el rendiment d'aquest mètode s'ha situat l'usuari al mig de cada estància i s'ha executat l'aplicació *Indoo.rs* per a *iOS* [65]. El resultat obtingut es pot veure a la Figura 42, on s'observa que de les nou estàncies que formen la vivenda s'ha situat correctament a l'usuari en set d'elles, és a dir s'obté un encert del 77.78%. Tot i així, cal tenir present que la mesura s'ha realitzat al mig de la estància i s'observa que en algunes d'elles no se situa a l'usuari realment al mig, per tant hi ha un error d'uns 2-2.5 metres aproximadament, que concorda amb l'exactitud assolible indicada per *Indoo.rs* [66], que és de dos metres.

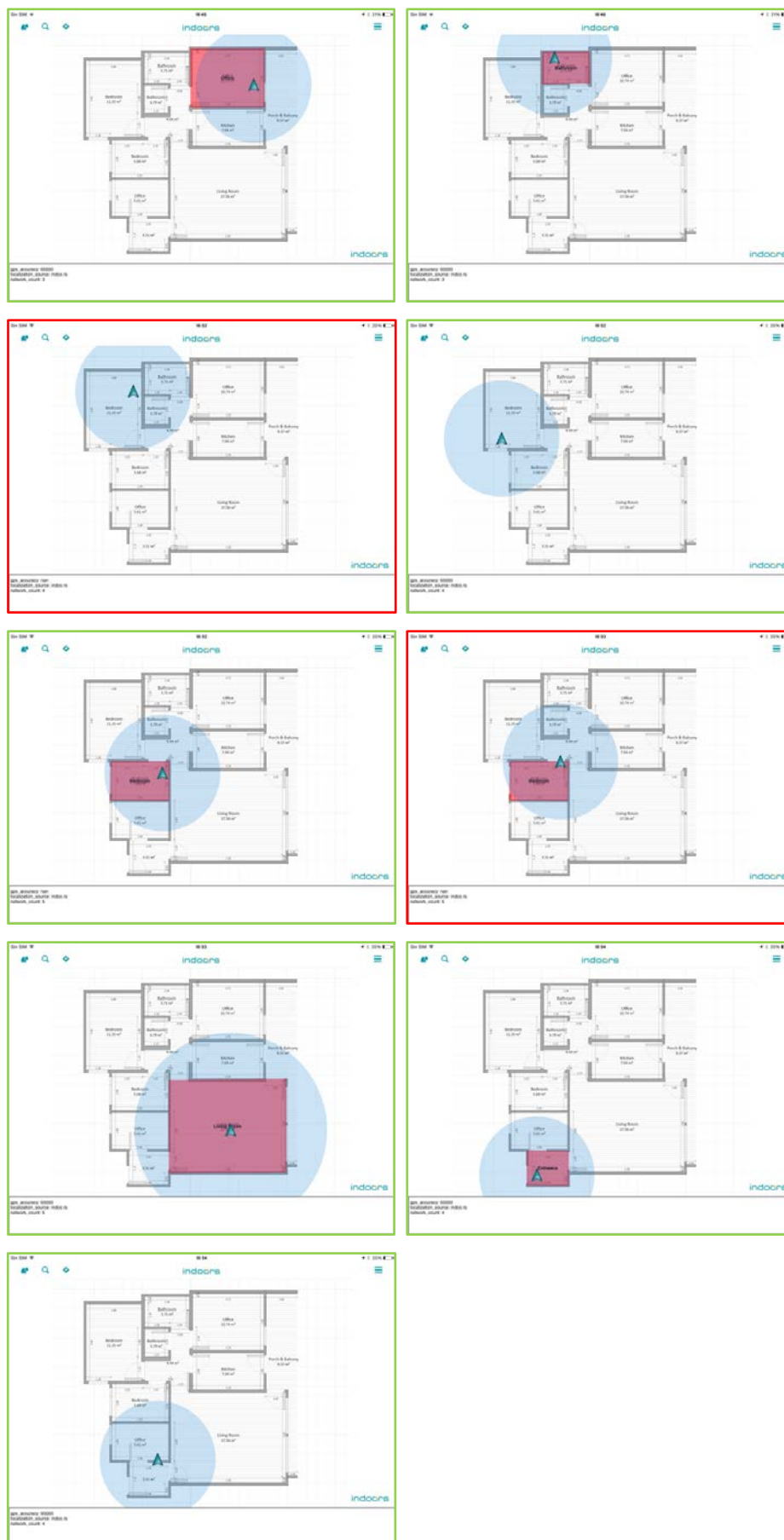


Figura 42: Posicionament mitjançant fingerprinting a nivell de vivenda

5.3.3 Proximitat

Per acabar s'ha procedit a estudiar el mètode de posicionament basat en la proximitat. Si s'avalua la mesura de la distància obtinguda al llarg de la distància mitjançant el model proposat per *Kontakt* es pot observar, tal i com es mostra a la Figura 43, que la distància estimada i la distància real difereixen bastant. A més aquest efecte és més evident a mida que s'incrementa la distància entre l'usuari i el Beacon. Per tant el posicionament mitjançant proximitat no serà gaire bo. Tot i així, tal i com s'ha vist amb anterioritat, amb una correcta modelització o caracterització de l'entorn de propagació i fent ús d'un model de propagació basat en *log-distance* és possible assolir una estimació de la distància molt millor. De tal manera que és possible definir les regions de proximitat (Immediate, near i far) amb major exactitud. Amb la qual cosa és possible oferir informació a les persones amb discapacitat visual, a partir de la seva proximitat respecte un determinat Beacon o Beacons. Així doncs se'ls pot assistir en els desplaçament per interiors, per exemple se'ls pot indicar quan es troben a l'entrada d'un determinat edifici o en una zona o espai concret d'aquest.

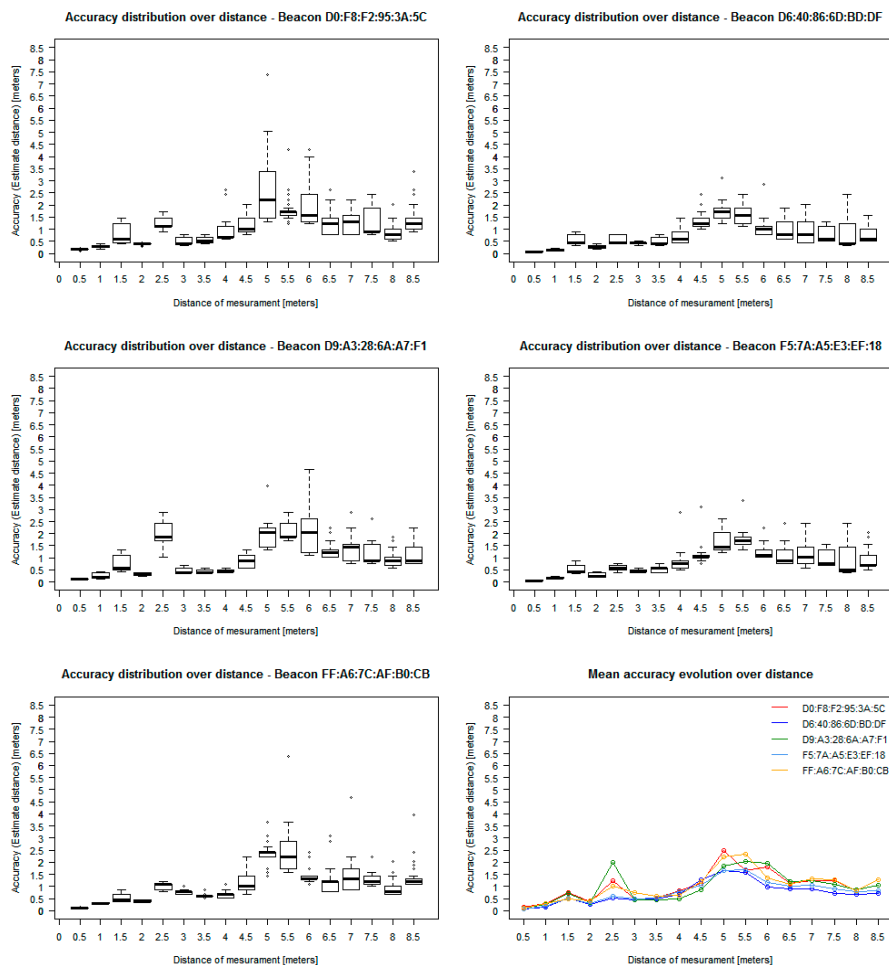


Figura 43: Distribució Accuracy - Beacons tots de 0.5 metres a 8.5 metres, a l'escenari 2

5.3.4 Avaluació i comparació dels resultats obtinguts

Una vegada s'ha avaluat el rendiment de cada mètode per separat, ja es disposa de prou informació per realitzar una comparació entre ells i una avaluació del compliment dels requisits plantejats inicialment. Per això s'ha optat per definir una escala amb 5 valors: Excel·lent, Molt Bo, Bo, Regular i Pobre que permeti assignar un valor a cadascuna de les mètriques de posicionament definides prèviament.

Mètode de posicionament		Trilateració			Fingerprinting	Proximitat
		LSQ	NLSQ	Intersecció C.		
Exactitud		Excel·lent (<2m)	Molt bo (<2.5m)	Excel·lent (<2m)	Molt bo (<2.5m)	Bo (<3m)
Precisió		Bo (<75%)	Bo (<75%)	Bo (<75%)	Molt bo (~77%)	Bo (<75%)
Dificultat de calibració		Molt Bo	Molt Bo	Molt Bo	Regular	Bo
Disponibilitat		Molt Bo	Molt Bo	Molt Bo	Molt Bo	Molt Bo
Escalabilitat	Nº usuaris	Excel·lent	Excel·lent	Excel·lent	Excel·lent	Excel·lent
	Àrea	Regular	Regular	Regular	Pobre	Bo
Cost		Molt Bo	Molt Bo	Molt Bo	Bo	Molt Bo
Privacitat		Excel·lent	Excel·lent	Excel·lent	Excel·lent	Excel·lent
Robustesa i adaptabilitat		Regular	Regular	Regular	Regular	Regular

Taula 27: Comparativa entre els diferents mètodes de posicionament

Es pot dir que l'exactitud és força bona en tots els mètodes, i que s'assoleixen valors d'error mig inferiors als 3 metres. Pel que fa a la precisió també és bona però aquesta està relacionada amb la dificultat de calibració del mètode. Com que en tots els mètodes, a excepció del fingerprinting, és necessari obtenir els paràmetres del model de pèrdues de propagació i el valor de *RSSI* a 1 metre, per poder estimar la distància, la precisió vindrà determinada per aquest calibratge i la seva dificultat. Tot i així aquest procediment és possible automatitzar-lo en una implementació real, el que millora la precisió i redueix el cost d'implantació i funcionament. En canvi, en el cas del fingerprinting, cal realitzar la fase *offline* de mapatge i obtenció d'empremtes. Aquest procés no és fàcil d'automatitzar i requereix força temps, tot i no ser difícil, n'incrementa el cost d'implantació. Pel que fa a l'escalabilitat, el mode de radiodifusió utilitzat permet incrementar sense problemes el nombre d'usuaris a més d'assegurar la privacitat. Tot i així l'escalabilitat de l'àrea d'operació dels diferents mètodes presenta dificultats, a excepció de la proximitat, en que només cal afegir Beacons. Per acabar la robustesa i adaptabilitat, donat que tots utilitzen mesures de *RSSI*, està relacionada amb les característiques del valor de *RSSI*. Per tant, com el valor de *RSSI* fluctua amb el temps, amb la distància i en funció de l'escenari on s'avalua, la robustesa i adaptabilitat no serà gaire fàcil d'aconseguir.

6. Conclusions i treballs futurs

6.1 Conclusions

L'objectiu principal d'aquest treball era l'estudi i anàlisi, tant teòric com pràctic, de les capacitats de la tecnologia *Bluetooth Smart* i dels *Beacons* per desenvolupar un Sistema de Posicionament en Interiors (*IPS*) per assistir a persones amb discapacitat visual. Es pot dir que en l'àmbit teòric, s'han assolit tots els objectius marcats, obtenint una base prou ferma per conèixer les possibilitats de *Bluetooth Smart* de cara a implantar un sistema *IPS* fent servir i algun dels mètodes descrits: trilateració, fingerprinting o proximitat o una combinació d'ells. En l'àmbit pràctic, el nivell assolit no ha sigut tan elevat, donades les limitacions temporals d'aquest projecte. Tot i així s'han realitzat diferents proves que demostren que és possible assolir precisions en el posicionament de l'ordre d'uns pocs metres, ~1-3 m. Encara que aquest error pot semblar elevat, si és té present que el principal problema que troben les persones amb discapacitat visual és en els desplaçaments en espais interiors de grans dimensions i desconeguts com ara: campus universitaris, hospitals, edificis públics i estacions. Llavors aquest error ja no és tan elevat, donades les dimensions d'aquests espais, i per tant és possible oferir informació de molta utilitat alhora de desplaçar-se en aquests entorns. A més el desplegament d'aquest sistema és més simple i d'un cost menor respecte altres tecnologies, ja que els *Beacons* no requereixen una infraestructura de subministrament elèctric, estan alimentats amb bateries, el que també facilita la seva adaptació en cas de modificar-se l'entorn. Així mateix tampoc és requereix un receptor específic, n'hi ha prou amb disposar d'un telèfon mòbil. Altrament en funció del servei que és vulgui oferir és pot recorre a un mètode de posicionament o un altre. El més bàsic i més simple d'implantar i de menor cost seria el basat en proximitat, tot i que pot semblar poc rellevant, cal observar que la informació aportada pot resultar de molta utilitat, ja que passar de no saber on és troba un a saber que es troba pròxim a una determinada zona, ja és un avenç. Pel que fa als altres dos mètodes la seva implantació no és tan fàcil i suposa un major cost, tot i així les possibilitats a nivell de servei són més grans.

D'altra banda tot i que principalment s'ha abordat l'ús de *Bluetooth Smart* i dels *Beacons* per assistir a persones amb discapacitat visual cal observar que aquesta tecnologia no és exclusiva per aquest col·lectiu. Sinó que és extensible per a oferir informació a qualsevol altre ciutadà, ja que l'assistència en els desplaçaments en espais de grans dimensions pot resultar d'utilitat a qualsevol. A més aquesta és una de les propietats rellevants d'utilitzar aquesta tecnologia i és que permet oferir informació

personalitzada, mitjançant el disseny específic de l'aplicació receptora, adaptada als diferents col·lectius. Per exemple en els cas d'implantar un sistema d'aquest tipus en un centre comercial a més d'oferir informació per a la navegació és possible també oferir ofertes dels establiments, basant-se en la proximitat o avaluar les zones amb més aflluència entre altres. De tal manera que aquestes múltiples aplicacions a més d'oferir majors possibilitats de cara a l'usuari permeten que la recuperació de la inversió necessària per poder implantar aquest sistema sigui més ràpida.

6.2 Treballs futurs

Encara que els resultats obtinguts permeten afirmar que *Bluetooth Smart* presenta unes bones característiques enfront a altres tecnologies per a implantar un sistema de posicionament en interiors hi ha alguns treballs que es podrien dur a terme.

En primer lloc caldria estendre la caracterització del senyal *Bluetooth Smart*, en especial de la mesura de *RSSI*, per considerar la influència de l'orientació dels dispositius i dels seus components, tant pel receptor com emissor i avaluar-ho en més escenaris. Aquesta caracterització hauria de permetre definir i optimitzar el model de pèrdues de propagació utilitzat per a transformar la mesura de *RSSI* en una estimació de distància, al millorar l'estimació de distància llavors la exactitud i precisió del mètode de posicionament milloraria. Relacionat amb això es podria aprofitar les capacitats del Cloud Beacon per a calcular i ajustar dinàmicament i cada cert temps els paràmetres del model. Així es podria fer front a la variabilitat del RSS, degut als canvis en l'entorn de propagació al llarg del temps i de nou seria possible millorar l'estimació de la distància, tot millorant el càlcul de la posició.

En segon lloc, tal i com succeeix amb altres sistemes de posicionament, es podria intentar desenvolupar un sistema híbrid, que fes ús de més d'una tecnologia per tal de millorar el rendiment. Donat que per fer servir un sistema basat en *Bluetooth Smart* el més habitual sol ser recórrer a un telèfon mòbil com a element receptor es podria fer ús dels sensors, que solen incorporar cada cop més aquests dispositius, per implementar un sistema basat en *Bluetooth Smart* i *Dead Reckoning*. De tal manera que el Beacons actuessin com a element de reajust de posició per al *Dead Reckoning*.

Per acabar un altre dels camps a investigar seria avaluar i definir diferents estratègies de posicionament dels Beacons. Ja que tant la quantitat de Beacons com la seva ubicació repercuteixen en l'exactitud i la precisió del posicionament.

7. Glossari

AOA: Angle Of Arrival

ATT: Attribute Protocol

BLE: Bluetooth Low Energy

CSV: Comma Separated Value

GAP: Generic Access Profile

GATT: Generic Attribute Profile

GPS: Global Positioning System

IPS: Indoor Positioning System

ISM: Industrial, Scientific and Medical radio band

IR: Infrared

L2CAP: Logical Link Control and Adaption Protocol

LAN: Local Area Network

LOS: Line of Sight

LSQ: Least Squares Method

MAC: Media Access Control address

MSE: Mean Square Error

NLOS: Non Line of Sight

NLSQ: Non Linear Least Squares Method

OMS: Organització Mundial de la Salut

PAN: Personal Area Network

POA: Phase Of Arrival

RF: Radio frequency

RFID: Radio Frequency IDentification

RSS: Received Signal Strength

RSSI: Received Signal Strength Indication

SDK: Software Development Kit

SIG: Bluetooth Special Interest Group

TDOA: Time Difference Of Arrival

TOA: Time Of Arrival

UUID: Universally Unique Identifier

UWB: Ultra Wide Band

WLAN: Wireless Local Area Network

8. Bibliografia

- [1] «OMS | Ceguera y discapacidad visual.» [En línia]. Disponible a: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/es/>. [Accedit: 13-març-2015].
- [2] M. A. Al-Ammar, S. Alhadhrami, A. Al-Salman, A. Alarifi, H. S. Al-Khalifa, A. Alnafessah, i M. Alsaleh, «Comparative Survey of Indoor Positioning Technologies, Techniques, and Algorithms», en *2014 International Conference on Cyberworlds*, 2014, p. 245-252.
- [3] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, i J. Liu, «Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems», *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C (Applications Rev.)*, vol. 37, núm. 6, p. 1067-1080, nov. 2007.
- [4] D. Dardari, P. Closas, i P. Djuric, «Indoor Tracking: Theory, Methods, and Technologies», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. PP, núm. 99, p. 1-1, 2015.
- [5] L. Mainetti, L. Patrono, i I. Sergi, «A survey on indoor positioning systems», en *2014 22nd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2014, p. 111-120.
- [6] S. S. Saab i Z. S. Nakad, «A Standalone RFID Indoor Positioning System Using Passive Tags», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, núm. 5, p. 1961-1970, maig 2011.
- [7] Wing Hung Hung, Ho Lam, Yin Wai Fung, Da Cheng Wei, i Ke-Li Wu, «An active RFID indoor positioning system using analog phased array antennas.» p. 179-182, 2011.
- [8] Z. Irahauten, H. Nikookar, i M. Klepper, «A joint ToA/DoA technique for 2D/3D UWB localization in indoor multipath environment», en *2012 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2012, p. 4499-4503.
- [9] B. Yan i L. Xiaochun, «Research on UWB indoor positioning based on TDOA technique», en *2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 2009, p. 1-167-1-170.
- [10] Chunhan Lee, Yushin Chang, Gunhong Park, Jaeheon Ryu, Seung-Gweon Jeong, Seokhyun Park, Jae Whe Park, Hee Chang Lee, Keum-Shik Hong, i Man Hyung Lee, «Indoor positioning system based on incident angles of infrared emitters», en *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004*, 2004, vol. 3, p. 2218-2222.
- [11] E. Martin-Gorostiza, F. J. Meca-Meca, J. L. Lazaro-Galilea, D. Salido-Monzu, E. Martos-Naya, i A. Wieser, «Infrared local positioning system using phase differences», en *2014 Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service (UPINLBS)*, 2014, p. 238-247.
- [12] M. H. Habaebi, R. O. Khamis, A. Zyoud, i M. R. Islam, «RSS Based Localization Techniques for ZigBee Wireless Sensor Network», en *2014 International Conference on Computer and Communication Engineering*, 2014, p. 72-75.

- [13] S. Fernandez, D. Gualda, J. C. Garcia, J. J. Garcia, J. Urena, i R. Gutierrez, «Indoor location system based on ZigBee devices and Metric Description Graphs», en *2011 IEEE 7th International Symposium on Intelligent Signal Processing*, 2011, p. 1-5.
- [14] S.-H. Fang i T.-N. Lin, «Accurate WLAN indoor localization based on RSS, fluctuations modeling», en *2009 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing*, 2009, p. 27-30.
- [15] M. Ciurana, S. Cugno, i F. Barcelo-Arroyo, «WLAN indoor positioning based on TOA with two reference points», en *2007 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, 2007, p. 23-28.
- [16] V. Khaitan, P. Tinnakornsrisuphap, i M. Yavuz, «Indoor Positioning Using Femtocells», en *2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2011, p. 1-5.
- [17] F. Benedetto, G. Giunta, i E. Guzzon, «Enhanced TOA-based indoor-positioning algorithm for mobile LTE cellular systems», en *2011 8th Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, 2011, p. 137-142.
- [18] C. Gentner, E. Munoz, M. Khider, E. Staudinger, S. Sand, i A. Dammann, «Particle filter based positioning with 3GPP-LTE in indoor environments», en *Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, 2012, p. 301-308.
- [19] «Bluetooth Technology Website.» [En línia]. Disponible a: <http://www.bluetooth.com/Pages/Bluetooth-Home.aspx>. [Accedit: 10-març-2015].
- [20] J. DeCuir, «Introducing Bluetooth Smart: Part 1: A look at both classic and new technologies.», *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 3, p. 12-18, 2014.
- [21] J. Decuir, «Introducing Bluetooth Smart: Part II: Applications and updates.», *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 3, p. 25-29, 2014.
- [22] «Bluetooth Technology Special Interest Group.» [En línia]. Disponible a: <https://www.bluetooth.org/en-us>. [Accedit: 25-març-2015].
- [23] A. Madhavapeddy i A. Tse, «A study of bluetooth propagation using accurate indoor location mapping», *UbiComp 2005 Ubiquitous Comput.*, 2005.
- [24] M. Altini, D. Brunelli, E. Farella, i L. Benini, «Bluetooth indoor localization with multiple neural networks», en *IEEE 5th International Symposium on Wireless Pervasive Computing 2010*, 2010, p. 295-300.
- [25] S. S. Chawathe, «Low-latency indoor localization using bluetooth beacons», en *2009 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 2009, p. 1-7.
- [26] J. J. M. Diaz, R. de A. Maues, R. B. Soares, E. F. Nakamura, i C. M. S. Figueiredo, «Bluepass: An indoor Bluetooth-based localization system for mobile applications», en *The IEEE symposium on Computers and Communications*, 2010, p. 778-783.

- [27] «What is iBeacon? A Guide to Beacons | iBeacon.com Insider.» [En línia]. Disponible a: <http://www.ibeacon.com/what-is-ibeacon-a-guide-to-beacons/>. [Accedit: 26-març-2015].
- [28] «iBeacon for Developers - Apple Developer.» [En línia]. Disponible a: <https://developer.apple.com/ibeacon/>. [Accedit: 26-març-2015].
- [29] «San Francisco Airport Tests Beacons for Blind Travelers - RFID Journal.» [En línia]. Disponible a: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?12072/>. [Accedit: 26-març-2015].
- [30] «KLM Offering Airport Navigation Service.» [En línia]. Disponible a: <http://news.klm.com/klm-offering-airport-navigation-service>. [Accedit: 26-març-2015].
- [31] «BBC News - Technology helps visually impaired navigate the Tube.» [En línia]. Disponible a: <http://www.bbc.com/news/health-31754365>. [Accedit: 10-març-2015].
- [32] T. Do-Xuan, V. Tran-Quang, T. Bui-Xuan, i V. Vu-Thanh, «Smartphone-based pedestrian dead reckoning and orientation as an indoor positioning system», en *2014 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2014)*, 2014, p. 303-308.
- [33] A. R. Pratama i R. Hidayat, «Smartphone-based Pedestrian Dead Reckoning as an indoor positioning system», en *2012 International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, 2012, p. 1-6.
- [34] T. Iwase i R. Shibasaki, «Infra-free indoor positioning using only smartphone sensors», en *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 2013, p. 1-8.
- [35] M. Dashti, «Indoor localization on mobile phone platforms using embedded inertial sensors», en *2013 10th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC)*, 2013, p. 1-5.
- [36] R. Harle, «A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrians», *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, núm. 3, p. 1281-1293, gen. 2013.
- [37] M. Werner, M. Kessel, i C. Marouane, «Indoor positioning using smartphone camera», en *2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 2011, p. 1-6.
- [38] M. Nozawa, Y. Hagiwara, i Y. Choi, «Indoor human navigation system on smartphones using view-based navigation.» p. 1916-1919, 2012.
- [39] H. Kawaji, K. Hatada, T. Yamasaki, i K. Aizawa, «An image-based indoor positioning for digital museum applications», en *2010 16th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, 2010, p. 105-111.
- [40] N. Cinefra, «An adaptive indoor positioning system based on Bluetooth Low Energy RSSI», Politecnico de Milano, 2013.

- [41] E. Dahlgren i H. Mahmood, «Evaluation of indoor positioning based on Bluetooth Smart technology», 2014.
- [42] A. Corbacho Salas, «Indoor Positioning System based on Bluetooth Low Energy», Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
- [43] «indoo.rs | Accurate real-time Indoor Localization.» [En línia]. Disponible a: <http://indoo.rs/>. [Accedit: 21-març-2015].
- [44] «Estimote Beacons — real world context for your apps.» [En línia]. Disponible a: <http://estimote.com/>. [Accedit: 02-juny-2015].
- [45] «Por favor, enciendan sus móviles, la visita va a comenzar | EL MUNDO», 2015. [En línia]. Disponible a: <http://www.elmundo.es/enredados/2015/05/14/5553452f268e3e0b2c8b4586.html>. [Accedit: 01-juny-2015].
- [46] «Aruba Beacons | Aruba Networks.» [En línia]. Disponible a: <http://www.arubanetworks.com/products/mobile-engagement/aruba-beacons/>. [Accedit: 02-juny-2015].
- [47] «Museum Experience.» [En línia]. Disponible a: <http://www.museumexperience.es/>. [Accedit: 01-juny-2015].
- [48] «Shaping the Wireless Future with Low Energy Applications and Systems | DigiKey.» [En línia]. Disponible a: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/jun/shaping-the-wireless-future-with-low-energy-applications-and-systems>. [Accedit: 29-maig-2015].
- [49] C. Laoudias, «Localization for Next Generation Wireless Communication Networks», 2009. [En línia]. Disponible a: <http://www2.ucy.ac.cy/~laoudias/pages/penek/description.html>. [Accedit: 29-maig-2015].
- [50] Bluetooth Special Interest Group, «Bluetooth Core Specification Version 4.2.» 2014.
- [51] «Bluetooth Smart - Bluetooth low energy wireless technology - Nordic Semiconductor.» [En línia]. Disponible a: <https://www.nordicsemi.com/eng/Products/Bluetooth-Smart-Bluetooth-low-energy>. [Accedit: 07-maig-2015].
- [52] «TI Bluetooth/Bluetooth Low Energy Solutions.» [En línia]. Disponible a: http://www.ti.com/lscds/ti/wireless_connectivity/bluetooth_bluetooth-ble/overview.page?paramCriteria=no. [Accedit: 07-maig-2015].
- [53] Punch Through Design, «LBM313 Bluetooth Low Energy module | Punch Through Design.» [En línia]. Disponible a: <https://punchthrough.com/products/lbm313-module/>. [Accedit: 07-maig-2015].
- [54] «Kontakt.io: Beacons & Beyond.» [En línia]. Disponible a: <http://kontakt.io/>. [Accedit: 29-maig-2015].

- [55] «Beacon identifiers – best practise.» [En línia]. Disponible a: <https://support.kontakt.io/hc/en-gb/articles/201694581-Beacon-identifiers-best-practise>. [Accedit: 29-maig-2015].
- [56] «Advertising Interval - best practise.» [En línia]. Disponible a: <https://support.kontakt.io/hc/en-gb/articles/201567802-Advertising-Interval-best-practises->. [Accedit: 29-maig-2015].
- [57] «Introducing Kontakt.io Cloud Beacon.» [En línia]. Disponible a: <http://kontakt.io/introducing-kontakt-io-cloud-beacon/>. [Accedit: 29-maig-2015].
- [58] E.-E.-L. Lau i W.-Y. Chung, «Enhanced RSSI-Based Real-Time User Location Tracking System for Indoor and Outdoor Environments», en *2007 International Conference on Convergence Information Technology (ICCIT 2007)*, 2007, p. 1213-1218.
- [59] R. Mehra i A. Singh, «Real time RSSI error reduction in distance estimation using RLS algorithm», *Proc. 2013 3rd IEEE Int. Adv. Comput. Conf. IACC 2013*, p. 661-665, 2013.
- [60] Y. Wang, X. Yang, Y. Zhao, Y. Liu, i L. Cuthbert, «Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods», *2013 IEEE 10th Consum. Commun. Netw. Conf. CCNC 2013*, p. 837-842, 2013.
- [61] T. Chrysikos, G. Georgopoulos, S. Kotsopoulos, i D. Zevgolís, «Site-specific validation of indoor RF models for commercial propagation topologies at 2.4 GHz», en *2010 7th International Symposium on Wireless Communication Systems*, 2010, p. 681-685.
- [62] T. Chrysikos, G. Georgopoulos, i S. Kotsopoulos, «Site-specific validation of ITU indoor path loss model at 2.4 GHz», en *2009 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks & Workshops*, 2009, p. 1-6.
- [63] W. Navidi, W. S. Murphy, i W. Hereman, «Statistical methods in surveying by trilateration», *Comput. Stat. Data Anal.*, vol. 27, núm. 2, p. 209-227, 1998.
- [64] Indoo.rs, «Panell d'administració d'Indoo.rs.» [En línia]. Disponible a: <https://my.indoo.rs/#login>. [Accedit: 05-juny-2015].
- [65] Indoo.rs, «Indoo.rs para iPhone, iPod touch y iPad en el App Store de iTunes.» [En línia]. Disponible a: <https://itunes.apple.com/es/app/indoo.rs/id716593102?mt=8>. [Accedit: 05-juny-2015].
- [66] Indoo.rs, «Technology | Accurate real-time Indoor Localization.» [En línia]. Disponible a: <http://indoo.rs/technology/>. [Accedit: 05-juny-2015].

9. Annexes

9.1 Recursos: Dataset, scripts i aplicacions

Tots els recursos utilitzats al llarg de l'elaboració d'aquest projecte es poden trobar a un repositori de Github per al seu ús. Github és un servidor web d'allotjament per a projectes de software que utilitzen el sistema de control de versions Git. El repositori on es troba el projecte és: <https://github.com/acamara/Innav>

L'última versió es pot descarregar directament del repositori utilitzant la interfície web:

The screenshot shows the GitHub repository page for 'acamara/Innav'. The repository has 28 commits, 1 branch, 0 releases, and 1 contributor. The current branch is 'master'. The repository contains several files and folders, including 'Aplicacions', 'DATASET_BEACONS', 'ScriptsMatlab', 'ScriptsR', and 'README.md'. The 'README.md' file is expanded, showing the title 'Innav' and the description 'Exploring Bluetooth Smart and Beacons technology for Indoor Localization System to assist blind and visually impaired people'. On the right side of the page, there are buttons for 'Clone in Desktop' and 'Download ZIP', with the latter being highlighted by a red dashed box.

O si es vol tenir una còpia de tot el projecte es pot realitzar un *clone* amb git del projecte sencer, de la següent manera des de la consola del sistema:

```
$ git clone https://github.com/acamara/Innav.git directoridedestí
```

9.2 Kontakt Beacon

9.2.1 Technical specification

Dimensions and weight	Height	15 mm (0.59 in)
	Width	55 mm (2.16 in)
	Depth	56 mm (2.16 in)
	Weight	23 grams (0.81 oz)
Processors	Main	32-bit ARM® Cortex™ M0 CPU core
	Bluetooth	Nordic nRF51822
	Data rates	250kBs, 1Mbps, and 2Mbps
	Memory	256KB flash 16KB RAM
Communications	Bluetooth	Bluetooth Low Energy wireless technology 2.4GHz RF
Transmission power	Bluetooth	-30 dBm to 4 dBm
Sensitivity	Bluetooth	-93 dBm
Battery and Power	Battery	1 x 1,000mAh CR2477
	Type	Cell, replaceable
Battery life	Kontakt.io profile (350ms interval)	Up to 2 years with default settings and 24-hours daily usage.
Casing	Material	LUPOY GN5001RFG
	Flame resistance	Safe - V0 flammability class
	Colors	White, Black
	Custom color	Available on request with a CMYK formula or Pantone
	Protection	IP-57 (dust protected and waterproofed for up to 1 m immersion)
Environmental	Temperature	-20°C / + 60°C (-4°F / +140°F)
	Humidity	from 0% up to 100%

9.2.2 Beacon services

Service 1	
UUID	0x1800
Name	Generic Access
Characteristic 1	
UUID	0x2A00
Name	Device Name
Description	name of the device
Properties	readable, constant
Characteristic 2	
UUID	0x2A01
Name	Appearance
Description	appearance of the device

Properties	readable, constant
Characteristic 3	
UUID	0x2A04
Name	Slave Preferred Connection Parameters
Description	connection parameters in slave role
Properties	readable, constant

Service 2	
UUID	0x1801
Name	Generic Attribute
Characteristic 1	
UUID	0x2A05
Name	Service Changed
Description	handle of attribute which was changed
Properties	sending indications

Service 3	
UUID	0x180A
Name	Device Information
Characteristic 1	
UUID	0x2A29
Name	Manufacturer Name String
Description	name of the manufacturer
Properties	readable, constant
Characteristic 2	
UUID	0x2A26
Name	Firmware Revision String
Description	firmware number
Properties	readable, constant
Characteristic 3	
UUID	0x2A27
Name	Hardware Revision String
Description	hardware number
Properties	readable, constant

Service 4	
UUID	0x1804
Name	TxPower
Characteristic 1	

UUID	0x2A07
Name	Tx Power Level
Description	user can set the transmission power to one of eight values
Properties	2 hexadecimal numbers; readable, writable after correct password

Service 5	
UUID	0x180F
Name	Battery Service
Characteristic 1	
UUID	0x2A19
Name	Battery Level
Description	measured battery level in percentage
Properties	2 hexadecimal numbers; readable

Service 6	
UUID	0xA1EA8110-0E1B-D4A1-B840-63F88C8DA1EA
Name	Proximity Service
Characteristic 1	
UUID	0xA1EA8111-0E1B-D4A1-B840-63F88C8DA1EA
Name	Proximity UUID
Description	set new proximity uuid
Properties	32 hexadecimal numbers; readable, writable after correct password
Characteristic 2	
UUID	0xA1EA8112-0E1B-D4A1-B840-63F88C8DA1EA
Name	Major
Description	set new major value
Properties	4 hexadecimal numbers; readable, writable after correct password
Characteristic 3	
UUID	0xA1EA8113-0E1B-D4A1-B840-63F88C8DA1EA
Name	Minor
Description	set new minor value
Properties	4 hexadecimal numbers; readable, writable after correct password
Characteristic 4	
UUID	0xA1EA8114-0E1B-D4A1-B840-63F88C8DA1EA
Name	Propagated Device Name
Description	device name which will be seen in an applications
Properties	maximally 30 or less hexadecimal numbers which represent characters in ASCII codeble, writable after correct password

Service 7	
UUID	0xA1EA8120-0E1B-D4A1-B840-63F88C8DA1EA
Name	Timers
Characteristic 1	
UUID	0xA1EA8121-0E1B-D4A1-B840-63F88C8DA1EA
Name	Advertising Interval
Description	user can set interval between advertising packets to a value from 20ms to 10.24s. A value of 0x20 corresponds to 20ms and 0x4000 corresponds to 10.24s (interval=value*625µs)
Properties	4 hexadecimal numbers; readable, writable after correct password

Service 8	
UUID	0xA1EA8130-0E1B-D4A1-B840-63F88C8DA1EA
Name	Control Service
Characteristic 1	
UUID	0xA1EA8131-0E1B-D4A1-B840-63F88C8DA1EA
Name	Password
Description	After connection has been established, the user has 30 seconds to write the correct password characteristic or he will be disconnected.
Properties	8 hexadecimal numbers (4 characters in ASCII code); writable
Characteristic 2	
UUID	0xA1EA8132-0E1B-D4A1-B840-63F88C8DA1EA
Name	Set Password
Description	set new password for connection
Properties	8 hexadecimal numbers (4 characters in ASCII code); writable after correct password
Characteristic 3	
UUID	0xA1EA8133-0E1B-D4A1-B840-63F88C8DA1EA
Name	Reset
Description	write a value greater than zero to reset the device to default settings
Properties	2 hexadecimal numbers; writable after correct password
Characteristic 4	
UUID	0xA1EA8134-0E1B-D4A1-B840-63F88C8DA1EA
Name	Default Settings
Description	user can restore default settings by typing the 6 character master password
Properties	12 hexadecimal numbers (6 characters in ASCII code); writable after correct password
Characteristic 5	
UUID	0xA1EA8135-0E1B-D4A1-B840-63F88C8DA1EA
Name	Bootloader
Description	user has to type 6 character master password to run bootloader mode
Properties	12 hexadecimal numbers (6 characters in ASCII code); writable after correct password

Characteristic 6	Characteristic added in firmware V2.6
UUID	0xA1EA8136-0E1B-D4A1-B840-63F88C8DA1EA
Name	Non-connectable mode (see Apple iBeacon compatibility)
Description	user has to type 6 character master password to put the Beacon into non-connectable mode
Properties	12 hexadecimal numbers (6 characters in ASCII code); writable after correct password

9.2.3 Advertising packet structure

Byte	Default value	Description	Properties
1	02	Data length – 2 bytes	constant preamble
2	01	Data type – flags	constant preamble
3	06	LE and BR/EDR flag	constant preamble
4	1a	Data length – 26 bytes	constant preamble
5	Ff	Data type - manufacturer specific data	constant preamble
6	4c	Manufacturer data	constant preamble
7	00	Manufacturer data	constant preamble
8	02	Manufacturer data	constant preamble
9	15	Manufacturer data	constant preamble
10	f7	Proximity UUID 1 st byte	set user UUID
11	82	Proximity UUID 2 nd byte	set user UUID
12	6d	Proximity UUID 3 rd byte	set user UUID
13	a6	Proximity UUID 4 th byte	set user UUID
14	4f	Proximity UUID 5 th byte	set user UUID
15	a2	Proximity UUID 6 th byte	set user UUID
16	4e	Proximity UUID 7 th byte	set user UUID
17	98	Proximity UUID 8 th byte	set user UUID
18	80	Proximity UUID 9 th byte	set user UUID
19	24	Proximity UUID 10 th byte	set user UUID
20	Bc	Proximity UUID 11 th byte	set user UUID
21	5b	Proximity UUID 12 th byte	set user UUID
22	71	Proximity UUID 13 th byte	set user UUID
23	e0	Proximity UUID 14 th byte	set user UUID
24	89	Proximity UUID 15 th byte	set user UUID
25	3e	Proximity UUID 16 th byte	set user UUID
26	Xx	Major 1 st byte	set major value
27	Xx	Major 2 nd byte	set major value
28	Xx	Minor 1 st byte	set minor value
29	Xx	Minor 2 nd byte	set minor value
30	b3	Signal power (calibrated RSSI)	signal power value

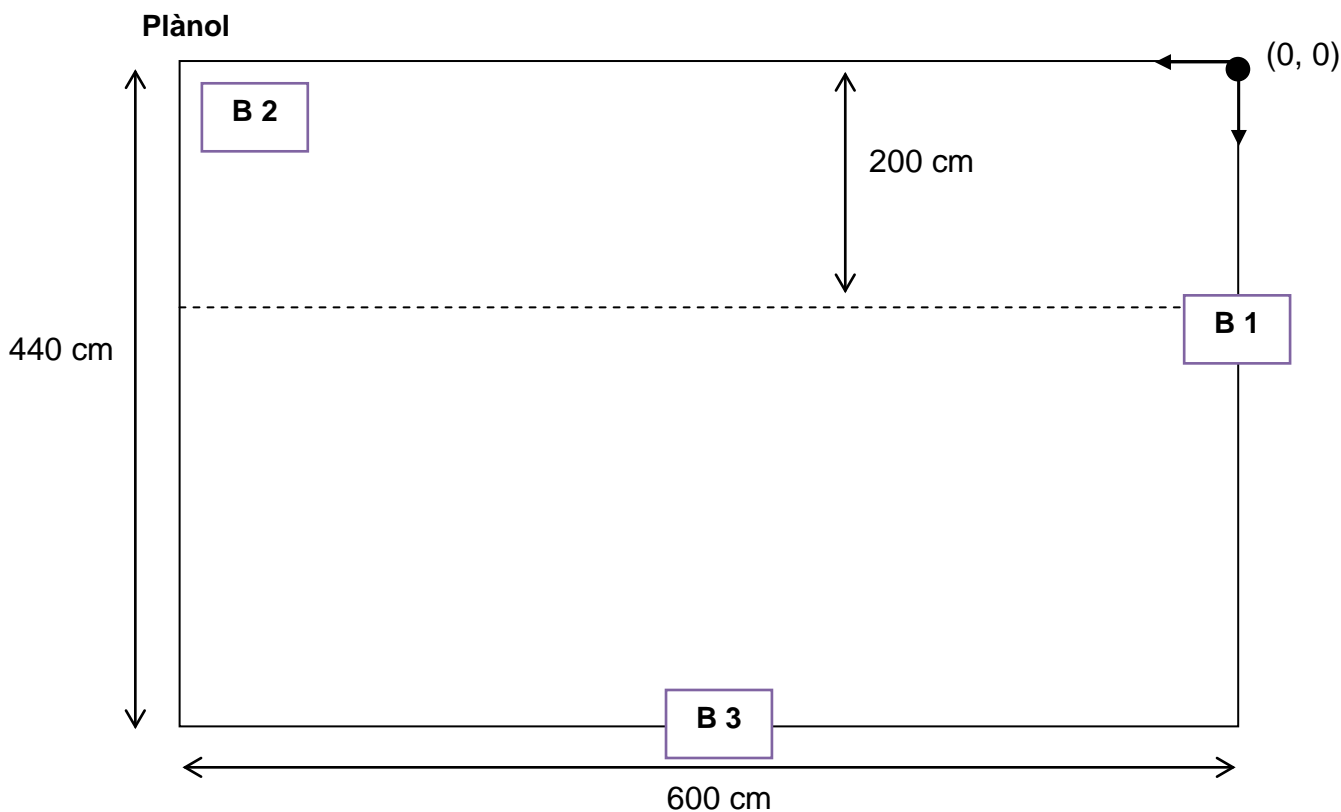
9.2.4 Scan response packet structure

Byte	Default value	Description	Properties
1	08*	Data length – 8 bytes	device name length (max. 15 bytes)
2	09	Data type – complete local name	fixed
3	4b*	Local name	set device name
4	6f*	Local name	set device name
5	6e*	Local name	set device name
6	74*	Local name	set device name
7	61*	Local name	set device name
8	6b*	Local name	set device name
9	74*	Local name	set device name
10	02	Data length – 2 bytes	fixed
11	0a	Data type – tx power level	fixed
12	f4	Tx Power value	set tx power value
13	0a	Data length – 10 bytes	fixed
14	16	Data type – service data	fixed
15	0d	Service UUID	fixed
16	d0	Service UUID	fixed
17	xx	Beacon ID 1 st byte	fixed
18	xx	Beacon ID 2 nd byte	fixed
19	xx	Beacon ID 3 rd byte	fixed
20	xx	Beacon ID 4 th byte	fixed
21	xx	Firmware version 1 st byte	fixed
22	xx	Firmware version 2 nd byte	fixed
23	xx	Battery level	depends on current level

9.3 Descripció dels entorns de test

9.3.1 Plànol i distribució dels dispositius a l'escenari room1

Entorn de test					
Escenari:	Habitació	REF:	room1	Data:	21/04/2015



Posició dels dispositius

ID	Beacon Unique ID	Beacon Address	Posició (cm)		
			x	y	z
B1	V2fJ	D0:F8:F2:95:3A:5C	0	210	180
B2	uCul	D6:40:86:6D:BD:DF	560	40	160
B3	Es2B	D9:A3:28:6A:A7:F1	300	440	180
B4	63Us	F5:7A:A5:E3:EF:18	-	-	-
B5	CthW	FF:A6:7C:AF:B0:CB	-	-	-

9.3.2 Plànol i distribució dels dispositius a l'escenari building1

Entorn de test					
Escenari:	Vivenda	REF:	building1	Data:	08/05/2015

Plànol



Posició dels dispositius

ID	Beacon Unique ID	Beacon Address	Posició (cm)		
			x	y	z
B2	V2fJ	D0:F8:F2:95:3A:5C	975	155	160
B1	uCuI	D6:40:86:6D:BD:DF	250	30	160
B3	Es2B	D9:A3:28:6A:A7:F1	445	560	160
B4	63Us	F5:7A:A5:E3:EF:18	160	920	160
B5	CthW	FF:A6:7C:AF:B0:CB	650	1010	160