

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**POSICIONAMIENTO POR RADIOFRECUENCIA BASADO
EN ROBOTS COLABORATIVOS**

José María Martín Talavera

Octubre 2012

POSICIONAMIENTO POR RADIOFRECUENCIA BASADO EN ROBOTS COLABORATIVOS

AUTOR: José María Martín Talavera
TUTOR: Guillermo González de Rivera Peces

Human Computer Technology Laboratory
Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Octubre de 2012

Resumen

Este proyecto trata sobre la creación de una red inalámbrica de sensores cuya función principal es el auto-posicionamiento de los mismos mediante la medida de la potencia de las señales de radiofrecuencia enviadas entre ellos. La red está formada por cuatro nodos fijos y un robot móvil.

Cada nodo fijo está formado por un módulo de radiofrecuencia y un microprocesador. Por su parte, al robot móvil diseñado se le ha provisto de movilidad mediante el uso de ruedas, motores y encoders de cuadratura que son capaces de leer la cantidad de giro de las ruedas y por ende calcular la distancia de desplazamiento del mismo. Además, también posee un módulo de radiofrecuencia y un microprocesador, que es el encargado de controlar cada una de las partes del robot.

Los nodos de la red de sensores han de ser capaces de posicionarse relativamente en el espacio. Para ello, se sirven del nivel de señal de radiofrecuencia en recepción para calcular la distancia al emisor. La señal de radiofrecuencia sufre pérdidas de potencia en la propagación que dependen, entre otros factores, de la distancia recorrida por dicha señal. El objetivo ha sido encontrar una relación fiable entre la potencia de la señal de RF recibida y la distancia, por lo se ha realizado un profundo análisis del comportamiento de la señal de radiofrecuencia en la propagación. Una vez calculada la distancia entre cada uno de los nodos y haciendo uso del método de trilateración es posible realizar un posicionamiento relativo de los mismos. El algoritmo de posicionamiento utilizado en el sistema ha sido desarrollado por Eloy Anguiano Rey, profesor titular de la Universidad Autónoma de Madrid.

En resumen, el objetivo final del proyecto ha sido el desarrollo de una red inalámbrica de sensores que sea capaz de realizar un posicionamiento relativo de los nodos que la forman mediante la medida de la potencia de la señal de radiofrecuencia que se envían entre ellos de modo colaborativo.

Palabras clave

Red inalámbrica de sensores, nodo, robot, radiofrecuencia, posicionamiento, colaborativo.

Abstract

This project deals with the creation of a wireless sensor network that uses the radiofrequency signal strength indicator to determine the position of each node of the network. The network consists of four fixed nodes and a mobile autonomous robot.

Each fixed node consists of a RF module and a microprocessor. The designed mobile robot has the ability to move by using motors, wheels and quadrature encoders that are capable of measuring the rotation of the wheels and therefore of calculating its displacement distance. Furthermore, it also has an RF module and a microprocessor, which is responsible for controlling each of the parts of the robot.

The main function of the designed sensor network is to locate and position each of its nodes. For this purpose, it uses the radiofrequency signal power received to calculate the distance from the transmitter. The RF signal power suffers losses due to the propagation through the space and it depends, among other effects, on the distance travelled by the wave. A thorough analysis of the behavior of the RF signal propagation was done in order to find a reliable relationship between the power of the RF signal received and the distance. After calculating the distance between each of the nodes, using the trilateration method is possible to carry out a relative positioning. The positioning algorithm used by the system was developed by Eloy Anguiano Rey, professor at the Autonomous University of Madrid.

To sum up, the ultimate goal of the project was to develop a wireless sensor network that would be able to perform a RF-based relative positioning of the nodes by measuring the power of the RF signal sent between them in a collaborative way.

Key words

Wireless sensor network, node, autonomous robot, radiofrequency, positioning, collaborative.

Agradecimientos

En este señalado momento de mi vida académica no quisiera desaprovechar la oportunidad de acordarme de todas las personas que han sido importantes, de una manera u otra, durante este periodo.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor, Guillermo González de Rivera Peces, la oportunidad que me ha brindado de participar en este proyecto tan ilusionante y también por toda la dedicación y conocimientos que me ha transmitido este último año. Quiero recordar la ayuda de vital importancia que me ha presentado Javier Garrido, Alberto, Fernando y, en general, todos los integrantes del HCTLab y por hacer este periodo más ameno. También quiero agradecer todo el esfuerzo y dedicación de Eloy Anguiano durante estos últimos meses de colaboración, ayuda y trabajo codo con codo.

Estos años en la universidad no habrían sido lo mismo sin toda la gente que aquí he conocido, Robertazo, los *Rubenes* (Ibañez y de Sevilla), *Low*, Manzano y el resto de compañeros que han llenado todo este tiempo de buenos momentos y de incontables recuerdos. No puedo dejar de recordar a Eloy, el gran fichaje y descubrimiento de este último año, por todo el tiempo que me ha hecho *perder* y por las *pequeñas* ayudas que me ha prestado. Y por supuesto, quiero resaltar a Pablo y Javi, dos grandes amigos, porque sin ellos, sin duda, este periodo habría sido muy distinto, ya que las risas y todos los grandes momentos no tienen precio.

A Inga, por haber estado junto a mí estos dos últimos años de mi vida y por todas las nuevas experiencias que hemos vivido juntos y todo lo que me está enseñando.

Y por último, pero más importante aún es mi familia: mi padre, mi madre, mi hermana Elena y mi hermano Alberto, por enseñarme el valor del conocimiento, el compromiso y los principios, pero sobre todo porque sin ellos no sería la persona que soy.

A todos, gracias.

José María Martín Talavera
Octubre 2012

INDICE DE CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	3
2 ESTADO DEL ARTE	5
2.1 ROBOTS COLABORATIVOS	5
2.1.1 <i>Introducción</i>	5
2.1.2 <i>Peculiaridades en el uso de robots colaborativos</i>	6
2.1.1 <i>Ventajas en el uso de robots colaborativos.</i>	8
2.1.2 <i>Aplicaciones de los robots colaborativos</i>	8
2.2 SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN BASADOS EN RADIOFRECUENCIA	9
2.2.1 <i>Introducción</i>	9
2.2.2 <i>El problema de la localización en interiores</i>	11
2.2.3 <i>Distintas formas de clasificación</i>	11
2.2.3.1 Según tecnología física que los sustenta	11
2.2.3.2 Magnitud física observable	17
2.2.3.3 Entorno.....	21
2.2.3.4 Localización individual o cooperativa	22
2.2.3.5 Movilidad de nodos.....	23
2.2.4 <i>Métodos de posicionamiento</i>	23
2.2.4.1 Triangulación	23
2.2.4.2 Trilateración	24
2.2.4.3 Mínimo-Máximo	25
2.2.4.4 Fingerprinting o Reconocimiento de patrones	25
2.2.5 <i>Métodos de refinamiento</i>	26
2.2.5.1 Filtro de partículas.....	26
2.2.5.2 Filtro de Kalman	27
2.2.5.3 Algoritmos de Monte Carlo	27
2.2.5.4 Modelos Ocultos de Markov (HMM).....	28
2.2.6 <i>Aplicaciones</i>	28
2.3 RADIOFRECUENCIA	29
2.3.1 <i>Introducción</i>	29
2.3.2 <i>Propagación</i>	29
2.3.3 <i>Modelos de propagación</i>	31
2.3.3.1 Modelos de propagación en interiores	32
2.3.3.2 Modelos de propagación en exteriores.....	33
2.3.4 <i>Diagrama de radiación</i>	33
2.3.5 <i>Definición y medida de RSSI</i>	34
3 DESCRIPCIÓN Y DESARROLLO DEL SISTEMA	37
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA	37
3.2 DESCRIPCIÓN, DISEÑO Y DESARROLLO DEL ROBOT	39
3.2.1 <i>Introducción</i>	39
3.2.2 <i>IGEPv2</i>	41
3.2.2.1 Características generales	42
3.2.2.2 Sistema Operativo	42
3.2.2.3 Método de desarrollo software en IGEPv2	43
3.2.2.4 E/S	45
3.2.3 <i>Módulo de radiofrecuencia o módulo de RF</i>	50
3.2.3.1 Instalación y funcionamiento general del módulo RF.	52
3.2.3.2 Set de instrucciones del módulo de RF.....	53
3.2.3.3 Antena	60
3.2.3.4 Errores de funcionamiento.....	61
3.2.4 <i>Placa auxiliar</i>	66

3.2.4.1 Diseño.....	67
3.2.4.2 Conexión, control de motores y encoders de cuadratura	68
3.2.4.3 Construcción.....	77
3.2.5 <i>Sensores de distancia</i>	79
3.2.6 <i>Motores, encoders de cuadratura y ruedas</i>	80
3.2.7 <i>Ensamblaje final</i>	81
3.2.8 <i>Control software del movimiento del robot</i>	83
3.2.8.1 Control de los motores.....	84
3.2.8.2 Control de los encoders.....	85
3.2.8.3 Funciones de movimiento desarrolladas.....	86
4 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO	93
4.1 INTRODUCCIÓN.....	93
4.2 POSICIONAMIENTO EN 2D	93
4.3 MODELO DE PROPAGACIÓN Y CÁLCULO DE DISTANCIAS	95
4.3.1 <i>Campañas de medidas</i>	95
4.3.2 <i>Análisis de las medidas</i>	112
4.4 ANÁLISIS HEURÍSTICO DEL RSSI.....	118
4.5 ALGORITMO DE POSICIONAMIENTO	124
5 INTEGRACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS	131
5.1 INTRODUCCIÓN.....	131
5.2 PRUEBAS CON CINCO NODOS FIJOS	132
5.3 PRUEBAS CON CUATRO NODOS FIJOS Y UN NODO MÓVIL	137
6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	153
6.1 CONCLUSIONES.....	153
6.2 TRABAJO FUTURO	154
REFERENCIAS	155
ANEXOS	I
A ESQUEMÁTICO PLACA AUXILIAR.....	I
B LAYOUT PLACA AUXILIAR	II

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2-1: ROBOTS COLABORATIVOS. FOOTBALL	6
FIGURA 2-2: ROBOTS INDUSTRIALES.....	9
FIGURA 2-3: SISTEMA MULTI-ROBOT	9
FIGURA 2-4: DIAGRAMA DE BLOQUES DE LOS SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN.....	10
FIGURA 2-5: COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE LOCALIZACIÓN	12
FIGURA 2-6: SISTEMA GPS.....	13
FIGURA 2-7: ESPECTRO DE TRANSMISIÓN DE REDES WI-FI.....	14
FIGURA 2-8: RFID TAG	15
FIGURA 2-9: MAGNITUDES OBSERVABLES	18
FIGURA 2-10: REPRESENTACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN BASADA EN MEDIDA DE RSSI.....	19
FIGURA 2-11: LOCALIZACIÓN BASADA EN MEDIDA DE ÁNGULOS.....	20
FIGURA 2-12: LOCALIZACIÓN BASADA EN CALIDAD DEL ENLACE.....	20
FIGURA 2-13: CLASIFICACIÓN SEGÚN CALIDAD DEL ENLACE.....	21
FIGURA 2-14: EJEMPLO SISTEMA POSICIONAMIENTO BASADO EN CONECTIVIDAD	21
FIGURA 2-15: LOCALIZACIÓN INDIVIDUAL	22
FIGURA 2-16: LOCALIZACIÓN COOPERATIVA.....	22
FIGURA 2-17: TRIANGULACIÓN.....	24
FIGURA 2-18: TRILATERACIÓN.....	24
FIGURA 2-19: ALGORITMO MÍNIMO-MÁXIMO	25
FIGURA 2-20: REFLEXIÓN DE UNA ONDA	30
FIGURA 2-21: MULTITRAYECTO.....	30
FIGURA 2-22: TRAYECTORIAS DE PROPAGACIÓN EN UN ESCENARIO INTERIOR VISTO DE PLANTA..	30
FIGURA 2-23: TRAYECTORIAS DE PROPAGACIÓN EN UN ESCENARIO.....	30
FIGURA 2-24: TRAYECTORIAS POR DIFRACCIÓN	31
FIGURA 2-25: DIAGRAMAS DE RADIACIÓN.....	34

FIGURA 3-1: CUATRO NODOS FIJOS. IGEPV2 Y MÓDULOS DE RF	37
FIGURA 3-2: ROBOT CONSTRUIDO.....	40
FIGURA 3-3:IGEPV2.....	41
FIGURA 3-4: CARACTERÍSTICAS GENERALES DE IGEPV2 EXTRAÍDAS DEL <i>DATASHEET</i> DE IGEPV2 (WWW.IGEP.ES ([17])).	42
FIGURA 3-5: E/S EN IGEPV2	45
FIGURA 3-6: DETALLE CONECTOR J990	47
FIGURA 3-7: CONFIGURACIÓN MULTIPLEXADOR IGEPV2	48
FIGURA 3-8: ESQUEMÁTICO J990. EXTRAÍDO DE LA HOJA DE DATOS DE IGEPV2.....	49
FIGURA 3-9: MÓDULO DE RADIOFRECUENCIA	50
FIGURA 3-10: WM11 Y SU ESQUEMÁTICO	51
FIGURA 3-11: MÓDULO DE RF Y ANTENA.....	53
FIGURA 3-12: ANTENA	60
FIGURA 3-13: DIAGRAMA DE RADIACIÓN OMNIDIRECCIONAL.....	61
FIGURA 3-14: ANALIZADOR LÓGICO	64
FIGURA 3-15: ERROR COMANDO SMQ.....	65
FIGURA 3-16: ERROR COMANDO SMI	65
FIGURA 3-17: PLACA AUXILIAR. IDENTIFICACIÓN COMPONENTES.	67
FIGURA 3-18: ESQUEMÁTICO Y FOOTPRINT CONECTOR J990 PLACA AUXILIAR.....	68
FIGURA 3-19: TXB0104 CONVERSORES DE NIVEL.....	69
FIGURA 3-20: TERMINALES DE DRV8833. EXTRAÍDO DE LA HOJA DE DATOS DE DISPOSITIVO.	69
FIGURA 3-21: PROTOBOARD.....	70
FIGURA 3-22: PLACA PRUEBA DRIVER DRV8833	70
FIGURA 3-23: ESQUEMÁTICO DRV8833 Y CONECTORES RUEDAS.....	71
FIGURA 3-24: ESQUEMÁTICO CIRCUITO CONEXIÓN SENSORES DE DISTANCIA.....	73
FIGURA 3-25: TERMINALES MAX1136.....	73
FIGURA 3-26: TERMINALES PCA9306. EXTRAÍDO DEL <i>DATASHEET</i> DEL DISPOSITIVO.....	74

FIGURA 3-27: ESQUEMA DEL CIRCUITO SENSORES DE DISTANCIA.....	74
FIGURA 3-28: ESQUEMÁTICO CIRCUITO ALIMENTACIÓN	75
FIGURA 3-29: UCC283-ADJ. EXTRAÍDO DE LA HOJA DE DATO DEL DISPOSITIVO.....	76
FIGURA 3-30: CONEXIÓN TÍPICA UCC283-ADJ. EXTRAÍDO DE LA HOJA DE DATOS DEL FABRICANTE	76
FIGURA 3-31: FRESADORA PROTO TM S100.....	77
FIGURA 3-32: PLACA AUXILIAR	78
FIGURA 3-33: SENSOR DE DISTANCIA. EXTRAÍDO DEL <i>DATASHEET</i> DEL SENSOR.	79
FIGURA 3-34: SENSOR MEDIDA DISTANCIA.....	79
FIGURA 3-35: SENSOR DISTANCIA - RELACIÓN $V_{OUT}/DISTANCIA$. EXTRAÍDO DE LA HOJA DE DATOS DEL SENSOR	79
FIGURA 3-36:PACK MOTOR, RUEDA Y ENCODER DE CUADRATURA.	80
FIGURA 3-37: ENCODER DE CUADRATURA.....	80
FIGURA 3-38: MODO DE FUNCIONAMIENTO DE ENCODER DE CUADRATURA	80
FIGURA 3-39: CHASIS ROBOT	82
FIGURA 3-40: ROBOT MONTAJE 1	82
FIGURA 3-41: ROBOT MONTAJE 2.....	82
FIGURA 3-42: ROBOT MONTAJE 3.....	82
FIGURA 3-43: ROBOT DISEÑADO	83
FIGURA 3-44: MÉTODO DE GIRO DEL ROBOT.....	85
FIGURA 3-45: FLUJO FUNCIONES DE MOVIMIENTO DEL ROBOT	87
FIGURA 3-46: GIRO DEL ROBOT.....	88
FIGURA 3-47: OSCILOSCOPIO DIGITAL DL1740E YOKOGAWA.....	89
FIGURA 3-48: SALIDA ESTÁNDAR ENCODER DE CUADRATURA.....	89
FIGURA 3-49: CAPTURA ENCODER PARA 10 CM.....	90
FIGURA 3-50: CAPTURA ENCODER PARA 30 CM.....	91
FIGURA 3-51: PWM A 50%	92

FIGURA 3-52: PWM 65%	92
FIGURA 4-1: ARGUMENTACIÓN POSICIONAMIENTO 2D	93
FIGURA 4-2: EXPERIMENTO 2D	94
FIGURA 4-3: VISTA FRONTAL DEL PASILLO DE LA PLANTA BAJA DEL EDIFICIO C DE LA EPS	96
FIGURA 4-4: VISTA DE PLANTA DEL PASILLO DE LA PLANTA BAJA DEL EDIFICIO C DE LA EPS.	96
FIGURA 4-5: POSICIÓN MÓDULOS RF EN LAS MEDIDAS	97
FIGURA 4-6: VISTA PLANTA DE UNA PORCIÓN DEL PASILLO DEL EDIFICIO C DE LA EPS	97
FIGURA 4-7: MEDIDAS EDIFICIO C EPS A -15 DBM.....	99
FIGURA 4-8: MEDIDAS EDIFICIO C EPS A 0 DBM.....	100
FIGURA 4-9: MEDIDAS EDIFICIO C EPS A 0 DBM.....	101
FIGURA 4-10: TODAS LAS MEDIDAS EN EL EDIFICIO C A 0 DBM	102
FIGURA 4-11: MEDIDAS EDIFICIO C EPS A 10 DBM.....	104
FIGURA 4-12: COMPARACIÓN TRES MEDIDAS EDIFICIO C EPS	105
FIGURA 4-13: ESCENARIO 2. TERRAZA	106
FIGURA 4-14: PLANO PLANTA TERRAZA	106
FIGURA 4-15: COMPARACIÓN EDIFICIO C EPS Y TERRAZA A 10 DBM	108
FIGURA 4-16: TERRAZA A 10 DBM.....	108
FIGURA 4-17: ESCENARIO 3. RECINTO FERIAL DE ALCOBENDAS	109
FIGURA 4-18: MEDIDAS ESPACIO LIBRE A 5 DBM	110
FIGURA 4-19: MEDIDAS ESPACIO LIBRE A 5 DBM	111
FIGURA 4-20: COMPARACIÓN ESPACIO LIBRE A 5 DBM Y EDIFICIO C EPS A 10 DBM	111
FIGURA 4-21: APROXIMACIÓN DE LAS MEDIDAS TOMADAS AL MODELO DE PROPAGACIÓN EN ESPACIO LIBRE	113
FIGURA 4-22: INTERPOLACIÓN PENDIENTE ÚNICA.....	114
FIGURA 4-23: MODELO DE PROPAGACIÓN DE DOBLE PENDIENTE.....	115
FIGURA 4-24: ERRORES ESTIMADOS EN LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN.....	117
FIGURA 4-25: OBJETO LATERAL.....	118

FIGURA 4-26: DIAGRAMA DE RADIACIÓN MODIFICADO.....	120
FIGURA 4-27: COAXIAL ALARGADOR.....	120
FIGURA 4-28: EFECTO ANTENA EN EL PLANO DE MASA	121
FIGURA 4-29: MÓDULOS RF EFECTO JAULA FARADAY	122
FIGURA 4-30: SISTEMA BIESTABLE. ESTADOS TENSIÓN-RELAX.....	125
FIGURA 4-31: DIAGRAMA DE FLUJO DE AGENTES	126
FIGURA 4-32: DIAGRAMA DE ESTADOS DEL SISTEMA TENSIÓN-RELAX	127
FIGURA 4-33: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DE POSICIONAMIENTO DEL NODO MÓVIL ...	129
FIGURA 5-1: PRUEBA FINAL 1 HCTLAB.....	133
FIGURA 5-2: RESULTADOS PRUEBA 1 HCTLAB	134
FIGURA 5-3: PRUEBA FINAL 2 HCTLAB.....	135
FIGURA 5-4: RESULTADOS PRUEBA 2 HCTLAB	136
FIGURA 5-5: ELEVACIÓN ANTENAS NODOS	138
FIGURA 5-6: PRUEBA FINAL 1: POSICIÓN NODOS Y TRAYECTORIA NODO MÓVIL.....	139
FIGURA 5-7: PRUEBA EDIFICIO C EPS. POSICIÓN 1	140
FIGURA 5-8: PRUEBA EDIFICIO C EPS. POSICIÓN 2.....	141
FIGURA 5-9: PRUEBA EDIFICIO C EPS. POSICIÓN 3.....	142
FIGURA 5-10: PRUEBA EDIFICIO C EPS. POSICIÓN 4.....	143
FIGURA 5-11: PRUEBAS EDIFICIO C EPS. POSICIÓN FINAL N° 5	144
FIGURA 5-12: POSICIÓN NODOS Y RECORRIDO ROBOT. ESPACIO LIBRE.....	145
FIGURA 5-13: RESULTADOS ESPACIO LIBRE. POSICIÓN INICIAL.....	146
FIGURA 5-14: RESULTADOS ESPACIO LIBRE. POSICIÓN 2.....	147
FIGURA 5-15: RESULTADOS ESPACIO LIBRE. POSICIÓN 3.....	148
FIGURA 5-16: RESULTADOS ESPACIO LIBRE. POSICIÓN 4.....	149
FIGURA 5-17: RESULTADOS ESPACIO LIBRE. POSICIÓN 5.....	150
FIGURA 5-18: RESULTADOS ESPACIO LIBRE. POSICIÓN 6.....	151

FIGURA 5-19: RESUMEN PRUEBA ESPACIO LIBRE..... 152

INDICE DE TABLAS

TABLA 2-1: CLASIFICACIÓN SEGÚN RANGOS	18
TABLA 2-2: CLASIFICACIÓN SEGÚN FUERZA DE LA SEÑAL	19
TABLA 2-3: ESPECTRO RF	29
TABLA 3-1: SEÑALES CONECTOR J990. EXTRAÍDO DEL <i>DATASHEET</i> DE IGEPv2.....	47
TABLA 3-2: DESCRIPCIÓN WM11. EXTRAÍDO DE LA HOJA DE DATOS DEL DISPOSITIVO.	52
TABLA 3-3: SET DE INSTRUCCIONES DEL WM11. EXTRAÍDO DEL <i>DATASHEET</i> DEL DISPOSITIVO. ...	54
TABLA 3-4: TABLA DE BAUDIOS.....	55
TABLA 3-5: CANALES RF	56
TABLA 3-6: POTENCIA DE EMISIÓN EN WM11	57
TABLA 3-7: LÓGICA DRIVER DRV883	71
TABLA 3-8: CONFIGURACIÓN PWM.....	72
TABLA 3-9: CONFIGURACIÓN GPIO CONTROL ROBOT.....	83
TABLA 3-10: CONTROL PWM DE LOS MOTORES.....	85
TABLA 4-1: MEDIDAS EDIFICIO C EPS A -15 DBM.....	98
TABLA 4-2: MEDIDAS EDIFICIO C EPS A 10 DBM	103
TABLA 4-3: MEDIDAS TERRAZA A 10 DBM	107
TABLA 4-4: ÍNDICE DE PROPAGACIÓN EN DIFERENTES ESCENARIOS	114
TABLA 4-5: COMPARACIÓN INTERPOLACIÓN	116
TABLA 4-6: EMC INTERPOLACIÓN	117
TABLA 4-7: RSSI A DIFERENTES POSICIONES DE LAS ANTENAS.....	119
TABLA 4-8: POTENCIA CALIBRADAS EN MÓDULOS RF	123
TABLA 5-1: PARÁMETROS ELEGIDOS DEL PROGRAMA DE POSICIONAMIENTO.....	132
TABLA 5-2: RELACIÓN RSSI-DISTANCIA HCTLAB	133
TABLA 5-3: RESULTADOS PRUEBA 1 HCTLAB	134
TABLA 5-4: RESULTADOS PRUEBA 2 HCTLAB	136

TABLA 5-5: PRUEBA EDIFICIO C EPS. POSICIÓN 1	140
TABLA 5-6: PRUEBA EDIFICIO C EPS. POSICIÓN 2	141
TABLA 5-7: EDIFICIO C EPS. POSICIÓN 3.....	142
TABLA 5-8: PRUEBA EDIFICIO C EPS. POSICIÓN 4.....	143
TABLA 5-9: PRUEBA EDIFICIO C EPS. POSICIÓN FINAL N° 5	144
TABLA 5-10: RESULTADOS ESPACIO LIBRE. POSICIÓN INICIAL	146
TABLA 5-11: RESULTADOS ESPACIO LIBRE. POSICIÓN 2	147
TABLA 5-12: RESULTADOS ESPACIO LIBRE. POSICIÓN 3	148
TABLA 5-13: RESULTADOS ESPACIO LIBRE. POSICIÓN 4	149
TABLA 5-14: RESULTADOS ESPACIO LIBRE. POSICIÓN 5	150
TABLA 5-15: RESULTADOS ESPACIO LIBRE. POSICIÓN 6	151

1 Introducción

1.1 Motivación

Una de las líneas de investigación del grupo HCTLab (Escuela Politécnica Superior, UAM) se enfoca en el estudio de las redes inalámbricas de sensores con nodos móviles.

Una red de sensores inalámbrica (en inglés: *Wireless Sensor Network* o WSN) está formada por nodos equipados con sensores, que colaboran juntos para llevar a cabo una tarea común. Los nodos se comunican entre ellos o con un ordenador de manera inalámbrica, transmitiendo periódicamente los datos recogidos. Aunque originalmente las redes de sensores inalámbricas se pensaron para nodos fijos, en la actualidad se han desarrollado sistemas con nodos móviles.

Las redes de sensores inalámbricas han ido adquiriendo importancia a lo largo de los últimos años debido a sus numerosas áreas de aplicación. Actualmente son un tema activo de investigación en universidades aunque podemos encontrar algunas aplicaciones comerciales basadas en WSN.

Es de gran interés que los nodos de la red sean capaces de colaborar entre ellos para llevar a cabo las tareas específicas que requiera la aplicación que se le quiera dar en cada caso. Para ello es interesante dotar a cada nodo de la red de una arquitectura modular por capas que permita atribuirles distintas características a cada uno de ellos de una manera simple y sencilla dotándoles de diferentes funciones en cada caso. La localización es imprescindible en las redes de sensores y supone un gran reto encontrar un sistema fiable.

Por otro lado, el amplio despliegue tecnológico que se está produciendo actualmente y la gran expansión de las comunicaciones inalámbricas por radiofrecuencia motivan el estudio de sistemas de posicionamiento haciendo uso de esta tecnología. Los sistemas de posicionamiento basados en la medida de la potencia de la señal de radiofrecuencia poseen ciertas ventajas sobre otro tipo de sistemas de posicionamientos inalámbricos como los ultrasonidos. Éstos necesitan de visión directa (LOS) entre emisor y receptor mientras que la señal de radiofrecuencia es capaz de atravesar obstáculos. Sin embargo, los ultrasonidos, a priori, aportan mayor precisión en el posicionamiento.

1.2 Objetivos

Este PFC se enmarca en un proyecto de más envergadura del grupo de investigación HCTLab. En este proyecto se pretende crear una red inalámbrica de sensores móviles que sean capaces de comunicarse entre ellos sin ninguna información previa del resto. Además, han de poder posicionarse en cualquier tipo de escenario, ya sea interior o exterior, de tal modo que si se fijara una posición fija de referencia se conseguiría un posicionamiento absoluto de cada uno de los nodos en cualquier momento. Por último, los nodos de la red de sensores han de poder colaborar entre ellos para ser usados en diferentes aplicaciones y llevar a cabo diferentes funciones de un modo más óptimo que si lo realizara un único nodo móvil.

En el presente proyecto se ha desarrollado una red inalámbrica de sensores para el auto-posicionamiento de los mismos mediante la medida del nivel de señal de radiofrecuencia enviada entre ellos. La red está formada por cuatro nodos fijos y un robot móvil. Cada uno de los nodos de la red está compuesto por un módulo de radiofrecuencia.

El módulo de RF es una unidad de transmisión y recepción de señales de radiofrecuencia en la banda UHF (*Ultra High Frequency*), exactamente la banda ICM (Industrial, Científica y Médica) Europea en torno a 868Mhz, con un set de instrucciones pre-programadas para su fácil manejo. El diseño de este módulo de RF fue llevado a cabo por Víctor Vaquero durante su periodo de colaboración con el grupo de investigación HCTLab durante los años 2010 y 2011. Él mismo fue el encargado de la construcción de los tres primeros módulos. Los dos módulos de RF restantes, para completar la red de 5 sensores utilizada, han sido construidos durante el desarrollo del proyecto expuesto.

La señal de radiofrecuencia sufre pérdidas de potencia en la propagación que dependen, entre otros factores, de la distancia recorrida por dicha señal. En este proyecto se ha realizado un profundo análisis del comportamiento de la señal de radiofrecuencia en la propagación y su relación con la distancia. El objetivo ha sido encontrar un relación fiable entre la potencia de la señal de RF recibida por un módulo de RF receptor y la distancia que recorre dicha señal y por tanto la distancia a la que se encuentra el modulo de RF emisor. Usando varios módulos de RF (nodos) y calculando la distancia a la que se encuentra cada uno de ellos, se puede realizar un posicionamiento relativo de los mismos mediante la técnica de trilateración (2.2.4.2).

Uno de los nodos usados en la red inalámbrica de sensores es un nodo móvil. Dicho nodo es un robot que ha sido diseñado y construido durante el desarrollo del presente proyecto de acuerdo a las especificaciones que requiere el sistema que se pretende implementar. El robot lleva incorporado uno de los módulos de RF para su comunicación con las estaciones fijas y para poder disponer de la potencia recibida de las señales de RF enviadas por el resto de nodos y así poder calcular distancias, trilaterar y finalmente posicionar relativamente al resto de agentes y así mismo en el espacio.

El algoritmo para el posicionamiento utilizado en el sistema, ha sido desarrollado en colaboración con el Dr. D. Eloy Anguiano Rey, profesor titular de la EPS, autor de los fundamentos teóricos del mismo. El actual proyecto ha colaborado en el desarrollo de las funciones de comunicación del puerto serie entre el módulo de RF y un ordenador, en el desarrollo de la función de trilateración, en las pruebas de comprobación del buen

funcionamiento del algoritmo, la optimización paramétrica y las pruebas finales del mismo.

En resumen, el objetivo final del proyecto ha sido el desarrollo de una red inalámbrica de sensores que sea capaz de realizar un posicionamiento relativo de los nodos que la forman mediante la medida de la potencia de la señal de radiofrecuencia que se envían entre ellos de modo colaborativo.

1.3 Organización de la memoria

Este documento está estructurado en 7 capítulos que se resumen a continuación:

- **Capítulo 1: Introducción.** En este capítulo se detallan los motivos que han impulsado el desarrollo de este proyecto así como los objetivos que se pretenden alcanzar.
- **Capítulo 2: Estado del arte.** Sección dividida en tres grandes bloques: Robots colaborativos, sistemas de localización basados en radiofrecuencia y radiofrecuencia. En el primero se realiza una pequeña aproximación al área de los robots colaborativos. En el segundo se realiza un profundo análisis de los sistemas de localización en general y de los basados en radiofrecuencia en particular. El último capítulo se centra en las señales de radiofrecuencia.
- **Capítulo 3: Descripción general del sistema.** Exposición resumida del presente proyecto y del sistema que se ha implementado.
- **Capítulo 4: Descripción, diseño y desarrollo del robot.** En este capítulo se detallan las fases del diseño, construcción y desarrollo de las funciones de manejo del nodo móvil de la red de sensores inalámbricos.
- **Capítulo 5: Sistema de posicionamiento.** El capítulo 5 describe el método desarrollado para encontrar la relación entre la potencia de la señal de radiofrecuencia recibida y la distancia además de un profundo análisis del comportamiento de la señal de radiofrecuencia. También se describe el algoritmo de posicionamiento utilizado.
- **Capítulo 6: Integración, pruebas y resultados.** Describe las pruebas realizadas del sistema de posicionamiento de la red de nodos inalámbrica así como los resultados obtenidos.
- **Capítulo 7: Conclusiones y trabajo futuro.**

2 Estado del arte

En este capítulo se exponen, de manera resumida, las principales tecnologías en las que se basa el sistema desarrollado en este PFC. Está dividida en tres capítulos: robots colaborativos, sistemas de localización basados en radiofrecuencia y radiofrecuencia.

En el primero de ellos, se introduce a los robots colaborativos y las redes de sensores inalámbricos con el objetivo de conocer más en profundidad este tipo de sistemas ya que son el tema central del proyecto. Se habla sobre las ventajas de estos sistemas, sus aplicaciones y peculiaridades.

La segunda sección se adentra en los sistemas de localización basados en radiofrecuencia, introducción al sistema de posicionamiento que se ha desarrollado en el proyecto. Se presentan diferentes formas de clasificar este tipo de sistemas, se muestran los métodos y algoritmos de posicionamiento más extendidos y las diferentes aplicaciones de uso de estos sistemas.

Por último, se expone la teoría básica necesaria para tratar las señales de radiofrecuencia, las cuales estarán muy presente durante el PFC.

2.1 Robots colaborativos

2.1.1 Introducción

Durante los últimos años, los mayores esfuerzos de la investigación en el área de la robótica estaban enfocados a mejorar la actuación de un robot móvil individual utilizando sensores avanzados, actuadores y algoritmos de control inteligente. Esto estuvo motivado principalmente por la necesidad de realizar tareas complejas requeridas por aplicaciones del mundo real. Como resultado, los robots móviles individuales se han vuelto muy sofisticados. Una alternativa de investigación es utilizar varios robots más simples para lograr tareas complejas por medio del funcionamiento colaborativos. Por lo tanto, la robótica colectiva busca diseñar sistemas compuestos de varios robots capaces de resolver problemas conjuntamente. Esta alternativa ofrece ventajas potenciales en términos de flexibilidad de funcionamiento y tolerancia a fallos debido a la redundancia en el número de robots móviles disponibles.

A medida que el número de robots móviles aumenta, controlar dicho sistema se torna cada vez más complejo. Los métodos para manejar tal complejidad incluyen el control centralizado y el control descentralizado. Más específicamente, en el método de control centralizado todas las funciones de planificación y decisión se realizan en un solo centro de control. Cada robot móvil contiene pocos sensores simples para el control y guiado, el actuador para el funcionamiento, y los medios de comunicación para intercambiar los datos con el centro de control. Todos los movimientos y conflictos entre los múltiples robots móviles se resuelven fácilmente en el centro de control. La desventaja del sistema es que el sistema entero se detiene si hay un fallo en el centro de control. En contraste, un método de control descentralizado consiste en equipar cada robot móvil con múltiples sensores e incluir el controlador para que reconozca su entorno y planifique las

acciones de control. En cualquier situación imprevista, el robot está capacitado para planificar un nuevo camino o encontrar una solución sin esperar órdenes externas. La función del centro de control sólo se limita a la transmisión del flujo de información de los robots y la asignación de tareas del sistema.

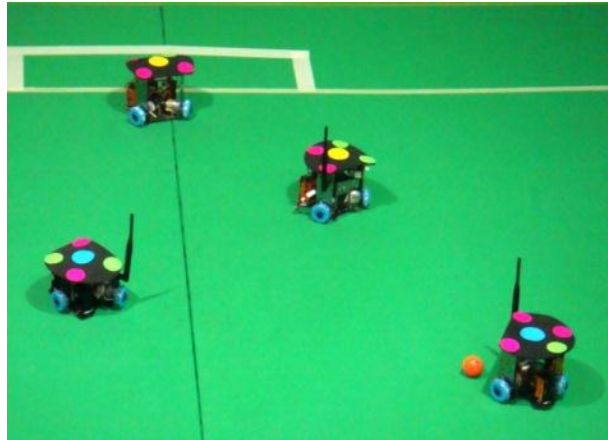


Figura 2-1: Robots colaborativos. Football

Un objetivo primario en el desarrollo de equipos de robots móviles es sintetizar el comportamiento colaborativo de los múltiples robots móviles. Los comportamientos cooperativos habilitan a un equipo de robots móviles a lograr misiones que no se podrían lograr fácilmente con un solo robot, como por ejemplo el transporte de objetos voluminosos, el manejo de material peligroso, la exploración y cobertura de terreno.

El guiado de un robot móvil involucra su localización en el entorno. La localización precisa se vuelve sobre todo pertinente en el caso de compartir múltiples robots móviles un entorno común. Los sensores de odometría junto con la fusión de datos sensoriales es necesaria para obtener la posición y orientación precisa del robot en el entorno.

2.1.2 Peculiaridades en el uso de robots colaborativos

Los sistemas formados por robots colaborativos poseen una serie de características y peculiaridades que los diferencian de otros sistemas independientes y los convierten en soluciones únicas. A continuación se enuncian las claves más relevantes que han aportado las numerosas investigaciones llevadas a cabo en el área:

- La adición de miembros al equipo va a mejorar el desempeño y la eficiencia globales.
- El espacio es un recurso y un objetivo al mismo tiempo. Distribuir a los agentes sobre un terreno y así mismo dividirlo en subregiones de exploración.
- La comunicación es imprescindible para que exista cooperación.
- Capacidad para desarrollar varios tipos de tareas.
- Especialización: mejoramiento en la capacidad de realizar una tarea.
- Todos los robots deben realizar tareas básicas: movimiento y aporte en la construcción del mapa global.
- La falla de un robot no debería implicar la falla de todo el sistema. La redundancia permite que si un agente falla, otro lo remplace.

- División y asignación de tareas y recursos según habilidades y disposición de los robots.
- Mayor eficiencia, equilibrio de carga y reducción de la inactividad de los miembros.
- Necesidad de sincronización.
- A nivel funcional, los agentes deben poseer habilidades acordes con la tarea y el medio en el cual se deben desenvolver. Medios de locomoción adecuados, sistemas sensoriales que beneficien la navegación y la interpretación del mundo, y sistemas de comunicación.
- Es deseable incorporar la capacidad de realizar predicciones sobre diferentes estados futuros.

El diseño de sistemas de multi-robot necesita plantear una serie de problemas que se deben resolver. A continuación se enuncian varios temas que requieren ser tratados durante el diseño de este tipo de sistemas [1]:

- Comportamiento del grupo de robots: Inspiración biológica.
- Comunicación entre agentes.
- Arquitectura del sistema, asignación de tareas y control.
- Localización, mapeo y exploración.
- Transporte de objetos y manipulación.
- Coordinación de movimientos.
- Robots reconfigurables.

Por último, se exponen algunas arquitecturas que pueden formar las redes de robots cooperativos[2].

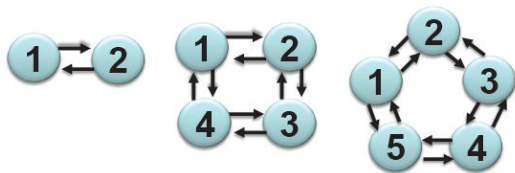


Figura 2-1: Estructura con enlace bidireccional

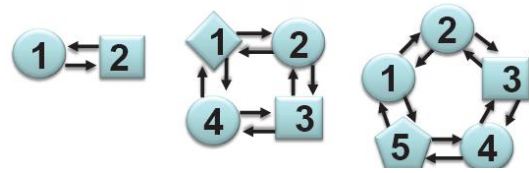


Figura 2-2: Estructura de robots heterogéneos

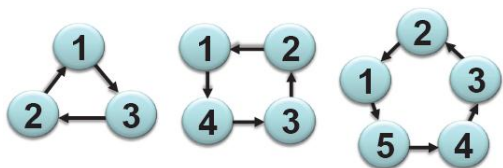


Figura 2-3: Estructura con enlace unidireccional

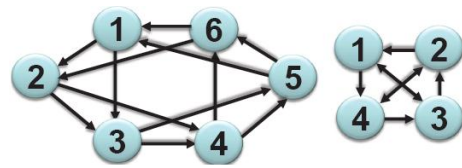


Figura 2-4: Estructura con enlaces bidireccionales y unidireccionales

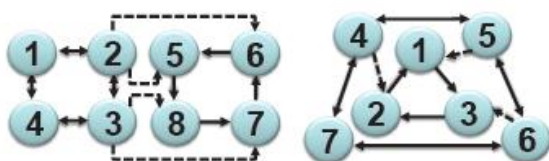


Figura 2-5: Estructuras no balanceadas y estructuras con realimentación



Figura 2-6: Configuración en línea

2.1.1 Ventajas en el uso de robots colaborativos.

El creciente interés en el área de los robots colaborativos se debe a varias razones y a las numerosas ventajas que aporta este tipo de sistemas sobre otros en los que se incluyen robots que trabajan individualmente.

En primer lugar, el uso de robots cooperativos puede aportar grandes beneficios en comparación con el uso de un único robot además de poder realizar tareas que serían muy complejas, o incluso imposibles, para ser resueltas por robots que trabajen individualmente.

En segundo lugar, el trabajo conjunto de varios robots permite llevar a cabo acciones mucho más rápidamente. Si tuviésemos un solo robot, se tendría que encargar de realizar todas las tareas, reconocer el medio, enviar la información, tomar decisiones, controlar su movimiento, etc. Al dividir las tareas entre varios equipos, el trabajo se realiza de una manera más rápida y eficiente.

Una de las mayores virtudes de los sistemas multi-robot es la tolerancia a fallos - redundancia-. Un fallo en el funcionamiento de un robot, puede ser subsanado por el resto del equipo. Por ejemplo, un sistema en el que varios robots buscan una pelota en un recinto. Un robot puede pasar al lado de la pelota y no detectarla, pero un compañero suyo puede detectarla y resolver el error.

Por último, el uso de robots colaborativos puede llegar a ser más sencillo, barato y flexible que el uso de potentes robots separados para realizar tareas diferentes.

2.1.2 Aplicaciones de los robots colaborativos

Existen gran cantidad de utilidades en las que se pueden emplear los robots colaborativos, tantas como se puedan imaginar. Las utilidades más representativas se pueden clasificar de forma general en: asistencia, rescate o exploración. A continuación se exponen alguna de los muchos campos y aplicaciones para los que pueden ser utilizados los sistemas de cooperación multi-robot.

- Actividades industriales: Varios robots coordinados ahorrarán tiempo y dinero en actividades como el montaje de dispositivos, la manipulación de materiales o residuos peligrosos, etc.
- Mapeo de edificios, recintos y estancias.
- Transporte de mercancías en un menor tiempo o transporte de mercancías pesadas o difíciles de transportar por un único robot.
- Vigilancia y seguridad: Cobertura conjunta del área de un modo más flexible y adecuado.
- Recogida de residuos y limpieza de calles o edificios.
- Exploración del terreno en áreas con desastres ambientales o nucleares.
- Exploración del terreno en áreas peligrosas como por ejemplo en territorios minados.
- Exploración del universo y otros planetas.
- Juegos y educación.



Figura 2-2: Robots industriales



Figura 2-3: Sistema multi-robot

2.2 Sistemas de localización basados en radiofrecuencia

2.2.1 Introducción

La era tecnológica en la que nos encontramos ha empezado a demandar aplicaciones que permitan conocer la posición del usuario o de objetos para diferentes fines y entornos. Existe una gran variedad de aplicaciones muy útiles que pueden hacer uso de este tipo de sistemas como por ejemplo el guiado de personas con problemas de movilidad, la monitorización de niños en la guardería, tele-asistencia a ancianos, localización rápida de personal sanitario o equipamiento importante en emergencias así como la vigilancia de ganado.

Existen múltiples métodos para desarrollar sistemas de localización pero, por varias razones, los basados en radiofrecuencia aportan una serie de ventajas sobre el resto. Las señales de radiofrecuencia no necesitan visión directa entre los diferentes agentes del sistema para llevar a cabo la comunicación lo que permite que dichos sistemas puedan trabajar en entornos con movilidad y obstáculos. Esto es una ventaja sobre otras tecnologías como los ultrasonidos o los infrarrojos. Además, actualmente las tecnologías inalámbricas, en especial las basadas en radiofrecuencia, están muy extendidas en todo el mundo gracias a la reciente eclosión que han experimentado. Cualquier aparato que compremos hoy en día posee una antena que nos permite la comunicación con otros usuarios y por lo tanto se puede aprovechar el amplio despliegue que posee. Por otro lado,

la señal de radiofrecuencia también tiene desventajas sobre otras tecnologías como los ultrasonidos ya comentados. En primer lugar, es más inestable y aporta una menor precisión en las medidas pero esto se intenta solucionar con diferentes algoritmos de reducción de error.

El aumento de la demanda de los sistemas de localización ha hecho que numerosas investigaciones se centren en este tema. Aun así, no existe una solución estándar y la investigación por parte de la comunidad científica e industrial sigue siendo muy intensa

En general, cualquier sistema de posicionamiento funciona del siguiente modo:

1. Recepción de la señal de interés a través de los sensores.
2. Algoritmo de posicionamiento.
3. Obtención de la posición y representación.

El siguiente diagrama muestra este funcionamiento[3]:

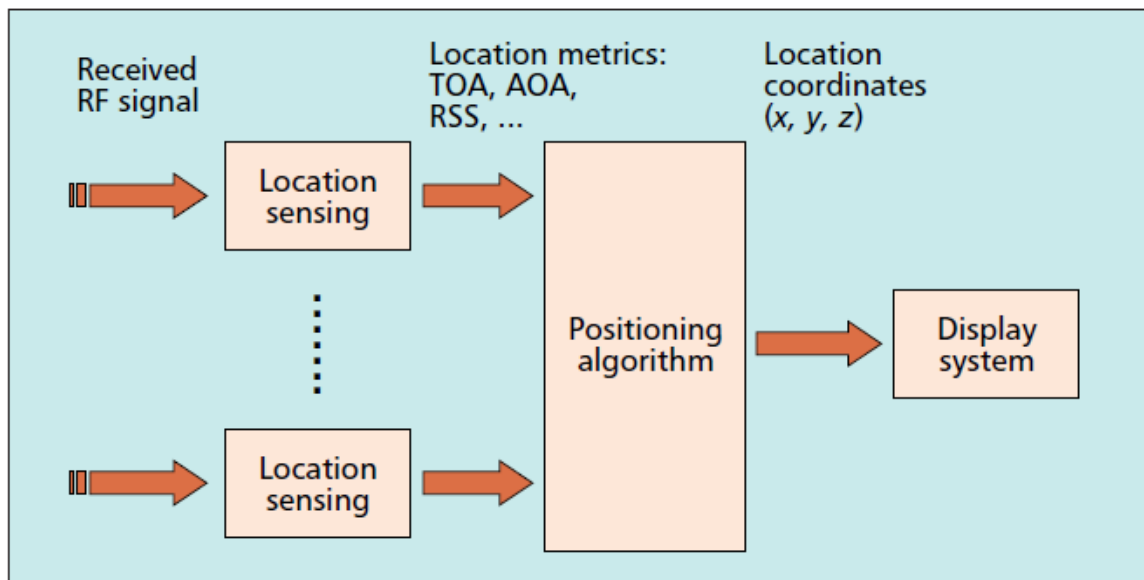


Figura 2-4: Diagrama de bloques de los sistemas de localización

Por último, cabe destacar las diferentes formas que existen para representar la posición de un objeto según [4]:

- *Posición física*, expresada mediante las coordenadas respecto a un sistema de referencia geográfico, por ejemplo, el sistema UTM¹.
- *Posición simbólica*, expresada como una posición en lenguaje natural que caracteriza el lugar donde se sitúa el terminal móvil (por ejemplo, en el despacho, en el pasillo o en el almacén).

¹ Sistema Universal Transverso de Mercator (UTM): sistema de coordenadas que proyecta la longitud y la latitud de un punto de la geografía terrestre sobre un plano, de forma que dicha posición se pueda expresar mediante coordenadas cartesianas.

² Fabricante de productos electrónicos. www.pololu.com

- Posición absoluta, referenciada sobre una rejilla de puntos que comparten todos los objetos a posicionar.
- Posición relativa a otros elementos del sistema.

2.2.2 El problema de la localización en interiores

El sistema de localización por excelencia, el más extendido actualmente y el que todo el mundo conoce y ha usado alguna vez es el GPS (*Global Positioning System*). El GPS es la solución “casi universal” para obtener localización precisa y rápida en cualquier punto del planeta. Lamentablemente, en determinados entornos exteriores, y en la mayoría de los interiores, el GPS no es operativo. Sin embargo, en dichos lugares transcurre gran parte de la actividad humana.

Como podemos observar, la zona de cobertura puede variar desde entornos muy reducidos, como ocurriría en un servicio de localización de personas dependientes en el interior de una residencia, hasta ámbitos muy amplios como sucedería en un servicio de localización de ambulancias a escala nacional. En ambos casos, el objetivo es ofrecer un servicio de localización que mejore las prestaciones del sistema sanitario. El problema del servicio de ámbito nacional está solucionado como hemos visto con el GPS. Sin embargo, para el servicio desarrollado en el interior de la residencia, es necesario desarrollar un sistema de localización apropiado que sea capaz de manejar la complejidad de la estructura propia de un entorno interior.

En otras palabras, desarrollar un sistema de localización para espacios interiores se torna un problema complejo debido entre otras cosas al multitrayecto y las pérdidas por absorción de los obstáculos.

2.2.3 Distintas formas de clasificación

Existen múltiples posibilidades en la clasificación de los sistemas de posicionamiento. A continuación se expone una taxonomía de los diversos sistemas descritos en la literatura, de acuerdo a varios aspectos del diseño.

2.2.3.1 *Según tecnología física que los sustenta*

Investigadores de diferentes universidades del mundo y de la industria han creado un gran número de sistemas de localización que difieren en la precisión que consiguen alcanzar, el área de cobertura, la frecuencia de actualización de la posición y el coste de instalación y mantenimiento. El trabajo que se expondrá a lo largo de este documento intentará crear un sistema de localización ajustado a los requisitos del mismo y procurando encontrar el compromiso óptimo entre las variables citadas.

El artículo publicado por M. Hazas, J. Scott y J. Krumm en 2004 [5] viaja a través de las tecnologías actuales de posicionamiento y las compara en relación a la precisión y el despliegue actual. La siguiente imagen muestra dicha comparación:

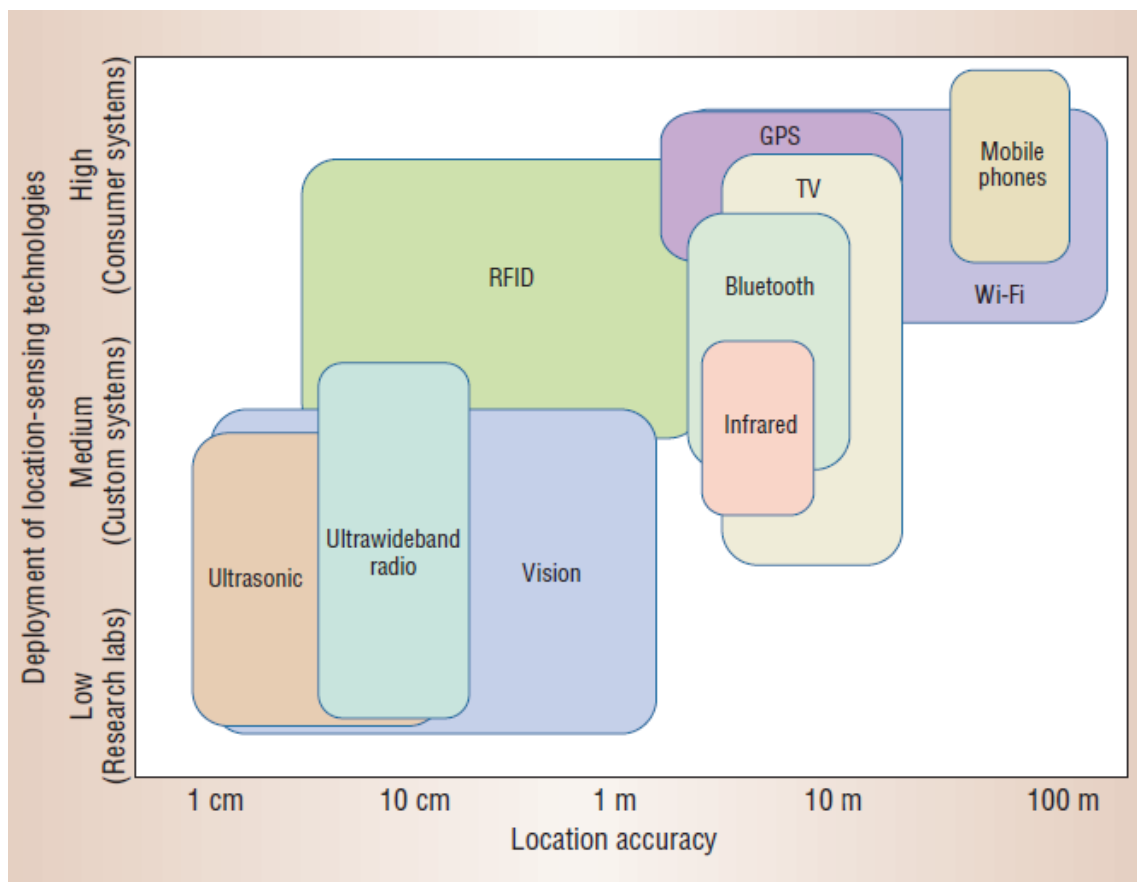


Figura 2-5: Comparación de las tecnologías de localización

Podemos observar como la mayoría de los sistemas con un despliegue más alto tienen una precisión en torno a las decenas de metro. Puede parecer que estos sistemas no arrojan resultados con una buena precisión pero esto no es del todo correcto ya que si se habla de sistemas como el GPS, los teléfonos móviles o la televisión, que tienen un rango de cobertura de muchos kilómetros e incluso que trabajan en todo el globo terrestre, un error de 100 metros es permisible según la aplicación. Por lo tanto, el uso final que se le dará al sistema es quien determina la tolerancia en la precisión.

La mayoría de las tecnologías representadas en la imagen no fueron desarrolladas para ser utilizadas en labores de posicionamiento por lo que exhiben una modesta precisión. Sin embargo 3 de las tecnologías han tenido más en cuenta el objetivo de posicionamiento durante su creación. Estas son: ultrasonidos, visión y *ultra wideband*.

Ahora se expondrá una breve explicación de las tres tecnologías que no encajan en este trabajo, es decir, las tecnologías que no se basan en la radiofrecuencia: ultrasonidos, visión e infrarrojos. El gran inconveniente principal a ellas tres es la obligada necesidad de visión directa (LOS) entre los diferentes agentes del sistema para la comunicación.

En particular, los ultrasonidos usan el método ToA (*Time of Arrival*) para obtener la posición del agente móvil. Es decir, se mide el tiempo de vuelo de la señal ultrasónica y con este dato se puede obtener la distancia haciendo uso de la constante velocidad del sonido.

Por su parte, los sistemas basados en visión suelen utilizar webcams económicas. Tratan de analizar la imagen recibida para hallar la distancia. Se requieren complejos algoritmos de procesamiento de imagen además de necesitar de visión directa entre cámara y objeto a seguir.

Por último, en 1989, Roy Want, Andy Hopper y otros pioneros en el tema lideraron el estudio de la localización en interiores con su sistema Active Badge, basado en infrarrojos. Uno de los inconvenientes de esta tecnología es su corto alcance que es de unos 2 metros.

En las siguientes secciones profundizaremos en las tecnologías basadas en RF para la localización (Figura 2-5) y ya que el objeto de estudio de este documento es un sistema de localización en interiores, se intentarán reflejar las ventajas e inconvenientes para su uso en dichos entornos.

2.2.3.1.1 GPS

El GPS (*Global Positioning System*, sistema de posicionamiento global) o NAVSTAR-GPS es un sistema global de navegación por satélite (GNSS) que permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto, una persona o un vehículo con una precisión hasta de centímetros (si se utiliza GPS diferencial), aunque lo habitual son unos pocos metros de precisión. El sistema fue desarrollado e instalado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos.

El GPS funciona mediante una red de 24 satélites en órbita sobre el globo, a 20.200 km, con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie de la Tierra. Cuando se desea determinar la posición, el receptor que se utiliza para ello localiza automáticamente como mínimo tres satélites de la red, de los que recibe unas señales indicando la identificación y la hora del reloj de cada uno de ellos. Con base en estas señales, el aparato sincroniza el reloj del GPS y calcula el tiempo que tardan en llegar las señales al equipo, y de tal modo mide la distancia al satélite mediante triangulación. Conocidas las distancias, se determina fácilmente la propia posición relativa respecto a los tres satélites. Conociendo además las coordenadas o posición de cada uno de ellos por la señal que emiten, se obtiene la posición absoluta o coordenadas reales del punto de medición (latitud, longitud, altitud). También se consigue una exactitud extrema en el reloj del GPS, similar a la de los relojes atómicos que llevan a bordo cada uno de los satélites.

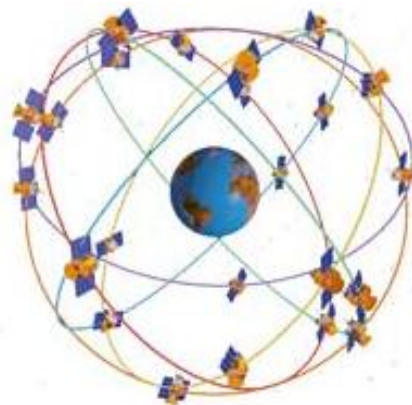


Figura 2-6: Sistema GPS

Uno de los inconvenientes del GPS es que, al necesitar línea de visión directa (LoS), hay veces que no encuentra suficientes satélites al alcance para permitir una localización correcta. Esto puede suceder en ciudades con rascacielos, calles demasiado estrechas, túneles e indudablemente en cualquier entorno interior. Además, las señales de GPS viajan muchos kilómetros y son bastante tenues por lo que si añadimos las pérdidas de la señal al atravesar las paredes de un edificio esta será prácticamente nula. Por otro lado, como su propio nombre indica, el GPS es un sistema de posicionamiento global y no está por tanto indicado para su uso a nivel local.

Existen otros sistemas de navegación global por satélite (GNSS) en competición con el GPS. Su versión rusa es conocida por GLONASS, la República Popular China posee el Beidou y la Unión Europea está desarrollando su propio sistema llamado Galileo.

2.2.3.1.2 802.11

El estándar 'IEEE 802.11' define el uso de los dos niveles inferiores de la arquitectura OSI (capas física y de enlace de datos), especificando sus normas de funcionamiento en una WLAN (*Wireless Local Area Network*).

La comunicación típica del protocolo 802.11 sigue un modelo centralizado. La red consta de uno o varios puntos de acceso (APs) y multitud de clientes conectados a uno de los puntos de acceso. Cada punto de acceso emite periódicamente una señal para hacer notar su presencia a los usuarios (representados por tarjetas inalámbricas), las cuales de este modo pueden saber en todo momento qué redes inalámbricas hay disponibles en su entorno.

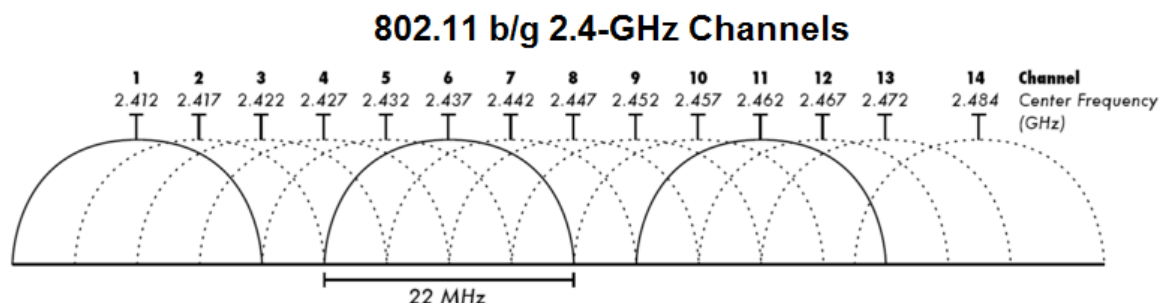


Figura 2-7: Espectro de transmisión de redes Wi-Fi

El nombre comercial Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) hace uso del protocolo 'IEEE 802.11b' y tiene una velocidad de transferencia de 11 Mbit/s. Emite en la banda de 2.4 GHz en uno de los 14 canales solapados entre sí establecidos internacionalmente.

En general, la expansión de las redes WLAN han puesto de relieve el interés en las *Wireless Positioning Systems* (WPS – sistemas de posición inalámbricos) en interiores basados en las infraestructuras WLAN. Este tipo de sistemas intentan averiguar la situación de usuario móvil haciendo uso de los puntos de acceso (APs). Los puntos de acceso reciben el RSSI (*Receive Signal Strength Indication* ó Indicador de Fuerza de Señal de Recepción) (ver 2.3.5) del usuario móvil y averiguan la distancia a la que se encuentra. Mediante triangulación son capaces de localizar localmente al usuario.

La señal Wi-Fi y por lo tanto las señales de los sistemas WPS puede atravesar muros con cierta dificultad por lo que su área de cobertura no puede superar 50 metros y su uso es recomendable para edificios. Observando la Figura 2-5 vemos que los sistemas de posicionamiento en interiores basados en la tecnología Wi-Fi están muy extendidos y ofrecen una precisión de entre 5 y 100 metros pero existen numerosas investigaciones (por ejemplo [6]) que han conseguido reducir esta precisión hasta 1 y 3 metros.

2.2.3.1.3 RFID

En general, RFID (*Radio Frequency IDentification*) es un sistema de almacenamiento y recuperación de datos remoto que usa dispositivos denominados etiquetas, tarjetas, transpondedores o tags RFID. El propósito fundamental de la tecnología RFID es transmitir la identidad de un objeto (similar a un número de serie único) mediante ondas de radio. Las tecnologías RFID se agrupan dentro de las denominadas Auto ID (*Automatic IDentification*, o Identificación Automática).

Las etiquetas RFID son unos dispositivos pequeños, similares a una pegatina, que pueden ser adheridas o incorporadas a un producto, un animal o una persona (Figura 2-8: RFID Tag). Contienen antenas para permitirles recibir y responder a peticiones por radiofrecuencia desde un emisor-receptor RFID. Las etiquetas pasivas no necesitan alimentación eléctrica interna, mientras que las activas (balizas) sí lo requieren.

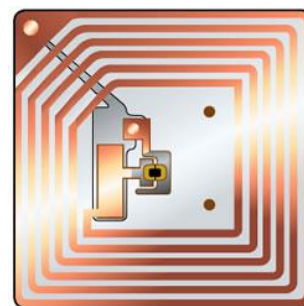


Figura 2-8: RFID Tag

En la actualidad los sistemas RFID se usan en múltiples aplicaciones: desde la identificación de animales, seguimiento de barriles de cerveza, como llave de automóviles con sistema antirrobo, para el seguimiento de libros en bibliotecas, control de acceso en edificios, el seguimiento de equipaje en aerolíneas o almacenamiento de información en pasaportes entre otras. Pero la aplicación más interesante para el trabajo en desarrollo es su uso en sistemas de posicionamiento.

Existen numerosas investigaciones acerca de la localización basados en RFID, uno de los sistemas más conocidos es el SpotON 155 [7]. Este tipo de sistemas suelen basarse en la distribución por todo el área de cobertura (habitualmente un edificio o sala) de un número elevado de balizas que sean capaces de cubrir toda el área. La etiqueta o tag es incorporada al usuario u objeto a seguir y mediante la medida de RSS (*Radio Signal Strength*) y triangulación se halla la distancia al objetivo.

La localización por RFID arroja muy buenos resultados ofreciendo una precisión de centímetros (algunos sistemas han conseguido 2 cm de precisión). El mayor inconveniente es la necesidad de incorporar un elevado número de balizas por todo el área de cobertura, pero si esto no es un problema RFID es un sistema adecuado y muy válido para entornos interiores.

2.2.3.1.4 Teléfonos móviles – GSM

Otro sistema de posicionamiento, que además no necesita ningún hardware adicional, se basa en el uso de la tecnología de los teléfonos móviles. Actualmente existen operadores de telefonía móvil que ofrecen un servicio de localización a sus abonados. Sin embargo, la falta de precisión sitúa a esta tecnología en clara desventaja sobre otras, ya que este tipo de sistemas de localización no ofrecen precisiones mayores de 50 metros (Figura 2-5), aunque Cambridge Positioning Systems ha demostrado precisiones de hasta 20 metros, y por lo tanto no pueden ser utilizados en interiores. Esto es debido a que la localización usando el teléfono móvil (localización GSM) se basa en la detección de la célula a que está conectada el móvil.

2.2.3.1.5 Bluetooth

La tecnología Bluetooth también permite la localización de dispositivos que dispongan de esta tecnología haciendo uso de RSSI (*Receiver Signal Strength Indicator*). El inconveniente de esta tecnología es el corto alcance que permite además de la precisión que podemos conseguir, que está entre 1 y 2 metros.

2.2.3.1.6 Televisión

La gran infraestructura desplegada en el servicio de radiodifusión de la televisión hace posible su uso para la localización. Estudios relacionados hablan de precisiones de entre 3 y 25 metros.

2.2.3.1.7 UWB (*Ultra WideBand*)

Ultra WideBand es una tecnología de radio que utiliza una porción muy grande del espectro radioeléctrico y requiere niveles muy bajos de energía para la comunicación. Trabaja en la banda comprendida entre 3.1 y 10.6 GHz, una banda de más de 7 GHz de anchura, y cada canal dispone de más de 500 MHz, permitiendo de este modo transmitir mayor cantidad de datos en menos tiempo. Una de las aplicaciones con más futuro de esta tecnología es la localización ya que arroja resultados muy precisos [8]. Esto lo consigue gracias a la alta resolución temporal de su señal. Además, gracias al gran ancho de banda, la señal posee un comportamiento muy bueno ante obstáculos consiguiendo gran robustez ante cambios de entorno (puertas, paredes, presencia o movimiento de personas, etc.). Las técnicas de posicionamiento más usadas con esta tecnología son ToA (TDoA) o AoA llegando a conseguir precisiones de hasta 1 metro.

2.2.3.1.8 Otras tecnologías

- **WiMax**

WiMax, siglas de *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (Interoperabilidad mundial para acceso por microondas), es una norma de transmisión de datos que utiliza las ondas de radio en las frecuencias de 2,3 a 3,5 GHz. Es una tecnología

dentro de las conocidas como tecnologías de última milla, también conocidas como bucle local que permite la recepción de datos por microondas y retransmisión por ondas de radio. El protocolo que caracteriza esta tecnología es el IEEE 802.16.

Una de sus ventajas es dar servicios de banda ancha en zonas donde el despliegue de cable o fibra por la baja densidad de población presenta unos costos por usuario muy elevados (zonas rurales). Por lo tanto su área de cobertura es muy amplia, de entre 3 a 50 km, y está experimentando un despliegue importante para abastecer a dichas zonas rurales. Este crecimiento ha propiciado la investigación de sistemas de posicionamiento por medio de esta tecnología.

Evidentemente, su uso queda restringido para áreas muy grandes y no tiene sentido su uso en entornos interiores.

- **ZigBee**

ZigBee es una especificación que define una solución de comunicaciones inalámbricas para su utilización en radiodifusión digital de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (*Wireless Personal Area Network*, WPAN). Su objetivo son las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

Una de las aplicaciones más prometedoras de esta tecnología es la radiolocalización. Diseñando redes de sensores ZigBee se puede conseguir una alta precisión a costa de una mayor inversión en infraestructura.

2.2.3.2 *Magnitud física observable*

Otra manera de clasificar los sistemas de localización es dependiendo de la magnitud física observable, es decir, la magnitud física que vamos a medir para estimar la distancia. Esta magnitud física o señal que vamos a medir siempre estará acompañada por ruido o algún tipo de perturbación que puede provenir de diferentes fuentes dependiendo de los factores que puedan influir como la misma magnitud, el método de medición o los aparatos de medición.

La posición del móvil, x , se estima de manera indirecta a partir de las magnitudes físicas que podemos observar, z , mediante una relación del tipo:

$$z = h(x) + e$$

El diagrama muestra la ecuación $z = h(x) + e$ con tres elementos circunscritos en rojo y etiquetados con líneas que apuntan a ellos: 'Observable' apunta a 'z', 'Error de medida' apunta a 'e', y 'Posición del móvil' apunta a 'x'.

Matemáticamente, el proceso queda caracterizado por: en primer lugar, la relación teórica (en general no lineal) entre posición y magnitud observable, $h(x)$, y en segundo lugar, la función distribución de probabilidad, PDF, del error de la medida:

$$p_e(e) = p_e(z - h(x))$$

La Figura 2-9 muestra los tipos de magnitudes que podemos medir:

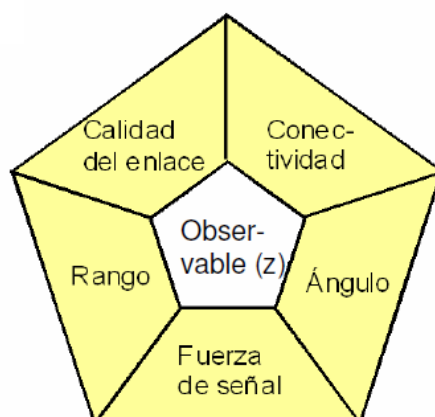


Figura 2-9: Magnitudes observables

2.2.3.2.1 Basados en medida de rangos

En este tipo de medida la magnitud física a medir es el tiempo que tarda la señal en viajar de un punto a otro. Con esta medida y la velocidad a la que viaja la señal por el medio de propagación se obtiene fácilmente la distancia recorrida por la señal y a su vez la distancia a la que se encuentra el objetivo. Luego, haciendo uso del método de trilateración conseguimos posicionar el objetivo en el espacio. Tanto el GPS, los sistemas basados en ultrasonidos o UWB se pueden clasificar en este grupo.

Observable	Situación	Intersección de
TOA, TOF (<i>Time of Arrival/Flight</i>)	Sincronía entre móvil y balizas	Esferas
DTOA (<i>Differential Time of Arrival</i>)	Sincronía entre balizas, pero no con el móvil	Hiperboloides
RTOF (<i>Round-trip Time of Flight</i>)	Sin sincronía	Esferas

Tabla 2-1: Clasificación según rangos

La Tabla 2-1 presenta las posibles técnicas utilizadas en las medidas basadas en rangos. La técnica más usada es ToA o *Time of Arrival* (también conocida como ToF, *Time of Flight*). Como hemos explicado, se mide el tiempo que tarda en viajar la señal desde el receptor al transmisor. Dicha señal suele ser una señal de ultrasonidos o, en ocasiones, de radiofrecuencia si las distancias son muy grandes ya que sería imposible medir los tiempos de propagación de una señal de radiofrecuencia entre dispositivos muy cercanos por el hecho de que no existen aparatos capaces de ello. Ya que la relación entre tiempo de vuelo y distancia recorrida por la señal es lineal, y hace uso únicamente de la velocidad de propagación de la señal por el medio, es posible calcular, con bastante precisión, la distancia entre dispositivos. El inconveniente de esta técnica radica en la necesidad de

sincronización entre receptor y transmisor para poder medir el tiempo con cierta precisión. Para ello se deben dotar a los dispositivos con relojes muy precisos y caros.

2.2.3.2.2 Basados en medida de la fuerza de la señal

La señal de radiofrecuencia sufre atenuación al propagarse por el medio. Esta atenuación o pérdida de potencia de la señal tiene una relación logarítmica con la distancia recorrida. Por lo tanto midiendo el RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) o potencia de la señal recibida se puede calcular la distancia a la que se encuentra el móvil objetivo.

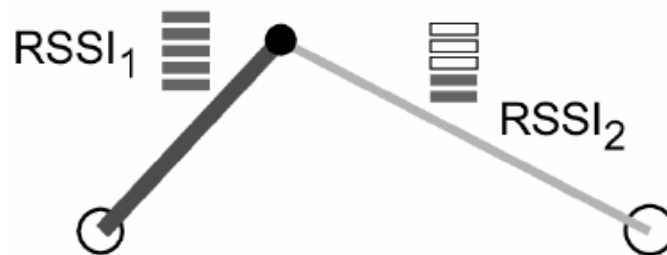


Figura 2-10: Representación de la localización basada en medida de RSSI

Como se ha dicho, existe una relación logarítmica entre potencia recibida y la distancia recorrida, pero esta relación es puramente teórica ya que en la práctica la potencia recibida sufre, además de la atenuación comentada en relación a la distancia, pérdida de potencia por multi-trayecto, reflexiones, difracciones, etc. que dificultan el cálculo preciso de la distancia. Por ello, es necesaria la aplicación de algún algoritmo que mejore la precisión en este tipo de sistemas.

Esta técnica es la usada en el sistema que se ha desarrollado en el proyecto que se está describiendo. En la 2.3 hay una explicación más detallada del modelo de propagación que se utiliza en este tipo de sistemas y una explicación más extensa del RSSI.

Observable	Situación
RSSI (<i>Received Signal Strength Indicator</i>)	<p>Sistemas de comunicación de datos (WiFi, Bluetooth, GSM, etc)</p> <p>Sistemas basados en marcadores RFID</p> <p>No requieren línea de visión entre móvil y balizas</p>

Tabla 2-2: Clasificación según fuerza de la señal

2.2.3.2.3 Basados en la medida de ángulos

Las técnicas de medidas basadas en ángulo tratan de medir el ángulo con que llega la señal para poder hallar la distancia por triangulación y ángulos de otros nodos. Estas técnicas son conocidas como AoA (*Angle of Arrival*) y son comunes en el procesamiento de señales con arrays. En lugar del uso de una sola antena, se despliegan varias antenas de

forma que se pueda inferir el ángulo de llegada de la señal. Aunque el sistema es bastante preciso es necesaria la inversión en infraestructura y arrays de antenas ya que los sistemas convencionales no disponen de dicho hardware.

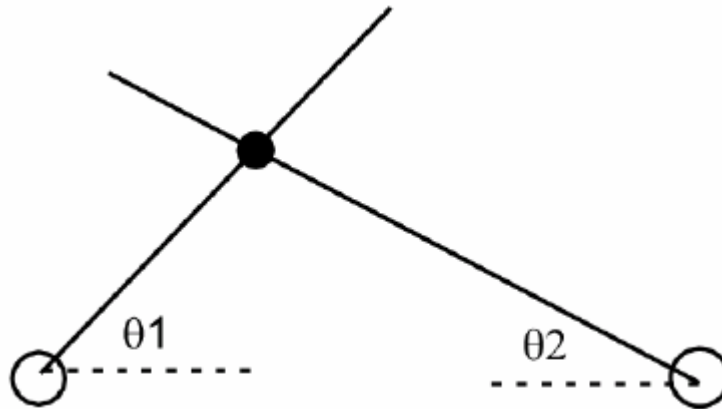


Figura 2-11: Localización basada en medida de ángulos

La técnica del ángulo de llegada es efectiva sólo cuando no hay multitrayecto, porque en caso de haberlo se puede pensar que la señal viene de otro lugar al medir el ángulo de una señal reflejada. Por ello, se necesita normalmente LOS (*Line Of Sight*), entornos muy despejados como zonas rurales y suelen ser muy sensibles a variaciones de la orientación de la antena emisora provocadas por el viento o tormentas.

2.2.3.2.4 Basados en calidad del enlace

Esta técnica evalúa la calidad del enlace y suele medir la tasa de errores de comunicación, que será mayor a mayor distancia y menor cuando transmisor y receptor se encuentren a menos distancia.

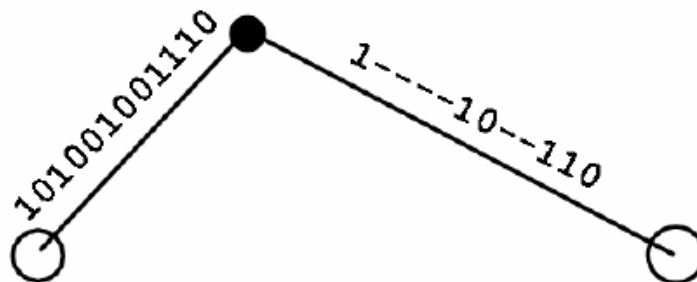


Figura 2-12: Localización basada en calidad del enlace

Este tipo de técnicas no suele dar buenos resultados ya que no existe una relación directa entre errores y distancia. Permite conocer la ubicación simbólica, es decir, quien está cerca o quien está lejos. Suele hacer uso de la medida de *BER* (*Bit Error Rate*), que es el número de bits o bloques incorrectamente recibidos con respecto al total de bits o bloques enviados.

Observable	Situación
LQI (<i>Link Quality Indicator</i>) BER (<i>Bit Error Rate</i>)	Sistemas de comunicación de datos

Figura 2-13: Clasificación según calidad del enlace

2.2.3.2.5 Basados en conectividad

Se basan en la medida de conexión del enlace, es decir, si existe conectividad para una estación base determinada o de otro modo y si pertenece a una celda o no. Por lo tanto, pueden conocer la ubicación simbólica del objeto, pueden saber si pertenece a una celda o no. Si pertenece a dicha celda se puede asegurar que su situación está dentro del área de cobertura de dicha estación. Este tipo de técnica es usada, por ejemplo, por sistemas de posicionamiento de telefonía móvil, redes de sensores inalámbricos o sistemas acústicos/ultrasonidos.

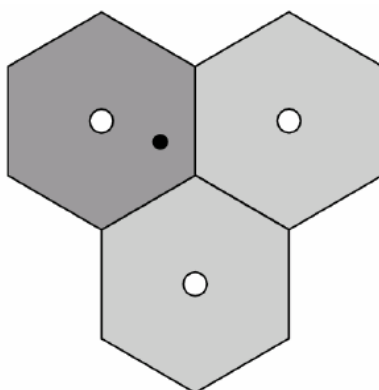


Figura 2-14: Ejemplo sistema posicionamiento basado en conectividad

2.2.3.3 Entorno

Dependiendo de las características de los sistemas de localización y de la tecnología que usan se pueden clasificar según el entorno en el que pueden actuar: entornos exteriores o interiores.

Los sistemas pensados para entornos exteriores suelen tener un radio de cobertura muy grande y la mayoría están basados en la tecnología radio ya que proporciona mayor alcance. La precisión absoluta que habitualmente ofrecen no es muy buena pero considerando el entorno de actuación la precisión relativa suele ser alta además de aceptable en relación al área de cobertura. Un ejemplo de sistema pensado para exteriores es el GPS.

Se denominan entornos interiores a los entornos que comprenden el interior de edificios. Este tipo de sistemas usan tecnologías de corto alcance como los ultrasonidos o tecnologías que no necesitan de visión directa (LOS – *Line Of Sight*) para poder localizar

objetos en otras estancias del mismo edificio atravesando obstáculos como columnas o paredes. Los sistemas basados en radiofrecuencia cuentan con estas características y un ejemplo de sistema es la localización Wifi.

2.2.3.4 Localización individual o cooperativa

Los sistemas de localización tienen otra forma de clasificación: localización individual o localización cooperativa.

En los sistemas de localización individual, también conocidos como sistemas de localización *one-hop*, el nodo móvil (MS) tiene acceso directo a un número suficiente de estaciones base (BSi) cuya posición es conocida. De este modo puede calcular su posición de forma individual. La Figura 2-15 muestra un esquema de este tipo de sistemas.

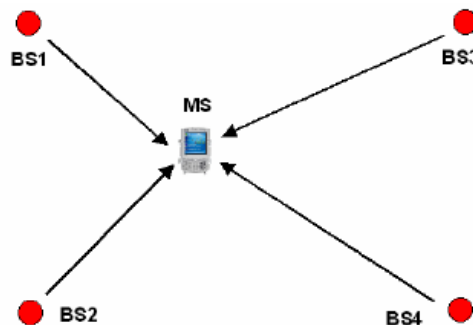


Figura 2-15: Localización individual

Si el nodo móvil (MSi) sólo dispone de acceso a las estaciones base (BSi) a través de otros nodos móviles, toda la red debe estimar su posición de forma cooperativa. Este tipo de sistemas se denominan sistemas de localización cooperativa o multi-hop. Habitualmente el cómputo de la localización se distribuye por la red. El sistema que se pretende presentar en este documento se enmarca en este tipo de sistemas, los sistemas colaborativos. La siguiente figura muestra un esquema detallado de estos sistemas.

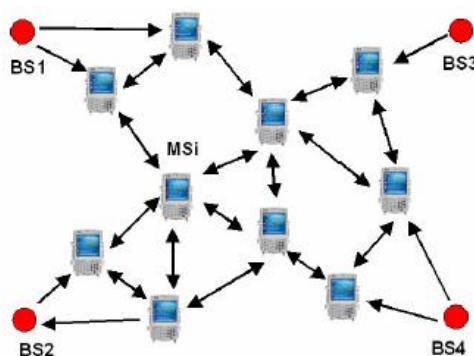


Figura 2-16: Localización cooperativa

2.2.3.5 *Movilidad de nodos*

Analizando la movilidad de los nodos del sistema se puede establecer una nueva clasificación:

- Sistema con nodos fijos. Parte de los nodos pueden ser estáticos y estar fijos a las paredes o techos de un edificio. Este tipo de nodos son denominados balizas. El sistema RFID es un ejemplo de sistema con nodos fijos.
- Sistema con todos los nodos móviles. Si los nodos son totalmente reubicables ya que forman parte de elementos móviles (PDA, portátil, tarjeta, pulsera,...), pero a su vez contribuyen como un nodo sensorial más dentro de la red para localizarse él y para ayudar a que otro se localice. El sistema de localización en torno al que gira este trabajo se clasifica en este grupo.

2.2.4 Métodos de posicionamiento

Las tecnologías usadas en los sistemas de posicionamiento basados en radiofrecuencia se fundamentan en la medida de alguna magnitud de la comunicación inalámbrica. Con esta medida, se puede inferir algún dato de la localización del nodo como puede ser la distancia o el ángulo a la que se encuentra, pero el objetivo final es obtener la posición absoluta o relativa de dicho nodo en el entorno. Para ello, existen numerosos algoritmos de posicionamiento que nos ayudan en esta tarea. A continuación, se enuncian los métodos de posicionamiento más populares.

2.2.4.1 *Triangulación*

Este método basa la localización del nodo móvil en la capacidad del receptor de conocer los ángulos de recepción de las señales de localización y en el conocimiento de la posición de los emisores. Los principales inconvenientes de este método son la forma de calcular, de manera precisa, el ángulo con el que el emisor está enviando su señal, ya que se requieren sistemas de antenas direccionales muy precisas. La Figura 2-17 muestra el principio de cálculo de la posición utilizado por el método de triangulación. Se conocen las posiciones de los nodos A y B y se pretende hallar la posición de un nodo C. Los receptores A y B son capaces de detectar el ángulo con el que les llega la señal; al nodo A le llega con un ángulo α y al nodo B le llega con un ángulo β . Hallando la distancia d se habrá posicionado localmente el nodo C. Dicha distancia se halla usando la siguiente fórmula trigonométrica:

$$d = \frac{l}{\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta}}$$

, siendo l la longitud conocida entre los nodos A y B.

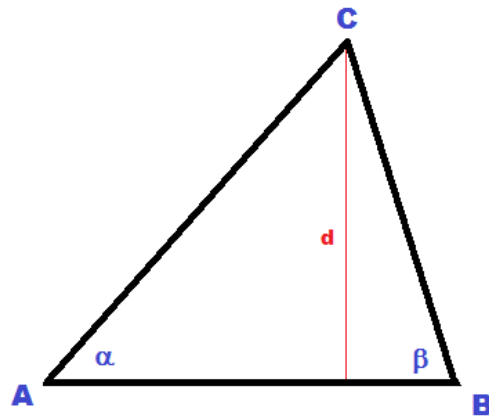


Figura 2-17: Triangulación

2.2.4.2 Trilateración

Este método se basa en obtener las distancias absolutas a cada emisor y calcular la posición del receptor basándose en estos datos. Para ello, es necesario conocer la posición de los emisores y ser capaz de calcular las distancias a través de la magnitud física medida de la señal. Esta magnitud puede ser tiempo (ToA) o potencia (RSSI).

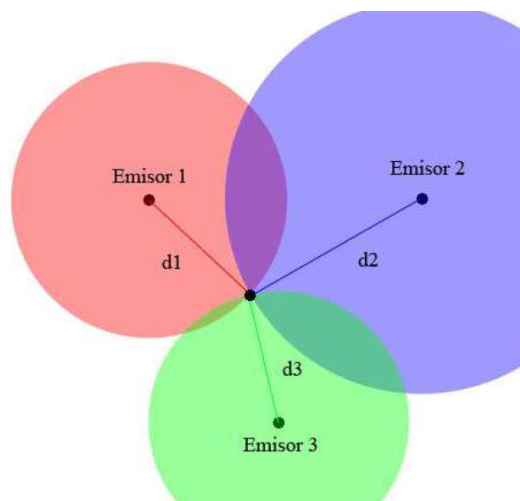


Figura 2-18: Trilateración

El método se puede resumir como sigue. El receptor obtiene la distancia 'dx' a la que se encuentra uno de los emisores; traza una circunferencia alrededor del emisor de radio dx; el receptor puede estar en cualquier punto de dicha circunferencia si la medida de la distancia es correcta; halla la distancia y traza la circunferencia para el resto de emisores; mediante la intersección de las tres circunferencias es posible calcular la posición del receptor. La Figura 2-18 muestra la representación de este método.

Si consideramos que uno de los emisores está en las coordenadas (0,0), el segundo emisor está en las coordenadas (a, 0) y el tercer emisor está en las coordenadas (c, b), entonces, la posición en la que se encuentra el receptor es:

$$x = \frac{d_1^2 - d_2^2 + a^2}{2a} \quad y = \frac{c^2 + b^2 + d_1^2 - d_3^2}{2b} - \frac{c \cdot x}{b}$$

Este método es utilizado en la gran mayoría de algoritmos de posicionamiento.

2.2.4.3 *Mínimo-Máximo*

Este método tiene similitudes con el método de trilateración. Su funcionamiento se basa también en hallar la distancia de cada uno de las estaciones base al nodo móvil mediante la medición de alguna magnitud física de la comunicación inalámbrica. Cada estación base traza un cuadrado de lado el doble de su distancia al nodo móvil y cuyo centro es él mismo. Sobreponiendo todos los cuadrados se puede obtener el área de un rectángulo delimitado por todos los cuadrados. La Figura 2-19 muestra la representación de una situación particular donde se usa el algoritmo Mínimo-Máximo para localizar un nodo móvil. Dentro del nuevo rectángulo obtenido debe estar el nodo móvil. Para decidir donde se encuentra exactamente calculamos el centroide (o baricentro) de dicho rectángulo.

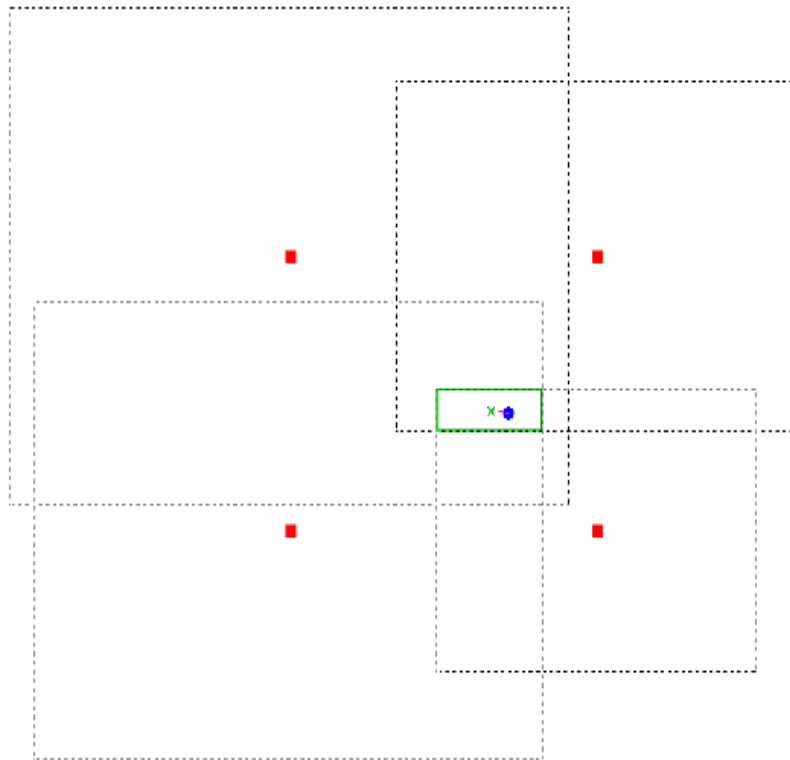


Figura 2-19: Algoritmo Mínimo-Máximo

2.2.4.4 *Fingerprinting o Reconocimiento de patrones*

Las técnicas de reconocimiento de patrones o *fingerprinting* comparan el vector de potencias recibidas (RSSI) procedente de varias estaciones locales con una muestra de calibración para decidir en qué zona o posición se encuentra el nodo móvil, sin necesidad de usar algoritmos geométricos.

Antes de comenzar a usar este método es necesaria una preparación y adecuación del algoritmo al entorno. En primer lugar, se ha de obtener un radio-mapa patrón del área de trabajo que es en realidad una base de datos con la siguiente información: la potencia recibida (RSSI) de cada punto de acceso correspondiente a cada posición del área de trabajo. Es decir, una tabla con las potencias recibidas donde las filas representan las

diferentes posiciones del edificio(a mayor número de posiciones mayor precisión pero mayor coste computacional y de almacenamiento) y donde las columnas representan las estaciones base. Las RSSI se pueden calcular con un modelo teórico o bien de forma práctica grabando en cada punto de interés la potencia recibida.

Una vez hemos preparado el algoritmo, su modo de funcionamiento se funda en, dado un vector de potencias, encontrar la localización que tenga el vector de potencias más parecido. El mayor reto de estos algoritmos es diferenciar entre dos posiciones con vectores de potencia similares.

La ventaja de este método frente a los anteriores es que los cálculos son más reducidos. El mayor inconveniente es que la discretización del entorno hace perder precisión con respecto a los otros métodos que permiten hallar la posición en cualquier punto del espacio. Por lo tanto, a mayor discretización del espacio mayor grado de precisión pero mayor tiempo de cómputo y almacenamiento.

Existen varios algoritmos basados en la técnica de reconocimiento de patrones o *fingerprinting*. Lo más populares son los siguientes:

- *K-Nearest Neighbors*
- *Weighted K-Nearest Neighbors*
- Red bayesiana o *Nibble*
- *Support Vector Machines*

2.2.5 Métodos de refinamiento

Los métodos de posicionamiento permiten localizar el nodo móvil en el entorno pero no tienen en cuenta el error que se haya podido cometer en la medida u otros aspectos que reduzcan la precisión del sistema. La medida de la magnitud física, como hemos visto en capítulos anteriores, es influenciada por otros fenómenos de la comunicación: multitrayecto, ruido, perturbaciones, pérdidas por obstáculos, movimiento de personas, interferencia con otros sistemas inalámbricos, etc.; por lo que la medida siempre tendrá parte de error aditivo que empeorará la precisión de nuestro sistema. Para mejorar dicha precisión existen numerosos algoritmos capaces de reducir el error mejorando el posicionamiento. A continuación, se exponen los algoritmos más utilizados en los sistemas de localización más novedosos.

2.2.5.1 Filtro de partículas

El filtro de partículas [8] es una técnica que implementa un filtro Bayesiano recursivo y tiene como principal objetivo realizar el seguimiento de una variable de interés, en este caso la posición del terminal móvil, y su evolución en el tiempo. El estado del sistema se representa por un conjunto finito de muestras (llamadas partículas) que a su vez, cada una representa una hipotética posición ponderada. Las acciones del terminal móvil modifican el estado del sistema siguiendo un modelo predefinido. Cada cierto tiempo se obtienen observaciones que comprueban el estado de la posición del móvil. El algoritmo del filtro de partículas es recursivo y opera en dos fases: predicción y actualización. En la fase de predicción cada partícula se modifica de acuerdo al modelo existente, incluyendo una

aportación de ruido aleatorio para simular el efecto del ruido en la variable de interés. Luego, se pasa a la etapa de actualización donde el peso de cada partícula es evaluado basándose en la última información de observación disponible. En cada iteración, las partículas con un peso muy bajo se eliminan y se realiza un nuevo muestreo.

2.2.5.2 *Filtro de Kalman*

En el año 1958, Rudolf E. Kalman publicó un artículo titulado “A new Approach to Linear Filtering and Prediction Problems” [9]. En este trabajo el autor presentaba un novedoso método de filtrado de información para resolver problemas relacionados con medidas con cierto grado de aleatoriedad.

El filtro Kalman es un algoritmo de procesado de datos óptimo recursivo. Óptimo porque minimiza un criterio determinado y porque incorpora toda la información que se le suministra para determinar el filtrado. Recursivo porque no precisa mantener los datos previos, lo que facilita su implementación en sistemas de procesado en tiempo real. Por último, algoritmo de procesado de datos, ya que es un filtro, pensado para sistemas discretos.

Este filtro se basa en estimar la cantidad de veracidad del fenómeno observado tanto por las medidas tomadas como por el conocimiento a priori del fenómeno citado. El procesado de los datos se lleva a cabo en dos etapas.

- Etapa de actualización, donde una función predice el estado del filtro de Kalman, proyectando que cantidad de información es verdad para futuras estimaciones. Durante esta etapa nuevos datos son almacenados por medio de mediciones.
- Actualización de las medidas, donde los datos almacenados en el paso anterior son ponderados por un coeficiente llamado *Kalman Gain*, determinando la cantidad de información veraz observada.

Las ventajas del filtro de Kalman son: a) no necesita almacenar información pasada (ahorro de espacio de memoria) y b) es adaptativo, es decir, después de un ajuste inicial obtiene una salida óptima en la mayoría de situaciones. El inconveniente que presenta es el coste computacional.

2.2.5.3 *Algoritmos de Monte Carlo*

El sistema de localización de Monte Carlo es una forma de filtro de Bayes dentro del contexto de la localización. Emplea un filtro de partículas para mantener una distribución de probabilidad sobre todas las posibles posiciones. Dicha probabilidad asociada con cada posición, se interpreta como el grado de confianza de que el terminal se encuentre en dicha posición en un momento determinado. Esta distribución de confianza se actualiza en respuesta a una nueva observación del sensor.

2.2.5.4 *Modelos Ocultos de Markov (HMM)*

El algoritmo basado en HMM (*Hidden Markov Models*) presenta un conjunto de estados, correspondientes a las posiciones de terminal móvil, y observaciones que se modelan de la misma manera en los filtros de Kalman, pero además se añade una matriz de probabilidad de transición que indica la probabilidad de pasar de un estado a otro. Esta matriz se inicializa suponiendo que dicha probabilidad es mayor entre estados adyacentes ya que representa el movimiento de un usuario que se desplaza de forma lenta. Así mismo, en el contexto de la localización, con este modelo se pueden modelar de forma muy natural las paredes y puertas, ya que entre dos habitaciones no comunicadas entre sí por estar separadas por una pared, la probabilidad de transición será 0, mientras que la probabilidad de ir de una habitación a otra, las cuales están separadas por una puerta, será no nula.

2.2.6 Aplicaciones

Tal y como se expresa en la definición, el objetivo de un sistema de localización es proporcionar información sobre la localización de uno o varios terminales móviles en un área determinada. Esta necesidad surge a partir de la proliferación de las aplicaciones móviles y el auge de las comunicaciones inalámbricas que en multitud de ocasiones precisan del conocimiento de la posición del usuario para llevar a cabo de forma adecuada el servicio para el que están diseñadas. Dependiendo del área de cobertura que abarque la aplicación, podemos diferenciar, como hemos descrito en capítulos anteriores, dos escenarios: interiores y exteriores.

Las aplicaciones diseñadas para escenarios exteriores tienen resuelto el problema con sistemas como el GPS y sus aplicaciones son muy variadas, como la localización de ambulancias a escala nacional o el seguimiento de ganado en áreas extensas y/o montañosas donde sea difícil su localización.

Dado el carácter del proyecto que se trata en este documento, es más interesante el análisis de los sistemas de localización en interiores. Entre las aplicaciones potenciales que tienen este tipo de sistemas, destacan las sociales, las comerciales y las de seguridad. Entre las primeras podemos destacar el seguimiento de personas con necesidades especiales en residencias, la localización inmediata de médicos o equipamiento importante en situaciones de emergencias en un hospital de grandes dimensiones, la monitorización de niños en guarderías o el guiado de personas discapacitadas a través de las instalaciones de un edificio.

Dentro de las aplicaciones comerciales se debe resaltar su posible uso en la localización de materiales diversos y control de *stock* en almacenes, el control de carros en supermercados, el estudio de pautas de desplazamiento de clientes en grandes superficies, el seguimiento de los usuarios en museos para ofrecer información basada en la posición, en aplicaciones del campo de la domótica como su utilización en entornos conscientes del usuario o en peajes y controles de acceso.

De las aplicaciones empleadas en el campo de la seguridad, cabe destacar la localización de personal en misiones de emergencia, como bomberos, policías o soldados o el seguimiento de robots de vigilancia.

Como se puede comprobar, los sistemas de localización se pueden emplear en un gran número de aplicaciones que optimizarían muchas tareas ahorrando energía y tiempo y facilitaría y mejoraría la calidad de la vida diaria de muchas personas. Con el paso del tiempo y el desarrollo de nuevas tecnologías la necesidad de aplicaciones que precisen del conocimiento de la posición del usuario irá en aumento y por ello es de gran interés su estudio e investigación.

2.3 Radiofrecuencia

2.3.1 Introducción

El término radiofrecuencia, también denominado espectro de radiofrecuencia o RF, se aplica a la porción del espectro electromagnético situada entre unos 3 kHz y unos 300 GHz. El hercio es la unidad de medida de la frecuencia de las ondas, y corresponde a un ciclo por segundo. Las ondas electromagnéticas de esta región del espectro, se pueden transmitir aplicando la corriente alterna originada en un generador a una antena.

No. de banda	Banda de frecuencias	Longitudes de onda	Denominación
4	3/30 kHz	100/10 km	VLF (Muy baja frecuencia) Ondas miriámétricas
5	30/300 kHz	10/1 km	LF (baja frecuencia) Ondas kilométricas
6	300/3 000 kHz	1 00/100 m	MF (Media frecuencia) Ondas hectométricas
7	3/30 MHz	100/10 m	HF (Alta frecuencia) Ondas decamétricas
8	30/300 MHz	10/1 m	VHF (Muy alta frecuencia) Ondas métricas
9	300/3 000 MHz	100/10 cm	UHF (Ultra alta frecuencia) Ondas decimétricas
10	3/30 GHz	10/1 cm	SHF (Super alta frecuencia) Ondas centimétricas
11	30/300 GHz	10/10 mm	EHF (Extemadamente alta frecuencia) Ondas milimétricas
12	300/3 000 GHz	1/0,1 mm	Ondas decimilimétricas

Tabla 2-3: Espectro RF

El sistema que se desarrolla en este documento utiliza señales de radiofrecuencia pertenecientes a la banda UHF ya que están centradas alrededor de los 869 MHz.

2.3.2 Propagación

Se llama propagación al conjunto de fenómenos físicos que conducen a las ondas del transmisor al receptor. Cuando una onda de radio choca con un obstáculo, parte de la onda se refleja y experimenta una cierta pérdida de la intensidad. Este fenómeno denominado reflexión hace que el ángulo de la onda incidente sea equivalente al ángulo de la onda reflejada.



Figura 2-20: Reflexión de una onda

Por definición, una onda de radio es susceptible de propagarse en varias direcciones. Después de reflejarse varias veces, una señal de origen puede llegar a una estación o punto de acceso después de tomar muchas rutas diferentes llamadas multitrayecto. Conforme aumenta la directividad de las antenas, la trayectoria principal tiene más intensidad respecto del resto de trayectorias, y las pérdidas serán parecidas a las producidas en espacio libre, mientras las otras se desviarán más o menos de las mismas.

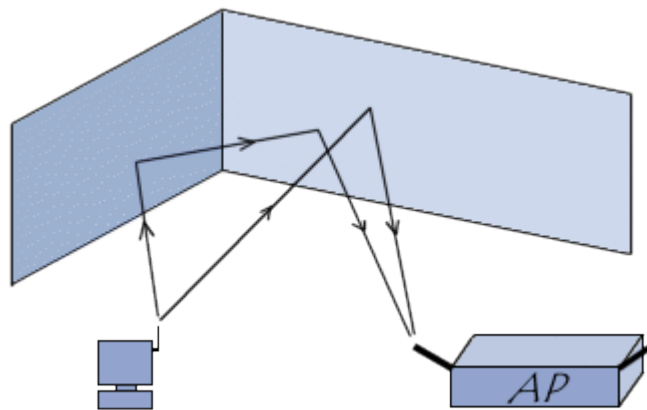


Figura 2-21: Multitrayecto

En el caso de los escenarios en interiores, la situación general es tener 9 trayectorias de propagación significativas:

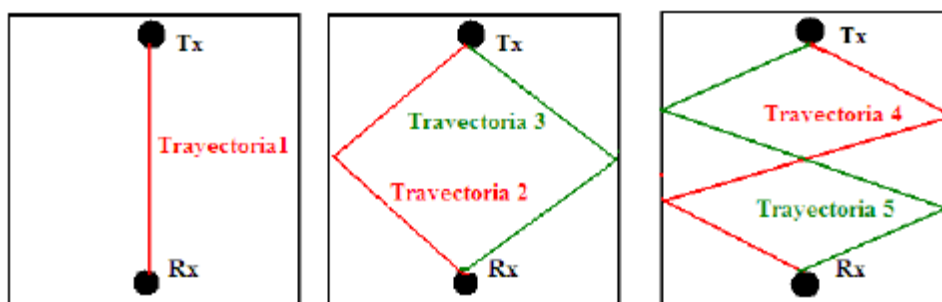


Figura 2-22: Trayectorias de propagación en un escenario interior visto de planta

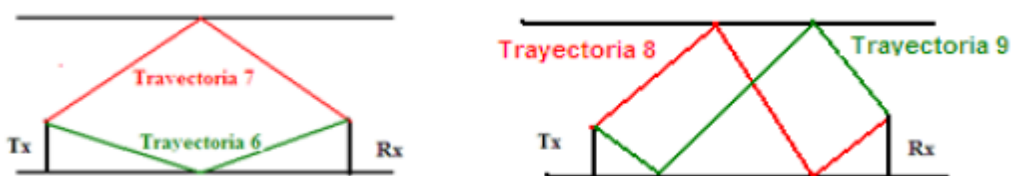


Figura 2-23: Trayectorias de propagación en un escenario

La trayectoria 1, es la que mayor intensidad de señal tiene ya que no se refleja en ningún sitio. Si tuviéramos en cuenta esta trayectoria, los resultados obtenidos serían similares a la propagación por el espacio libre, pero la aportación de las otras cuatro trayectorias que sufren reflexión en algún punto de los planos superior, inferior y lateral, provoca que los resultados se acerquen o alejen de las pérdidas por el espacio libre. En los escenarios exteriores, en general, solo existen el rayo principal y el reflejado en el plano inferior, y en algún caso particular los rayos reflejados en los planos laterales. Esto supone que la propagación en exteriores aproxime más a las pérdidas en el espacio libre.

Un fenómeno que también se ha de tener en cuenta en la propagación de las señales de radio, es el fenómeno de difracción. La difracción es un fenómeno característico de las ondas. Éste se basa en el curvado y esparcido de las ondas cuando encuentran un obstáculo o al atravesar una rendija. El fenómeno de la difracción es un fenómeno de tipo interferencial y como tal requiere la superposición de ondas coherentes entre sí.

Este fenómeno aparecerá cuando una de las trayectorias de la señal se encuentre con un objeto metálico, especialmente, si la altura del objeto es la misma que la altura de las antenas.

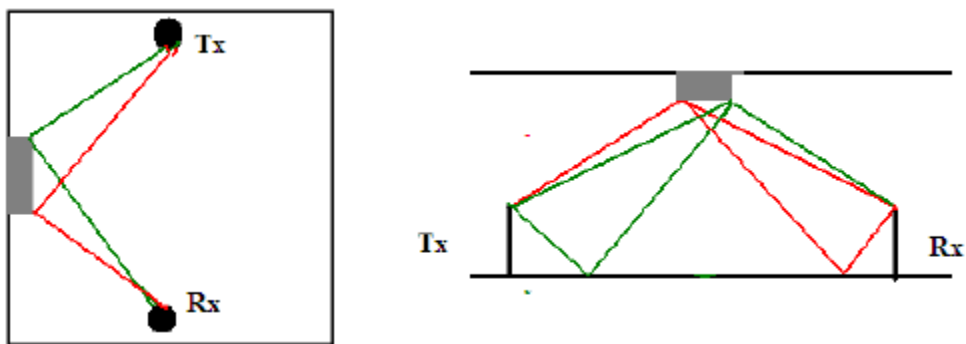


Figura 2-24: Trayectorias por difracción

2.3.3 Modelos de propagación

Un modelo de propagación es una formulación empírico matemática para la caracterización de la propagación de ondas de radio en un ambiente dado. Los modelos de propagación predicen la pérdida por trayectoria que una señal de RF puede tener entre una estación base y un receptor, sea móvil o fijo.

Generalmente los modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos (también llamados estadísticos), teóricos (también llamados determinísticos) o una combinación de estos dos (semi-empíricos). Mientras que los modelos empíricos se basan en mediciones, los modelos teóricos se basan en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio.

En los modelos empíricos, todas las influencias ambientales se tienen en cuenta implícitamente, sin importar que ellas puedan identificarse por separado. Esta es la principal ventaja de estos modelos. Por otro lado, la precisión de estos modelos no sólo depende de la exactitud de las mediciones, sino también de las similitudes entre el ambiente para ser analizado y el ambiente dónde las mediciones se llevan a cabo. La

eficiencia computacional de estos modelos es generalmente satisfactoria. Los modelos determinísticos están basados en los principios de la física y, debido a eso, pueden aplicarse a ambientes diferentes sin afectar la exactitud. En la práctica, su implementación requiere normalmente una base de datos grande de características ambientales que a veces son imprácticas o imposibles de obtener. Los algoritmos usados por los modelos determinísticos normalmente son muy complejos y carecen de eficiencia computacional. Por tal razón, la aplicación de los modelos determinísticos, normalmente se restringe a áreas más pequeñas o interiores. No obstante, si los modelos determinísticos son implementados correctamente, puede esperarse mayor exactitud de la predicción que en el caso de los modelos empíricos.

En el trabajo que se está exponiendo, se utilizará un modelo empírico y se intentará comparar con el modelo teórico conveniente.

En general, la caracterización de un enlace radioeléctrico se puede expresar de la siguiente forma:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_p - L_{others}$$

donde P_{rx} es la potencia recibida por el receptor, P_{tx} es la potencia transmitida por el transmisor, G_{tx} es la ganancia de la antena transmisora, G_{rx} es la ganancia de la antena receptora, L_p son las pérdidas de potencia de la señal debida a la propagación y L_{others} son pérdidas de otra naturaleza.

2.3.3.1 Modelos de propagación en interiores

La radio propagación en interiores es dominada por los mismos mecanismos que la de exteriores: reflexión, difracción, refracción y dispersión. Sin embargo las condiciones varían mucho más en función de diferentes factores físicos que involucran tanto el diseño de los edificios, como su altura y los materiales con los que son construidos. En general los canales de propagación de interiores (*indoor channels*) pueden ser clasificados en dos:

- *Line of Sight (LoS)*: Existe visión directa entre transmisor y receptor
- *No Line of Sight (NLOS)*: No existe visión directa entre transmisor y receptor debido a distintos tipos de obstáculos, como paredes, muebles, ventanas, personas, o el suelo y el techo entre plantas.

Existen múltiples estudios que han arrojado diferentes modos de predecir la propagación de las ondas de radio en interiores. A continuación, se exponen los dos modelos de propagación más extendidos.

▪ Modelo de pendiente única (*One-Slope Model*)

Es el modelo de propagación más simple que presenta una dependencia logarítmica entre la pérdida de propagación y la distancia. Es un método muy fácil de usar y de implementar y las pérdidas vienen dadas por [10]:

$$L_p[dB] = L_0 + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_g,$$

donde L_0 son las pérdidas a la distancia referencia, d_0 , $L_0 = 20 \log(4\pi d/\lambda)$ (λ es la longitud de onda en metros). n es el índice de propagación, d es la distancia entre transmisor y receptor y X_g es una variable aleatoria normal(o gaussiana) de media cero.

▪ **Modelo de pendiente doble (*Two-Slope Model*)**

Es un modelo de propagación muy similar al anterior, con la única salvedad de que el camino para el cual se van a calcular las pérdidas de propagación se divide en 2 partes, la primera hasta una distancia d_r , y la segunda después de ella.

$$L_p[dB] = \begin{cases} L_0 + 10 \cdot n_1 \cdot \log_{10}(d) + X_{g1} & d \leq d_r \\ L_1 + 10 \cdot n_2 \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_r}\right) + X_{g2} & d > d_r \end{cases}$$

Dónde L_0 y L_1 son las pérdidas a las distancia de referencia d_0 y d_1 respectivamente, n_1 y n_2 son los índices de propagación, d es la distancia entre transmisor y receptor y X_{g1} y X_{g2} son variables aleatorias normales(o gaussianas) de media cero.

2.3.3.2 Modelos de propagación en exteriores

En entornos exteriores, si los consideramos sin obstáculos, las únicas pérdidas existentes son provocadas por el espacio libre. Estas pérdidas se definen como el cociente entre la potencia radiada por la antena transmisora y la captada por la antena receptora.

$$L_p[dB] = 10 \cdot \log_{10}\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)$$

En dB, utilizando unidades prácticas se puede expresar como:

$$L_p[dB] = 32.45 + 20 \log_{10}(f[MHz]) + 20 \log_{10}(d[km])$$

Es muy importante el hecho de que estas pérdidas son totalmente independientes de la antena (de su tipo, características, ganancia...) ya que se deben a que la onda electromagnética al propagarse se atenúa según la ley de la inversa de la distancia.

2.3.4 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación de una antena es la representación gráfica de sus propiedades de radiación en las distintas direcciones del espacio. El diagrama de radiación es también de recepción ya que describe las propiedades de recepción de la antena. El patrón de radiación es tridimensional, pero generalmente las mediciones de los mismos son una porción bidimensional del patrón, en el plano horizontal o vertical. Los parámetros más importantes del diagrama de radiación son los siguientes:

- Directividad: Es la dirección de máxima radiación.
- Lóbulo principal: Es el margen angular en torno a la dirección de máxima radiación. Está comprendido entre dos mínimos relativos.

- Lóbulos secundarios: Son el resto de máximos relativos, de valor inferior al principal.
- Ancho de haz: Es el margen angular de direcciones en las que el diagrama de radiación de un haz toma el valor de la mitad del máximo.
- Relación de lóbulo principal a secundario (SLL): Es el cociente en dB entre el valor máximo del lóbulo principal y el valor máximo del lóbulo secundario.
- Relación delante-atrás (FBR): Es el cociente en dB entre el valor de máxima radiación y el de la misma dirección y sentido opuesto.

Dependiendo de la directividad de la antena se pueden distinguir antenas omnidireccionales, bidireccionales y unidireccionales. Las omnidireccionales radian o captan igual en todas las direcciones, en los 360°; las bidireccionales emiten o captan sólo por delante y por detrás, mientras que en los laterales son prácticamente ciegas; las unidireccionales emiten o captan en una única dirección muy marcada. La Figura 2-25 muestra los diferentes tipos de diagramas de radiación. También muestra dos formas de representar el diagrama de radiación: en coordenadas polares y en 3D.

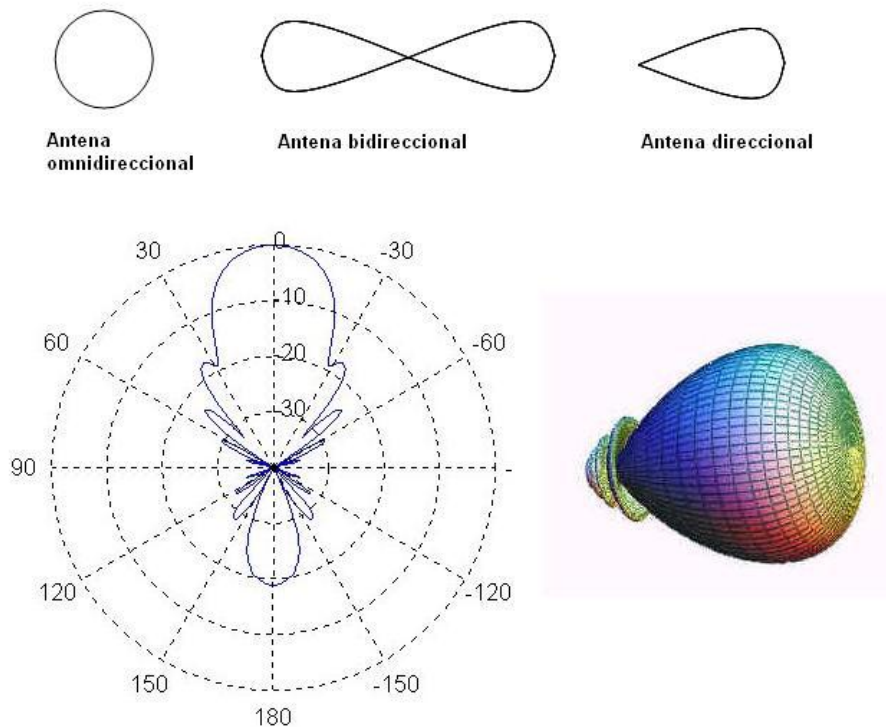


Figura 2-25: Diagramas de radiación

2.3.5 Definición y medida de RSSI

Existen diferentes formas de medir la potencia de una señal de radiofrecuencia recibida por un dispositivo. Desde un punto de vista físico, dicha potencia puede ser medida en vatios (W) o milivatios (mW) o, en valores logarítmicos, en dBW (potencia logarítmica referida a 1 W) o dBm (potencia logarítmica referida a 1 mW). De entre todas ellas, para medir la potencia recibida en un dispositivo inalámbrico resulta más conveniente la medida en unidades logarítmicas, debido al amplio rango de valores que la potencia puede tomar. De las dos unidades logarítmicas mencionadas, es habitual en este

tipo comunicaciones utilizar el dBm, debido a que la potencia recibida puede presentar valores muy bajos. Por ejemplo, los valores típicos están comprendidos entre -100 dBm y -20 dBm.

Para cuantificar la potencia recibida, es habitual usar el RSSI, del inglés *Radio Signal Strength Indicator*, el cual es un valor almacenado en un byte que puede tomar 256 valores enteros entre 0 y 255. La definición que ofrece el estándar es la siguiente:

“El indicador de potencia de señal recibida (RSSI) es un parámetro opcional que toma un valor entre 0 y RSSI MAX. Este parámetro es una medida del subnivel PHY de la energía observada en la antena utilizada para recibir el actual PPDU. El RSSI se medirá entre el comienzo del SFD y el final del PLCP HEC. El RSSI está pensado para ser utilizado de una manera relativa. No se especifica ningún valor para la precisión del valor absoluto del RSSI.”

Los valores importantes de RSSI se miden de forma aproximada. Debido a que la aplicación original de los sistemas inalámbricos no lo requería, los fabricantes no han centrado sus esfuerzos en proporcionar a sus adaptadores procedimientos precisos de medida. La utilización de estos sistemas para localización ha sido posterior y las mencionadas limitaciones causan que las medidas de RSS sean poco precisas y muy dependientes del fabricante.

Resulta útil describir brevemente qué otros factores afectan a la medida del indicador. En primer lugar, el valor de potencia recibida se ve afectado por el transmisor utilizado. En segundo lugar, la potencia recibida no es solamente función de la distancia, ya que la propagación radioeléctrica, en especial en el interior de edificios, sigue unos patrones difíciles de predecir y provoca variaciones aleatorias de la señal. La potencia recibida varía también en función de la frecuencia utilizada, y por tanto en función del canal utilizado.

3 Descripción y desarrollo del sistema

3.1 Descripción general del sistema

En el presente proyecto se ha desarrollado una red inalámbrica de sensores para el auto-posicionamiento de los mismos mediante la medida del nivel de señal de radiofrecuencia enviada entre ellos y para el estudio de la robótica colaborativa. Se han utilizado 4 nodos fijos y uno móvil (el robot descrito en la Sección 3.2), aunque el sistema puede albergar mayor número de nodos. En adelante, los nodos de la red de sensores serán nombrados como nodos, estaciones, robots, plataformas o agentes indistintamente.

Cada uno de los nodos fijos está compuesto por un módulo de radiofrecuencia, su antena y una computadora portátil, IGEPv2 [ver 3.2.3], aunque las pruebas finales se han realizado con PC's portátiles debido a su más fácil manejo y acceso. Dicha computadora es la encargada del control del módulo de RF y por tanto de todo el nodo en su conjunto.



Figura 3-1: Cuatro nodos fijos. IGEPv2 y módulos de RF

El módulo de RF es una unidad de transmisión y recepción de señales de radiofrecuencia en la banda UHF (*Ultra High Frequency*), exactamente la banda ICM (Industrial, Científica y Médica) Europea entorno a 868Mhz, con un set de instrucciones pre-programadas para su fácil manejo. El diseño de este módulo de RF fue llevado a cabo por Víctor Vaquero durante su periodo de colaboración con el grupo de investigación

HCTLab durante los años 2010 y 2011. Él mismo fue el encargado de la construcción de los tres primeros módulos. Los dos módulos de RF restantes, para completar la red de 5 sensores utilizada, han sido construidos durante el desarrollo del proyecto expuesto.

La señal de radiofrecuencia sufre pérdidas de potencia en la propagación que dependen, entre otros factores, de la distancia recorrida por dicha señal. En este proyecto se ha realizado un profundo análisis del comportamiento de la señal de radiofrecuencia en la propagación y su relación con la distancia. En la Sección 4 se expone el análisis realizado en este campo. El objetivo ha sido encontrar una relación fiable entre la potencia de la señal de RF (RSSI, 2.3.5) recibida por un módulo de RF receptor y la distancia que recorre dicha señal y por tanto la distancia a la que se encuentra el módulo de RF emisor. Usando varios módulos de RF (agentes) y calculando la distancia a la que se encuentra cada uno de ellos, se puede realizar un posicionamiento relativo de los mismos mediante la técnica de trilateración (2.2.4.2).

Uno de los nodos usados en la red inalámbrica de sensores es un nodo móvil. Dicho nodo es un robot que ha sido diseñado y construido de acuerdo a las especificaciones que requiere el sistema que se pretende implementar. Al igual que sucede con los nodos fijos, el robot móvil es controlado por IGEPv2, una computadora ultra portátil y muy potente con multitud de puertos de entrada y salida idónea para este tipo de fines. Entre las principales especificaciones exigidas al robot se encuentra la movilidad del mismo, por lo que se le ha provisto de ruedas y motores (ver 3.2.6). Es también de vital importancia conocer la distancia exacta que recorre para lo que se le han incluido un par de encoders de cuadratura (ver 3.2.6), y varios sensores de distancia (ver 3.2.5) que informan de la longitud a la que se encuentran los obstáculos del entorno (de esta funcionalidad sólo ha sido implementada la parte hardware mientras que la parte software no ha sido desarrollada ya que las pruebas finales no requieren esta característica, pero se ha diseñado pensando en un sistema futuro que requiera de robots que sean capaces de leer información del entorno). Para la comunicación entre estos dispositivos e IGEPv2 ha sido necesario el diseño y construcción de una placa auxiliar, la cual se describe en 3.2.4. Además, el robot lleva incorporado uno de los módulos de RF para su comunicación con las estaciones fijas y para poder disponer de la potencia de recepción de las señales de RF mandadas por el resto de nodos y así poder calcular distancias, trilaterar y finalmente posicionar relativamente al resto de agentes y así mismo en el espacio. Las funciones de desplazamiento del robot han sido desarrolladas en lenguaje C. Toda la información del robot construido se recoge en la Sección 3.2.

El algoritmo de posicionamiento utilizado en el sistema ha sido desarrollado por Eloy Anguiano Rey, profesor titular de la Universidad Autónoma de Madrid. El actual proyecto ha colaborado en el desarrollo de las funciones de comunicación del puerto serie entre IGEPv2 (o cualquier computadora) y el módulo de RF, en el desarrollo de la función de trilateración, en las pruebas de comprobación del buen funcionamiento del algoritmo, la optimización paramétrica y las pruebas finales del mismo. El programa, que va cargado dentro de IGEPv2, ha sido desarrollado en lenguaje C.

El algoritmo de posicionamiento, exactamente, se basa en un comportamiento de biestabilidad consistente en un sistema de tensión-relajación. Según el estado del agente, tensión o relajación, su comportamiento será diferente. Un agente en estado de relajación posee unas coordenadas relativas congruentes con la distancia al resto de agentes del sistema, calculada mediante la potencia recibida (o RSSI). Un agente en estado de tensión

posee unas coordenadas incongruentes con la distancia a algún agente del sistema y tiende a calcular continuamente su posición, mediante trilateración, para intentar relajarse. El algoritmo hace uso de la relación entre potencia recibida y distancias, encontrada en la Sección 4 y de las conclusiones extraídas de la misma. Cada uno de los agentes del sistema, tanto los nodos fijos como el nodo móvil, llevan incorporado este algoritmo de posicionamiento. El nodo móvil, además, lleva incorporadas las funciones de desplazamiento. Una descripción más extensa del algoritmo de posicionamiento se expone en la Sección 4.5.

3.2 Descripción, diseño y desarrollo del robot

3.2.1 Introducción

Para el diseño del robot ha sido necesario el análisis del objetivo final del sistema para así poder extraer las características que el robot debe tener. El sistema requiere un robot móvil, que sea capaz de medir su distancia de desplazamiento, ser capaz de detectar los obstáculos del entorno, poder comunicarse con el resto de agentes y medir la potencia de las señales de radio-frecuencia recibidas del resto de robots. A continuación se describe el robot desarrollado, las partes y dispositivos que lo forman y su funcionamiento.

La parte principal del robot, la encargada del control de todas las unidades que lo componen, es una potente computadora ultra portátil llamada IGEPv2. Este procesador controlará los siguientes dispositivos: el módulo de RF, los motores, los encoders de cuadratura de movimiento de las ruedas y los sensores de distancia.

Para comunicarse con el resto de agentes o estaciones fijas, el robot dispone de un módulo de RF. La IGEPv2 se encarga de enviar por un puerto USB los mensajes al módulo que los redirigirá al destino correspondiente y de recibir mensajes del resto de los agentes. Otra función muy importante del módulo de RF es la de calcular la potencia de los mensajes recibidos para así poder inferir la distancia del agente emisor.

Por otro lado, ha sido necesario el diseño y construcción de una placa auxiliar que tiene como principal función la conexión de IGEPv2 y el resto de dispositivos del robot: motores, encoders y sensores de distancia. Esta placa además se encarga de adaptar las señales procedentes de IGEPv2 al resto de dispositivos y viceversa. Esta adaptación de señales incluye tanto el cambio de nivel de tensión de las señales de los pines de la IGEPv2 de 1.8 V a los 5 V de los otros componentes así como la digitalización de las señales analógicas de los sensores de distancia. Otra función importante de esta placa auxiliar es la alimentación de todos los componentes del robot. Posee un conector Jack para conectar una fuente de alimentación externa y dos pines para conectar una batería. En ambos casos la tensión de entrada que puede aceptar el sistema está entre los 5 V y los 9 V. La placa auxiliar se encarga de regular dicha tensión para obtener en cualquier caso 5 V, que es lo que necesitan todos los dispositivos del sistema.

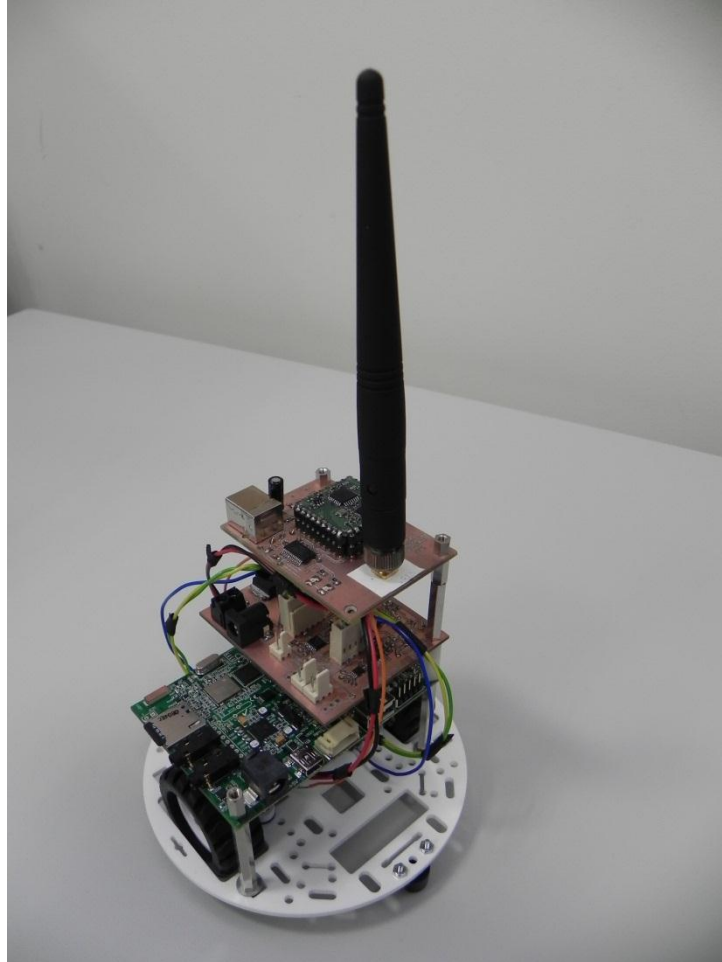


Figura 3-2: Robot construido

Como se acaba de explicar, IGEPv2, a través de la placa auxiliar, manejará los dos motores y por tanto las dos ruedas Pololu² del robot a través de los pines I/O (GPIO: General Purpose Input Output). Serán necesarios 4 pines configurados en modo salida para el manejo de ambos motores. Mediante la generación de señales de PWM software se controlará la velocidad de giro del motor, de las ruedas y por lo tanto la velocidad del robot. La placa auxiliar tiene integrado un driver que es capaz de controlar dos motores.

Para el control del desplazamiento se utilizan dos encoders de cuadratura Pololu (uno por cada rueda) diseñados expresamente para las rueda Pololu. El encoder está diseñado con dos sensores infrarrojos reflectantes los cuales funcionan leyendo las ranuras que tiene la rueda permitiendo con esto detectar o leer el movimiento. IGEPv2 necesita, por tanto, dos pines GPIO configurados como entrada para poder leer las señales que manda cada uno de los encoder.

Por último, el robot dispone de 4 sensores de distancia Sharp GP2Y0A21YK0F que son capaces de medir la distancia de obstáculos entre 10 y 80 cm. La señal analógica que devuelve el sensor se transforma a digital mediante un ADC que incluye la placa auxiliar.

² Fabricante de productos electrónicos. www.pololu.com

IGEPv2 controla estos componentes mediante una comunicación I²C permitiendo manejar, únicamente con dos líneas (CLK y Data) y por lo tanto ocupar sólo dos pines GPIO, los 4 sensores de distancia. Cabe destacar que se ha diseñado el hardware para el control de los sensores de distancia pero no se ha desarrollado el software que los maneja, ya que las pruebas finales no requieren de su uso.

3.2.2 IGEPv2

La unidad central y más importante del robot, la encargada de manejar el resto de dispositivos del mismo, es una potente computadora ultra portátil y de bajo consumo denominada IGEPv2 Revisión C1 y desarrollada por ISEE³, compañía dedicada al desarrollo de sistemas embebidos.

IGEPv2 lleva incorporado el procesador OMAP3530 (ver [16]) a 720 MHz de *Texas Instruments*. Es un procesador de alto rendimiento que soporta sistemas operativos de alto nivel como Linux. Además hace uso de la arquitectura ARM CortexTM-A8.

IGEPv2 tiene unas dimensiones de 65mm x 95 mm, lo que la hace perfecta para formar parte de un robot de tamaño reducido. Además posee 512 Mb de memoria RAM, conectores de entrada y salida de audio estéreo, USB 2.0 OTG, USB 2.0 HS Host, Wifi, Bluetooth 2.0, conector Ethernet, salida de video de alta definición mediante conector HDMI, RS232, lector de tarjetas micro-SD, cabezal de expansión con 28 pines J990 entre otros tipos de conectores de entrada/salida.

IGEPv2, con 5 V de tensión de alimentación y 1 A de corriente, ha sido adquirida en el mercado por un precio de 188 €. Más información en www.igep.es ([17]).



Figura 3-3:IGEPv2

³ Integration Software and Electronic Engineering

3.2.2.1 Características generales

Descripción	Características
Processor	OMAP3530 720 MHz
Power	5Vcc / 1A (Without USB) – 5Vcc / 1.3A (With USB) 3.5mm socket connector for wall plug or JST Connector
RAM Memory	512 MBytes LPDDR SDRAM – 200 MHz
Nand Flash	512 MBytes
Video 3D Accelator	Power SGX 530 (100/200 MHz)
Camera interface	Camera ISP processing capability to connect RAW image sensor modules
Power Management	TPS65950
PCB Size	93 x 65 x 1.6 mm
Indicators	2 Bicolor USER LEDS
Debug	Console RS232 + JTAG Interface
USB 2.0 LS/FS/HS OTG	1 Mini AB USB socket connector (dual slave and host role)
USB 2.0 HS HOST	1 Type A USB socket connector (standard USB host)
Audio stereo in/out	3.5mm standard stereo audio jack
microSD	microSD connector (SD and SDHC cards supported)
DVI video output	DVI-D using HDMI connector.
Expansion connector	Power 5V and 1.8V, UART, McBSP, McSPI, I2C, GPIO, RS485 with transceiver, Keyboard.
Wifi	IEEE 802.11b/g 2,4GHz
Bluetooth	2.0
Antenna WiFi/Bluetooth	1 shared internal antenna (integrated on PCB), optional external antenna.
Ethernet	10/100 MB BaseT (RJ45 connector with led link/activity)
Temperature Range	Commercial (0 to 70 Cº)

Figura 3-4: Características generales de IGEPv2 extraídas del *datasheet* de IGEPv2 (www.igep.es ([17])).

3.2.2.2 Sistema Operativo

Los sistemas embebidos, como es el caso de IGEPv2 o por ejemplo los teléfonos móviles, suelen estar diseñados para realizar un conjunto reducido de funciones. Por este motivo, los sistemas operativos que se suelen cargar en este tipo de sistemas son muy reducidos y contienen únicamente los archivos estrictamente necesarios con el objetivo de ahorrar espacio y recursos, algo muypreciado en esta clase de dispositivos. Sin embargo, IGEPv2 tiene recursos suficientes (procesador a 720 MHz) y la posibilidad de ampliar espacio con una tarjeta microSD. Por este motivo, se ha decidido trabajar con IGEPv2 arrancando desde dicha tarjeta un sistema operativo completamente funcional y con una gran cantidad de recursos.

El sistema operativo elegido para ser ejecutado en la IGEPv2 ha sido Linux. Exactamente, la versión Linux 2.6.35-23, una de las versiones que propone el fabricante. Como se ha comentado, este sistema operativo se carga en una tarjeta microSD e IGEPv2 arranca desde dicha tarjeta.

3.2.2.3 Método de desarrollo software en IGEPv2

El método utilizado para desarrollar las aplicaciones del proyecto (en lenguaje C) ha consistido en desarrollar dichas aplicaciones en un PC convencional con Linux y posteriormente copiar los archivos fuente a IGEPv2 para compilarlos y posteriormente ejecutarlos, ya que, como se ha comentado en la sección anterior, IGEPv2 contiene un SO completamente funcional.

Otro método utilizado ha sido el uso de un compilador cruzado (*cross compiler*). Un compilador cruzado es un compilador capaz de crear código ejecutable para otra plataforma distinta a aquella en la que él se ejecuta. Esta herramienta es útil cuando quiere compilarse código para una plataforma a la que no se tiene acceso, o cuando es incómodo o imposible compilar en dicha plataforma, como en el caso de los sistemas embebidos. En nuestro caso, el fabricante de la IGEPv2 ofrece la posibilidad de descargar el archivo imagen de un SO Linux Ubuntu para ser ejecutado en la máquina virtual VMware Player⁴ de un PC convencional. Dicha imagen puede ser descargada de la página web de ISEE (ver [17]). Una vez ejecutado el SO en la máquina virtual el primer paso es preparar el entorno Linux apropiadamente para adaptarlo a la máquina objetivo, IGEPv2, es decir, preparar el compilador cruzado. Para ello ejecutamos el siguiente comando en consola:

```
$ source /usr/local/poky/eabi-glibc/environment-setup-arm-none-linux-gnueabi
```

Ahora se tiene un compilador cruzado preparado para compilar código ejecutable para IGEPv2. Para compilar, se ha de ejecutar el siguiente código en consola:

```
$ arm-none-linux-gnueabi-gcc -o hello-world hello-world.c
```

De este modo se genera un archivo ejecutable que ha de ser copiado a IGEPv2, donde es posible ejecutarlo directamente, al contrario que en el caso anterior en el que había que compilarlo en la propia máquina.

Para trabajar con IGEPv2, tener acceso al sistema operativo y de este modo ser capaces de cambiar la configuración del sistema e incluso de desarrollar las aplicaciones se ha procedido de dos posibles modos: mediante acceso remoto vía protocolo SSH o mediante conexión de pantalla, ratón y teclado.

⁴ <http://www.vmware.com/products/player>

Para el primer método, es necesario modificar el archivo de la ruta `/etc/network/interfaces` dentro del SO Linux de la tarjeta microSD, introduciéndola en un lector de tarjetas de otro PC, para cambiar la configuración de red del sistema. Se debe introducir el valor de la IP que llevará IGEPv2, la máscara de red, *gateway*, *network* y dirección *broadcast*. De este modo, el archivo `/etc/network/interfaces` tendrá el siguiente aspecto:

```
auto eth0
iface eth0 inet static
address 111.111.57.29
netmask 255.255.252.0
gateway 111.111.56.1
network 111.111.56.0
broadcast 111.111.63.255
```

Es interesante también tener acceso a internet a través de IGEPv2. Para ello se han de introducir las direcciones de los servidores DNS (*nameserver*) modificando el fichero de la ruta `/etc/resolv.conf`. Por ejemplo:

```
nameserver 111.111.9.100
nameserver 111.111.9.200
```

SSH, *Secure Shell*, es un protocolo mediante el cual podemos obtener un shell completamente funcional para trabajar en un sistema GNU/Linux, ya sea de forma local o remota. El protocolo funciona con un cliente y un servidor SSH, que se encargan de proporcionarnos el servicio descrito, de una forma totalmente segura, ya que todo viaja encriptado. Ahora se conecta IGEPv2 a la red a través del conector Ethernet y un cable de red. En otro PC conectado también a la red basta con abrir una consola Linux y utilizar la orden:

```
$ scp user@<maquina>
```

donde *user* es el usuario del SO de la IGEPv2 y *<maquina>* su dirección IP. De este modo, estaremos conectados a IGEPv2 en una consola con total operatividad.

El segundo método para acceder al sistema operativo de IGEPv2 es conectarle una pantalla a través del conector HDMI con un cable HDMI/DVI. Además, es necesario conectar un teclado y un ratón a través de un *Hub USB* conectado a su vez a IGEPv2. Con esta técnica, es posible incluso desarrollar las aplicaciones en la propia máquina, ya que se dispone del sistema operativo en modo gráfico.

Al principio de esta sección se ha explicado que es necesario copiar los archivos fuentes o los ejecutables a la IGEPv2. Esto se puede hacer copiando directamente los archivos en la tarjeta microSD o utilizando el protocolo SSH mediante la instrucción *scp* (*Secure CoPy*) usando la siguiente sintaxis:

```
$ scp fichero1 <usuario>@<maquina>:<directorio>
```

donde *fichero1* es el fichero a mandar y *<maquina>* es la IP de la máquina destino.

3.2.2.4 E/S

En esta sección se expone el modo en el que están conectados a IGEPv2 y como están configurados los diferentes periféricos de entrada/salida del robot.

En primer lugar y como se ha comentado en secciones anteriores, el SO está almacenado en una tarjeta microSD e IGEPv2 inicia el sistema desde dicha tarjeta [Figura 3-5 en naranja].

Para conectar IGEPv2 a la red y de este modo poder acceder al sistema operativo mediante una conexión SSH tal y como hemos descrito anteriormente se utiliza el conector Ethernet [Figura 3-5 en azul]. Evidentemente, esta conexión no se utiliza en la plataforma autónoma final.

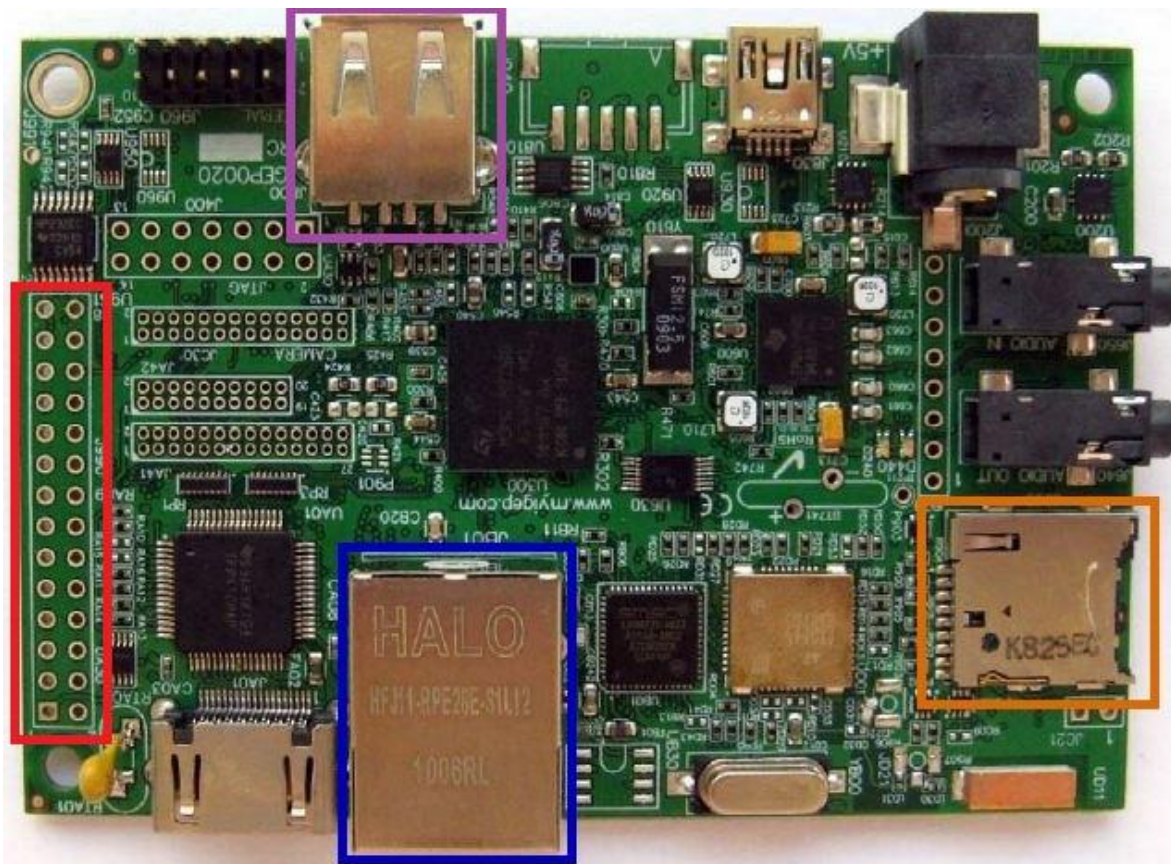


Figura 3-5: E/S en IGEPv2

El módulo de RF se conecta a IGEPv2 a través del puerto USB 2.0 HS Host [Figura 3-5 en morado]. Este puerto proporciona hasta 500 mA a 5 V de tensión de alimentación.

Además sólo soporta dispositivos de alta velocidad (dispositivos USB 2.0 HS). Para soportar dispositivos USB 1.0 LS o USB 1.1 FS debe usarse un Hub USB 2.0 entre IGEPv2 y dicho dispositivo, como es el caso de módulo RF.

El módulo de RF posee un conector USB tipo B, mientras que el de la IGEPv2 es un USB tipo A. Por este motivo la conexión entre ambos se realiza mediante un Hub USB y un cable USB 2.0 tipo A/tipo B.

Una vez conectado el módulo RF a IGEPv2 el sistema operativo Linux lo detecta, registra y configura. Se puede comprobar si el SO lo ha detectado ejecutando el siguiente comando en consola:

```
$ lsusb
```

el cual muestra todos los dispositivos USB detectados. Para que Linux detecte el módulo de RF se debe instalar previamente el módulo FTDI (dispositivo conversor serie-USB incorporado, ver la sección siguiente 3.2.3).

En Linux todas las conexiones de entrada/salida se tratan como archivos donde se pueden escribir datos como salida o leer datos de entrada. Los archivos correspondientes a los puertos USB se encuentran en la ruta `/dev/` y poseen el nombre `'ttyUSBx'` donde `'x'` es el número de puerto que el SO le asigna. Ya que IGEPv2 sólo tiene conectado un dispositivo USB, el módulo de RF, el archivo correspondiente es `'/dev/ttyUSB0'`. Para enviar un comando por el puerto USB al módulo de RF se puede usar la instrucción `'echo'` del siguiente modo:

```
$ echo "comando" > /dev/ttyUSB0
```

la cual envía `'comando'` al archivo de la ruta `/dev/ttyUSB0`, es decir, al módulo de RF.

Para comunicarnos con el módulo de RF a través del puerto USB dentro de la aplicación desarrollada en lenguaje C se han utilizado las funciones de manejo de archivos `fopen`, `fclose`, `fwrite` y `fread` de la librería `stdio.h` (*Standard Input-Output header*).

El resto de componentes del robot se comunican con IGEPv2 a través del conector de expansión J990 [Figura 3-5 en rojo] que dispone de un gran número de señales de diferente tipo procedentes del procesador OMAP3530, como por ejemplo: 5 V, 1,8 V, GND, McBSP, McSPI, i2C y GPIO. Posee 28 pines en total [Figura 3-6] que pueden ser configurados mediante multiplexación para proveer diferentes señales en cada uno de ellos. Exactamente, el multiplexor, y por lo tanto cada pin, puede ser configurado en 8 modos diferentes [Tabla 3-1]. Todos los pines vienen configurados por defecto en el modo 0.

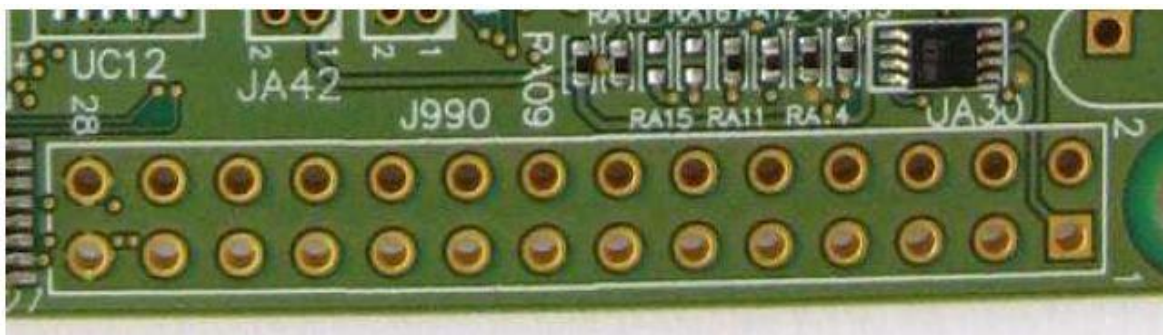


Figura 3-6: Detalle conector J990

Pin #	TYPE	MODE 0	MODE 1	MODE 2	MODE 3	MODE 4	MODE 5	MODE 6	MODE 7
J990:1	PWR	VIO_1V8							
J990:2	PWR	DC_5V							
J990:3	OMAP	mmc2_dat7	mmc2_clkln		mmc3_dat3	gpio_139	hsusb3_tll_nxt	mm3_rxdm	safe_mode
J990:4	OMAP	mcbasp3_dx	uart2_cts			gpio_140	hsusb3_tll_d4		safe_mode
J990:5	OMAP	mmc2_dat6	mmc2_dir_cmd	cam_shutter	mmc3_dat2	gpio_138	hsusb3_tll_dir		safe_mode
J990:6	OMAP	mcbasp3_clkx	uart2_tx			gpio_142	hsusb3_tll_d6		safe_mode
J990:7	OMAP	mmc2_dat5	mmc2_dir_d1	cam_global_rst	mmc3_dat1	gpio_137	hsusb3_tll_stp	mm3_rxdp	safe_mode
J990:8	OMAP	mcbasp3_fsx	uart2_rx			gpio_143	hsusb3_tll_d7		safe_mode
J990:9	OMAP	mmc2_dat4	mmc2_dir_d0		mmc3_dat0	gpio_136			safe_mode
J990:10	OMAP	mcbasp3_dr	uart2_rts			gpio_141	hsusb3_tll_d5		safe_mode
J990:11	OMAP	mmc2_dat3	mcspi3_cs0			gpio_135			safe_mode
J990:12	OMAP	mcbasp1_dx	mcspi4_simo	mcbasp3_dx		gpio_158			safe_mode
J990:13	OMAP	mmc2_dat2	mcspi3_cs1			gpio_134			safe_mode
J990:14	OMAP	mcbasp1_clkx	mcbasp3_clkx			gpio_162			safe_mode
J990:15	OMAP	mmc2_dat1				gpio_133			safe_mode
J990:16	OMAP	mcbasp1_fsx	mcspi4_cs0	mcbasp3_fsx		gpio_161			safe_mode
J990:17	OMAP	mmc2_dat0	mcspi3_somi			gpio_132			safe_mode
J990:18	OMAP	mcbasp1_dr	mcspi4_somi	mcbasp3_dr		gpio_159			safe_mode
J990:19	OMAP	mmc2_cmd	mcspi3_simo			gpio_131			safe_mode
J990:20	OMAP	mcbasp1_clkr	mcspi4_clk			gpio_156			safe_mode
J990:21	OMAP	mmc2_clk	mcspi3_clk			gpio_130			safe_mode
J990:22	OMAP	mcbasp1_fsr	cam_global_reset			gpio_157			safe_mode
J990:23	OMAP	i2c2_sda				gpio_183			safe_mode
J990:24	OMAP	i2c2_scl				gpio_168			safe_mode
J990:25	PMIC	pmic_regen							
J990:26	PMIC	sys_nrespwron							
J990:27	PWR	GND							
J990:28	PWR	GND							

Tabla 3-1: Señales conector J990. Extraído del *datasheet* de IGEPv2.

Tal y como refleja la tabla, el pin 1 proporciona 5 V de tensión. Este mismo pin puede ser utilizado para alimentar IGEPv2 al completo en vez de utilizar el conector Jack propiamente diseñado para ello. Como se comentó en secciones anteriores, la alimentación del robot se hace a través de la placa auxiliar y esta a su vez alimenta IGEPv2 a través del pin 1 con 5V y del pin 28 con GND del conector J990.

Para controlar los dos motores y recibir la información de los encoders de cuadratura se utilizan los pines GPIO (General Purpose Input/Output) correspondientes al modo 4. Estos pines funcionan con un nivel de tensión de 1.8 V y deben ser configurados

en el SO como entrada o como salida. Exactamente cada motor necesita 2 señales de salida y cada encoder necesita 2 señales de entrada. Es interesante recordar que las señales de estos pines, antes de llegar al dispositivo final, son controladas por la placa auxiliar [3.2.4]. La siguiente tabla muestra la configuración de los pines GPIO para su control:

Dispositivo			#Pin en J990	Modo 4	Configuración
Derecha	Motor	A	16	GPIO161	Salida
		B	19	GPIO131	Salida
	Encoder	A	20	GPIO156	Entrada
		B	22	GPIO157	Entrada
Izquierda	Motor	A	12	GPIO158	Salida
		B	10	GPIO141	Salida
	Encoder	A	9	GPIO136	Entrada
		B	15	GPIO133	Entrada

Figura 3-7: Configuración multiplexador IGEPv2

Para cambiar el modo de un pin primero debemos habilitar el multiplexor de Linux, para ello ejecutamos el siguiente comando en consola:

```
$ mount -t debugfs none /sys/kernel/debug
```

Si, por ejemplo, se quiere cambiar la configuración del pin 7, cuyo modo 0 por defecto es `sdmmc2_dat5`, al modo 4 como pin de entrada cuya funcionalidad es `GPIO137` se debe usar la siguiente instrucción en consola:

```
$ echo 0x004 > sdmmc2_dat5
```

Sin embargo, si se quiere hacer lo mismo pero configurando el pin GPIO como salida, se debe mandar el valor `0x104` al multiplexor adecuado, en este caso sería:

```
$ echo 0x104 > sdmmc2_dat5
```

Cabe destacar que la configuración del multiplexor se puede hacer de modo permanente mediante reconfiguración del kernel de Linux.

Lo siguiente que se debe hacer es exportar los archivos que controlan el pin GPIO, en este caso el 137, mediante el siguiente comando:

```
$ echo 137 > /sys/class/gpio/export
```

Con esta instrucción se obtiene la carpeta con los archivos de control del puerto GPIO137 en la ruta `/sys/class/gpio/gpio137`. Aunque anteriormente ya se ha configurado el

pin como salida o entrada ahora es necesario volver a especificarlo con una de las siguientes instrucciones dependiendo de la configuración específica que se le quiera dar:

```

$ echo out > /sys/class/gpio/gpio137
ó
$ echo in > /sys/class/gpio/gpio137

```

En el caso de que el pin esté configurado como salida se puede cambiar el nivel tensión físico del pin enviando un 1 o un 0 al archivo *value* alojado en la ruta */sys/class/gpio/gpio137/value* mediante una instrucción *echo* tal y como sigue:

```

$ echo 1 > /sys/class/gpio/gpio137/value
ó
$ echo 0 > /sys/class/gpio/gpio137/value

```

En caso de que el pin esté configurado como entrada se puede leer el archivo *value* para conocer el nivel físico de tensión del pin en cuestión.

En lenguaje C la comunicación con los pines GPIO se ha desarrollado utilizando las funciones de manejo de archivos *fopen*, *fclose*, *fwrite* y *fread* de la librería *stdio.h* (*Standard Input-Output header*) ya que como antes se comentó, los puertos de entrada/salida en Linux se representan como archivos.

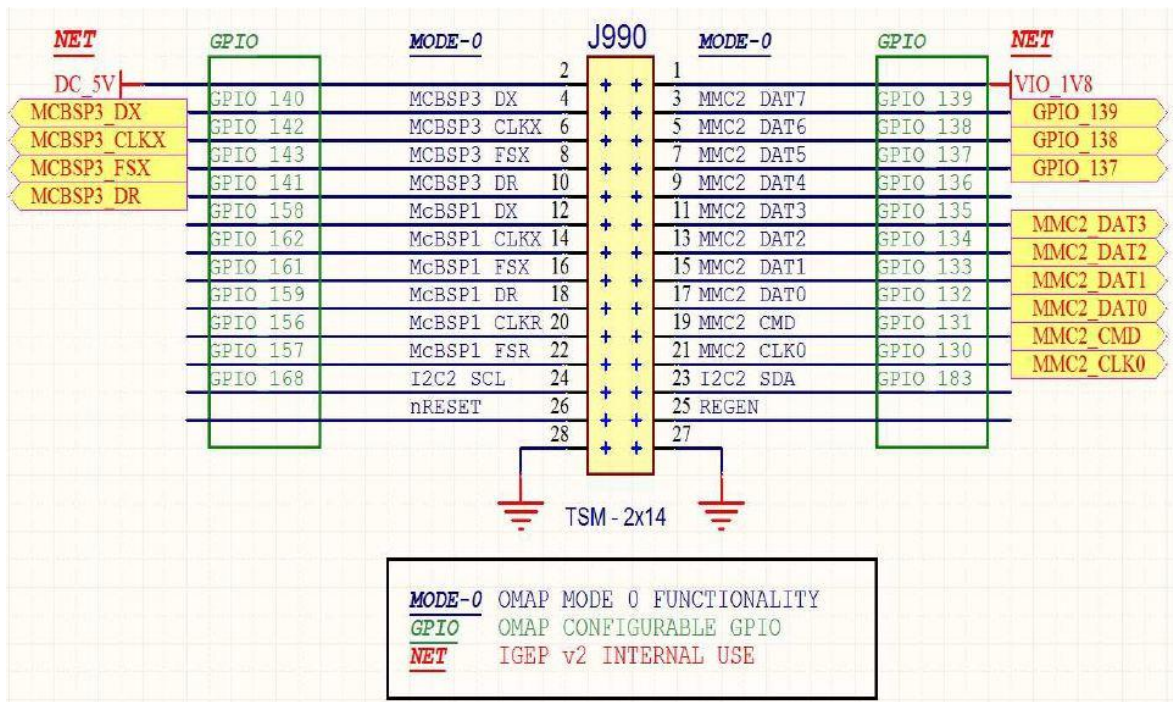


Figura 3-8: Esquemático J990. Extraído de la hoja de datos de IGEPv2.

3.2.3 Módulo de radiofrecuencia o módulo de RF

El diseño del módulo de radiofrecuencia (módulo de RF) fue llevado a cabo por Víctor Vaquero durante su periodo de colaboración con el grupo de investigación HCTLab de la Escuela Politécnica Superior. Él mismo fue el encargado de la construcción de los tres primeros módulos.

La parte principal del módulo de RF es el WM11, un módulo LPR (*Low Power RF*) diseñado por DMD (Digital Micro Devices, [18]) con modulación GFSK bidireccional. Trabaja dentro de la banda de frecuencia UHF (300 MHz – 3 GHz), exactamente la banda ICM (Industrial, Científica y Médica) Europea entorno a 868Mhz. Para la comunicación con una computadora, el WM11 posee dos puertos serie para los datos de entrada y salida. Por este motivo, en el diseño se utilizó un chip *FTDI* que se encarga de la conversión serie-USB de los datos para conseguir una mejor comunicación con el PC. Tal y como se comentó en la sección anterior, para la conexión entre el módulo de RF e IGEPv2 se ha utilizado un Hub USB. El módulo de RF se alimenta a través de la alimentación del propio USB.

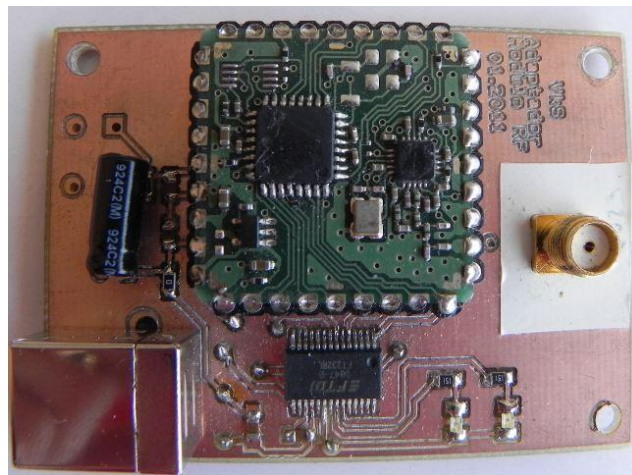


Figura 3-9: Módulo de radiofrecuencia

El módulo de RF lleva incorporado un conector SMA (*SubMiniature versión A*) macho conectado al pin de entrada-salida de radiofrecuencia del WM11. A este conector SMA se le ha de conectar una antena de 50 ohmios.

La antena seleccionada para la emisión y recepción de la información del módulo de RF ha sido la antena de $\frac{1}{4}$ de onda FLEXI-SMA90-868 fabricada por RF Solutions [Sección 3.2.3.3]. Funciona a una frecuencia de 868 MHz y mide 135.88 mm de largo y 12.5 mm de diámetro. Posee un conector SMA hembra y 50 ohmios de impedancia.

El módulo WM11 posee un rango de actuación extremadamente dinámico como radio enlace normal desde 50 a 200m para interiores de edificios y de hasta 5 Km ó más en campo abierto, dependiendo de las condiciones del terreno. Posee 19 canales programables separados 100 Khz, desde 868.1 Mhz hasta 869.9 Mhz. La alimentación estándar es sin estabilizar desde 3.3 V a 6 V. En este caso, es alimentado, como ya hemos comentado, a través de los 5 V procedentes del USB.

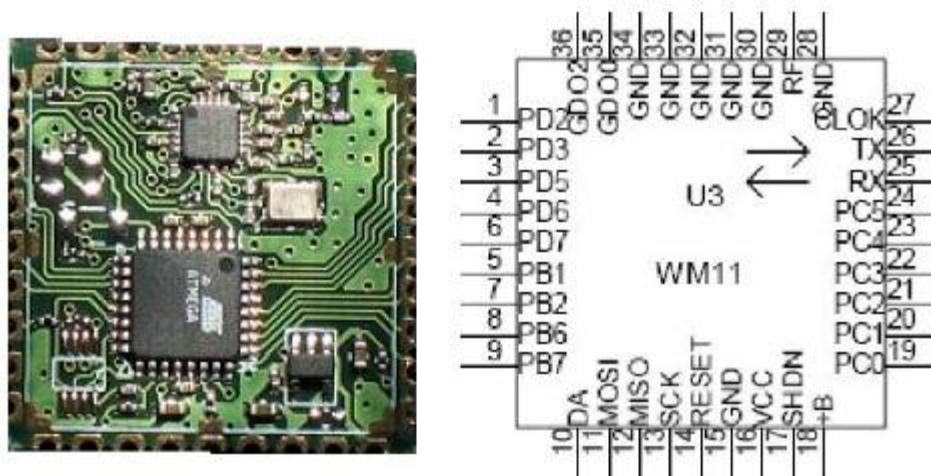


Figura 3-10: WM11 y su esquemático

El WM11, y por tanto el módulo de radiofrecuencia en general, se controla y configura mediante secuencias simples de comandos [ver sección 3.2.3.2] enviados desde una computadora por el puerto USB correspondiente. En nuestro caso, a través de IGEPv2 tal y como se describió en la sección 3.2.2.4. Varios parámetros de radio se pueden configurar mediante dichos comandos, como el canal de radio, la potencia de emisión, la sensibilidad del receptor ó los modos de funcionamiento. Estos parámetros nos permiten también el envío de información a otro módulo mediante comunicación punto a punto o al resto de módulos activos en el sistema utilizando una comunicación en modo *broadcast*.

Cada módulo de RF posee una dirección IP fija de 16 bits que lo identifica frente al resto de módulos facilitando de este modo las comunicaciones punto a punto. Para comunicaciones *broadcast* la IP utilizada es 000.000.

La principal ventaja del uso de este módulo de RF, en especial del WM11, es la obtención directa de la potencia con que se reciben los mensajes (RSSI, *Radio Signal Strength Indicator*, 2.3.5). Cuando un módulo de RF recibe un mensaje de otro módulo, además de contener los datos enviados por el segundo, también contiene la potencia de recepción. Más información acerca de la estructura de los mensajes se muestra en la sección 3.2.3.2. Esta característica, la obtención del RSSI, fue de vital importancia en la elección de este módulo en concreto, ya que el sistema final hace uso de la potencia recibida para poder calcular la distancia.

En este proyecto se han construido dos módulos de RF, que sumados a los 3 construidos por Víctor Vaquero hacen un total de 5 módulos. Las IP's de los cinco módulos de RF utilizados en este PFC son las siguientes: 137.005, 137.007, 137.009, 137.021 y 137.023.

En la Tabla 3-2 se muestra la descripción del WM11.

Descripción	Características
Frecuencia	19 canales programables de 868.1 MHz hasta 869.9 MHz
Modulación RF	GFSK, 38 kbaudios. Semiduplex.
Precisión	PLL controlado por cristal +-5ppm.
Sensibilidad RF	De -99 dBm hasta -107 dBm.
Potencia RF emisión	Programable desde -30 dBm hasta 10 dBm.
RSSI precisión en Rx	±4 dBm
Precisión en potencia de emisión	± 1 dBm
Impedancia puerto antena	50 Ω
Microcontrolador	Microcontrolador con 16k de memoria flash.
Protocolo de red	Protocolo en red Unibus11W. Direcccionamiento IP 16 bits.
Alimentación	Desde 3 V a 5 V.
Consumo estandar	@RX <1 a 16mA, @TX 35mA
Alcance interiores	100 metros a 200metros.
Alcance exteriores	Hasta 20 km según las condiciones del entorno.
Dimensiones	25.4 x 25.4 x 2.5mm.
Precio	57 €

Tabla 3-2: Descripción WM11. Extraído de la hoja de datos del dispositivo.

3.2.3.1 *Instalación y funcionamiento general del módulo RF.*

Para la instalación del módulo de RF es necesario descargarse el driver para que el sistema operativo detecte el chip *FTDI* en caso de que no esté ya instalado. Dichos drivers se pueden descargar de la página web oficial del fabricante⁵.

Una vez instalados los drivers se conecta el módulo de RF al PC (en nuestro caso a IGEPv2 mediante Hub USB) y el sistema operativo ha de reconocer el dispositivo y asignarle un número y nombre de puerto. Bajo Linux, el modo de conocer el nombre asignado al dispositivo se ha descrito anteriormente en la sección 3.2.2.4 y suele ser del tipo *ttyUSB0*.

Se debe ejecutar un programa de comunicación con el puerto serie como por ejemplo PuTTY⁶ para Linux y Windows, Minicom para Linux o crear, como en el proyecto descrito en este documento, una aplicación propia en lenguaje C para la comunicación con el puerto serie. Dicha aplicación ha sido desarrollada utilizando las funciones de manejo de archivos *fopen*, *fclose*, *fwrite* y *fread* de la librería *stdio.h* (Standard Input-Output header).

⁵ <http://www.ftdichip.com/Drivers/VCP.htm>

⁶ <http://www.putty.org/>

Por último, se deben configurar los parámetros de la comunicación serie en la aplicación desarrollada o en el programa que se vaya a utilizar. La configuración estándar de los módulos creados es: 57600, 8, N, 1 (57600 baudios, 8 bits, sin paridad y un bit de parada). Cabe destacar que la velocidad de la comunicación que está configurada por defecto en el módulo a 57600 baudios es configurable vía comandos.



Figura 3-11: Módulo de RF y antena

Finalmente, ha quedado configurado el módulo de RF mediante una comunicación serie apta para la configuración del módulo y el intercambio de información con otros módulos mediante el uso de los comandos pre programados que se describen en la sección siguiente.

3.2.3.2 Set de instrucciones del módulo de RF

El WM11 y por tanto el módulo de RF construido dispone de un completo set de instrucciones y comandos que permiten configurar las características del WM11 y el envío de mensajes a otros módulos.

Cada comando se compone de 3 caracteres seguido de un espacio, '?' ó '=', dirección IP, separador, datos y finalmente <CR,LF> (comandos de control, *Carriage Return* ó retorno de carro y *Line Feed* o salto de línea). La IP y los datos son opcionales según el tipo de comando. El buffer de comandos es de 80 bytes, no siendo recomendable mandar comandos más largos. En lenguaje C, <CR,LF> se traduce al uso de "/r/n". La Tabla 3-3 muestra una breve descripción de los comandos pre programados en el WM11.

Comando	Descripción	Valor inicial
INF	Muestra IP y versión del producto	051.005 Wlink11s 2A V:3.8
INI	Inicializa el sistema	-
IRF	Inicializa subsistema de radio – test RF	-
RST	Resetear el sistema	
Configuración		
NAM	Nombre amigable del equipo	
ECO	Eco puerto serie	X
BAU	Velocidad puerto serie en baudios	57600
CPS	Configuración puerto serie	N, 000
Red		
LEA	Lista de equipos autorizados	No activada
LNK	Enlace (Link) del equipo	No enlace
Configuración RF		
RFC	Canal RF	3
FEC	Corrección de errores en RF	1
PWR	Potencia transmisión RF	+7 dBm
NCD	Nivel de detección de portadora RF (RSSI)	Desactivado, 255
REP	Repetidor simple. Activación - desactivación	Desactivado
RF		
RSI	Devuelve valor portadora RF (RSSI) y del último SMS recibido	-
Puerto de entrada-salida		
OUT	Escribe en puerto de salida (8 bits)	0
INP	Lee el puerto de entrada-salida (8 bits)	0
CFG	Configura puerto (8 bits) entradas-salidas	-
Mensajes de comunicación RF		
SMS	Envía mensaje de texto o binario. Máximo 54 bytes	
SMC	Mensaje al sistema de comandos remoto	
SMQ	Control de calidad de mensajes	
SMI	Mensaje de petición de identificación de equipos	
CMS	Configuración recepción SMS	
TRZ	Activa traza RF test recepción calidad SMS	Desactivado

Tabla 3-3: Set de instrucciones del WM11. Extraído del *datasheet* del dispositivo.

A continuación, se describen más detalladamente los comandos más importantes utilizados en el presente proyecto.

- **BAU – Velocidad del puerto serie en baudios**

El comando configura la velocidad en baudios del puerto serie. Por defecto es 57600 baudios. Ejemplo de uso:

```

> BAU=9600           Configura Puerto a 9600 baudios
> BAU=115200        Configura Puerto a 115200 baudios
> BAU?              Consulta la velocidad configurada del puerto
57600
  
```

Es interesante realizar un cálculo sencillo del tiempo empleado en la comunicación con el PC para elegir la velocidad idónea. Este tiempo es importante para calcular la interactividad del sistema. Para una comunicación a 57600 baudios, 20 caracteres tardan aproximadamente 3.33 ms. El ancho de banda de canal de RF es 90 SMS por segundo. Como debe quedar entre un 20% ó un 30% de tiempo libre el canal sobre todo si los mensajes son asíncronos, el ancho de banda efectivo es de 60 SMS por segundo. Este ancho de banda es suficiente para la aplicación que se describe en este documento, por lo que la velocidad elegida de comunicación es de 57600 baudios.

Velocidad [Baudios]	Tiempo por byte [useg]
2400	4164
4800	2082
9600	1041
19200	520
38400	260
57600	174
76800	130
115200	87

Tabla 3-4: Tabla de baudios

- **RFC – Canal RF**

Consulta o cambia el canal de RF. Hay 19 canales separados 100 KHz en la banda de RF ICM Europea entre 868,1 MHz y 869,9 MHz. Ejemplo de uso:

```

> RFC               Consulta el actual canal seleccionado
> RFC=15            Selecciona el canal 15 de forma no permanente
< RFC 15

> RFC=15,G          Selecciona el canal 15 de forma permanente
< RFC 15
  
```

La opción ‘G’, grabar, guarda el canal en la EEPROM y cuando se reinicia el sistema se usa ese mismo canal guardado. Sin embargo, si no se usa la opción ‘G’ el canal RF seleccionado se cambiará al inicializar el sistema en sus múltiples modos.

Se debe tener en cuenta que si tenemos varios equipos muy cerca en canales adyacentes con la potencia al máximo y la sensibilidad al máximo, los mensajes del otro canal pueden llegar a ocupar tiempo en el canal propio, ya que se pueden llegar a detectar, aunque en ningún caso se pueden visualizar SMS de otros canales. Una buena solución es dejar al menos 1 canal libre entre equipos muy cercanos ó bajar la potencia – sensibilidad si es posible.

# Canal RF	Frecuencia [MHz]
1	868,1
2	868,2
3	868,3
4	868,4
5	868,5
6	868,6
7	868,7
8	868,8
9	868,9
10	869,0
11	869,1
12	869,2
13	869,3
14	869,4
15	869,5
16	869,6
17	869,7
18	869,8
19	869,9

Tabla 3-5: Canales RF

- **PWR – Potencia RF de transmisión**

Consulta ó cambia la potencia RF de transmisión del WM11. Hay 10 potencias pre-programadas y calibradas en dBm, desde -30 dBm hasta 10 dBm. La precisión es de ±1 dBm. Ejemplo de uso:

```

> PWR           Consulta la potencia RF de transmisión seleccionada
< PWR 009,009  Lectura: valor actual seleccionado 9, en memoria 9

> PWR=5        Selecciona potencia 5 no permanente
< PWR 005,009  Lectura: valor actual seleccionado 5, en memoria 9

> PWR=6,G      Selecciona la potencia 6 de forma permanente
< RFC 15       Lectura: valor actual seleccionado 6, en memoria 6
  
```

La opción ‘G’ permite grabar el canal en memoria para que cuando se reinicie el sistema la potencia seleccionada permanezca activa.

Se debe tener en cuenta que la potencia óptima no es la mayor. Depende mucho del entorno de uso. Puede necesitar desde toda la potencia para mejorar el alcance en distancias largas, como poca potencia para utilizarlo en celdas pequeñas de 1 metro de radio. Mucha potencia puede molestar a equipos vecinos en los canales cercanos ó a equipos de la propia red que no se desea molestar cuando se está a determinada distancia.

# Potencia	Potencia en dBm
10	+10
9	+7
8	+5
7	0
6	-5
5	-10
4	-15
3	-20
2	-25
1	-30

Tabla 3-6: Potencia de emisión en WM11

Si usa equipos de ultra-bajo consumo es importante usar la potencia mínima necesaria que entregue un buen compromiso entre un buen radio enlace y consumo. A -30 dBm el módulo WM11 puede consumir +12mA, a 0dBm +16mA y a +7dBm +30mA sobre el consumo en reposo.

- **RSI – Lectura RSSI (Portadora RF)**

Lee el nivel de Rssi (Nivel de RF) actual y el del último SMS recibido en dBm. Ejemplo de uso:

```

> RSI          Lee Nivel RSSI RF actual y del ultimo SMS.
< -114, -60 dBm Valor actual Rssi en dBm (-114) en reposo y -60
                  dBm el último SMS.

```

Este comando se puede usar para determinar el nivel de ruido ambiente. El nivel de ruido en reposo de RF típico es de -115dBm a -99dBm, dependiendo del entorno y de la antena usada. Normalmente debe ser menor de -97dBm y el óptimo es de -115dBm aproximadamente. Si el nivel es mayor de -97dBm de forma permanente, es probable que un emisor ajeno al sistema ó un ruido electromagnético en el canal de RF seleccionado generen un nivel de ruido indeseado. La solución más sencilla es cambiar el canal de RF por otro lo más alejado posible del actual. Otra solución si se sabe de dónde proviene el ruido y si es posible, puede ser usar una antena direccional que apunte a los equipos propios con ganancia y rechace los ajenos en otra dirección.

Una forma práctica de determinar la fiabilidad del radio es enviando un SMQ de un equipo a otro. Para un óptimo radio enlace debería tener unos -100 a -117 dBm de nivel de ruido y una señal cuando recibe un SMS válida mejor de -95 dBm y preferiblemente mejor de -90dBm. Por supuesto podrá recibir mensajes muy cerca del nivel de ruido e incluso en algunas ocasiones por debajo del nivel de ruido ya que el WM11 de radio digital empleado permite extraer datos válidos en extremas condiciones.

- **SMS – Envía mensaje corto de texto**

Envía un mensaje de texto al equipo receptor con la dirección IP destino. La sintaxis de la instrucción SMS tiene el siguiente aspecto:

SMS xxx.xxx DATOS

, siendo xxx.xxx la IP del equipo destino y DATOS el mensaje de texto a enviar. Se puede enviar un SMS *broadcast*, a todos los equipos de la red, escribiendo en IP 000.000. Ejemplo de uso:

Envío SMS por módulo con IP 127.032:

```
> SMS 054.126 Mensaje privado a un solo equipo enviado por 127.032
> SMS 000.000 Mensaje broadcast enviado por 127.032
```

Recepción SMS por módulo con IP 054.126 :

```
< SMS 127.032 -037 Mensaje privado a un solo equipo enviado por 127.032
< SMS 127.032 -054 Mensaje broadcast enviado por 127.032
```

El SMS recibido contiene la IP del equipo emisor tal y como muestra el ejemplo. También incluye la potencia RSSI con que se ha recibido el mensaje. Este dato nos va a permitir calcular la distancia a la que se encuentra el equipo emisor.

Si IP <> 000.000, el mensaje sólo lo recibe el equipo con la IP destino. No puede ser escuchado por terceros. Si IP = 000.000, envía un mensaje *broadcast*, a todos los equipos que estén en recepción. La longitud máxima del texto del mensaje es de 52 caracteres. El mensaje debe terminarse con <CR LF>. El rango de las IP es desde 000.000 a 255.255.

- **SMQ – Envía mensaje con petición de respuesta**

Envía mensaje de texto al equipo receptor con la dirección IP destino indicando que devuelva un SMS con la RSSI recibida. El mensaje debe terminarse con <CR LF>. Es similar a un SMS, sólo que provoca la contestación automática del receptor, con la RSSI recibida. Ejemplo de uso:


```
Módulo con IP 127.032:  
  
Envía: > SMQ 054.126 Hola  
Recibe: < SMS 054.126 -041 -039, Ok  
  
Módulo con IP 054.126:  
  
Recibe: < SMQ 127.032 -039 Hola  
Envía automáticamente: > SMS 127.032 -039, OK
```

En resumen, el módulo emisor 127.032 envía un SMQ al módulo receptor 054.126, el cuál recibe el mensaje con la potencia recibida. Este módulo envía automáticamente un SMS al emisor inicial 127.032 que recibe el SMS con ambas potencias de recepción, la del mensaje que él mismo envía y el último mensaje que recibe. Este comando es muy útil para comprobar la calidad del radioenlace entre dos ó más equipos.

Si IP <> 000.000, el mensaje sólo lo recibe el equipo con la IP destino. No puede ser escuchado por terceros.

Si IP = 000.000, modo *broadcast*, el mensaje lo reciben todos los módulos que estén escuchando. Cada uno de ellos contestará en tiempos diferentes dependiendo de su IP para evitar colisiones.

Tras un largo análisis, se ha descubierto que este comando en modo *broadcast* no funciona correctamente. El comportamiento observado difiere del descrito en el documento oficial del WM11, el cual se puede descargar de [18]. Este error es descrito en la sección 3.2.3.4.

- **SMI – Envía mensaje de petición de identificación a todos los equipos de la red**

Envía mensaje de petición de identificación a todos los equipos de la red en el canal de RF activo. Es similar a un SMS, sólo que provoca la contestación aleatoria y automática de los equipos en red con la RSSI recibida. El estudio de este comando, también ha arrojado resultados erróneos y por lo tanto diferentes a los descritos en el *datasheet* del componente WM11. El error es analizado en la sección 3.2.3.4. En la sección actual se describe el comportamiento esperado y descrito por el fabricante.

Un SMI es un mensaje a IP 000.000 (*broadcast*). Cuando hay varios equipos escuchando, cada uno de ellos contestará en tiempos diferentes de forma aleatoria entre 5 y 9999 milisegundos, para evitar colisiones. Es útil para identificar los equipos en red desde 1 a 500 equipos aproximadamente. Ejemplo de uso en una red con 4 módulos de RF:

```

Módulo con IP 003.122:

> SMI 1300                                Petición ID en un máximo de 1,3 segundos

< SMS 054.126 -054, WM11 E1                Mensaje recibido desde 054.126
< SMS 124.006 -044, WM11 E2                Mensaje recibido desde 124.006
< SMS 223.196 -082, E3                    Mensaje recibido desde 223.196

Módulos con IP 054.126 y ...:

< SMI 003.122, 1300: 902                  ID requerida desde 003.122 en 1300 ms máx.
...                                         La enviará en 902 mseg.
...
> SMI ID                                    A los 902 mseg aprox..... ID enviada

```

El parámetro de tiempo máximo de contestación en milisegundos es útil para ajustar dentro de un límite el tiempo máximo en el que se identificarán todos los equipos de una red.

3.2.3.3 Antena

La antena seleccionada para la emisión y recepción de la información del módulo de RF ha sido la antena monopolo de $\frac{1}{4}$ de onda FLEXI-SMA90-868 fabricada por RF Solutions [Figura 3-12]. Funciona a una frecuencia de 868 MHz y mide 135.88 mm de largo y 12.5 mm de diámetro. Posee un conector SMA hembra y 50 ohmios de impedancia.

Este tipo de antena consiste en un cable radiante montado sobre una superficie conductora llamada plano de masa.



Figura 3-12: Antena

La antena tiene un diagrama de radiación omnidireccional (ver Sección 2.3.4) como el mostrado en la Figura 3-13. Radia y capta en todas las direcciones pero no con la misma potencia. La máxima dirección de emisión/recepción de potencia está en el plano horizontal perpendicular al eje z, a la antena, exactamente en la zona de color rojo de la imagen.

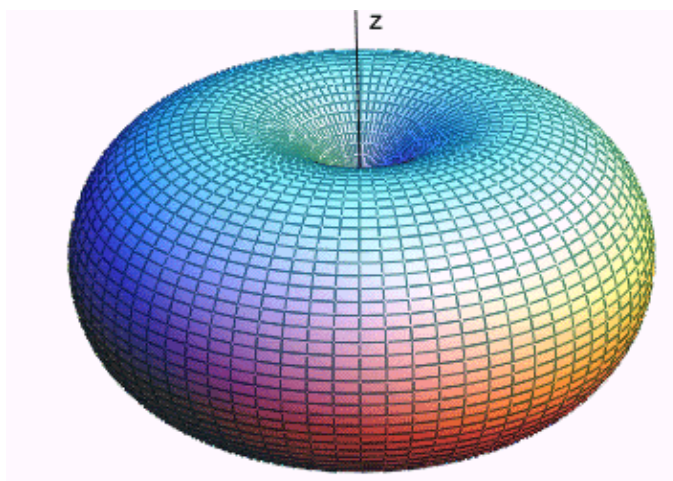


Figura 3-13: Diagrama de radiación omnidireccional

3.2.3.4 Errores de funcionamiento

Tal y como se anticipó previamente en la Sección 3.2.3.2 se han encontrado dos errores en el funcionamiento de los comandos SMQ modo *broadcast* y SMI con respecto a lo descrito en el documento oficial del producto WM11. A continuación, se detallan las pruebas que se han realizado para encontrar dicho error de funcionamiento.

La instrucción SMQ envía un mensaje de texto al equipo receptor con la dirección IP destino indicando que devuelva un SMS con la RSSI recibida. En el caso de enviar este comando con IP = 000.000, modo *broadcast*, el manual del WM11 describe literalmente el comportamiento esperado del siguiente modo:

“Cuando el mensaje SMQ es broadcast y hay varios equipos escuchando, cada uno de ellos contestará en tiempos diferentes, dependiendo de su IP, para evitar colisiones. Es preferible enviar SMQ a IP’s concretas.”

Las pruebas realizadas para probar el comando SMQ se realizaron con tres módulos cuyas IPs son las siguientes: 137.005, 137.021 y 137.023. Una de las pruebas realizadas ha sido el envío de un SMQ *bradcast* por 137.005 al resto de módulos. El comportamiento, visto desde el punto de vista del módulo emisor, descrito por el fabricante debería ser:

```

Módulo 137.005 envía:
> SMQ 000.000 ¿Donde estáis?

Módulo 137.005 debería recibir:
< SMS 137.021 -0.52 -0.54, OK   El módulo 137.021 responde enviando la potencia recibida.
< SMS 137.023 -0.42 -0.44, OK   El módulo 137.023 responde enviando la potencia recibida.
  
```

Sin embargo, al poner en práctica la situación anterior, 137.005 envía un SMQ *broadcast*, el resultado obtenido es el siguiente:

```
137.005 Wlink11s 2A V:5.14, HCTLab RF-1

  Emisión:

> SMQ 000.000 ¿Dónde estáis?

  Recepción:

< SMS 137.023 -041 -037, Ok
```

```
137.023 Wlink11s 2A V:5.14, HCTLab RF-3

< SMQ 137.005 -037 ¿Dónde estáis?
```

```
137.021 Wlink11s 2A V:5.14, HCTLab RF-2

< SMQ 137.005 -064 ¿Dónde estáis?
```

En resumen, en la práctica si un módulo envía un SMQ *broadcast*, el resto de módulos del sistema lo reciben pero el módulo emisor sólo recibe el mensaje de contestación de uno de los dos módulos receptores.

El segundo comando con un comportamiento defectuoso es el SMI. Este comando se asemeja al SMQ en modo *broadcast* y el error encontrado es también similar. La descripción del fabricante al comportamiento del comando SMI es la siguiente:

“Envía mensaje de petición de identificación a todos los equipos de la red.

...

Es similar a un SMS, sólo que provoca la contestación aleatoria y automática de los equipos en red (a partir de la versión 3.8), con la RSSI recibida.

...

Un SMI es un mensaje a IP 000.000 (*broadcast*). Cuando hay varios equipos escuchando, cada uno de ellos contestará en tiempos diferentes de forma aleatoria entre 5 y 9999 milisegundos , para evitar colisiones.”

En la misma situación que para el comando anterior, tres módulos 137.005, 137.021 y 137.023, el comportamiento del comando según el fabricante ha de ser el siguiente:

```
Módulo con IP 137.005:  
  
> SMI 1300                                Petición ID en un máximo de 1,3 segundos  
  
< SMS 137.021 -054, WM11 E1                Mensaje recibido desde 137.021  
< SMS 137.023 -044, WM11 E2                Mensaje recibido desde 137.023  
  
Módulos con IP 137.021 y 137.023:  
  
< SMI 137.005, 1300: 902                    ID requerida desde 003.122 en 1300 ms máx.  
...                                           La enviará en 902 mseg.  
> SMI ID                                     A los 902 mseg aprox..... ID enviada
```

Sin embargo, el comportamiento observado tras realizar la misma prueba es el siguiente:

```
137.005 Wlink11s 2A V:5.14, HCTLab RF-1  
  
Emisión:  
  
> SMI 1500  
  
Recepción:  
  
< SMS 137.021 -068 -066,Wlink11s 2A V:5.14, HCTLab
```

```
137.023 Wlink11s 2A V:5.14, HCTLab RF-3  
  
< SMI 137.5, 1500: 1352  
> SMI ID  
.
```

```
137.021 Wlink11s 2A V:5.14, HCTLab RF-2  
  
< SMI 137.5, 1500: 300  
> SMI ID
```

Es decir, cuando un módulo envía un SMI, el resto de módulos del sistema lo reciben pero el módulo emisor sólo recibe el mensaje de contestación de uno de los dos módulos receptores.

En un principio se pensó que el motivo del mal funcionamiento de ambos comandos podía deberse al programa de comunicación serie utilizado, pero al probar con otros programas comerciales, con el programa desarrollado en lenguaje C y con el software específico que proporciona el fabricante para hacer las pruebas con los módulos, el error se repetía en todos ellos.

Otro de los motivos del mal funcionamiento de las instrucciones SMI y SMQ podría haber sido el mal diseño del puerto de comunicación serie-USB mediante el chip FTDI. Podría suceder que el buffer del chip no dejara almacenar dos mensajes seguidos y se perdiera uno.

Finalmente, se descubrió que el error procede del WM11 en sí mismo. Para llegar a esta conclusión se realizó el siguiente experimento. Realizando las mismas pruebas descritas anteriormente se capturaron las señales de las líneas de datos de salida y entrada del módulo WM11, se observó los comandos que entraban y salían directamente del WM11, aislando de este modo el resto del módulo de RF.

Para capturar los datos se utilizó un analizador lógico. El analizador lógico es un instrumento de medida que captura los datos de un circuito digital y los muestra para su posterior análisis. La forma de capturar datos desde un analizador lógico es conectando una punta lógica apropiada en el bus de datos a medir, en nuestro caso en los pines TX y RX del WM11 (Figura 3-10). El analizador lógico utilizado es un 34 CHANNEL LA1034 LOGICPORT LOGIC ANALYZER (ver [19]).

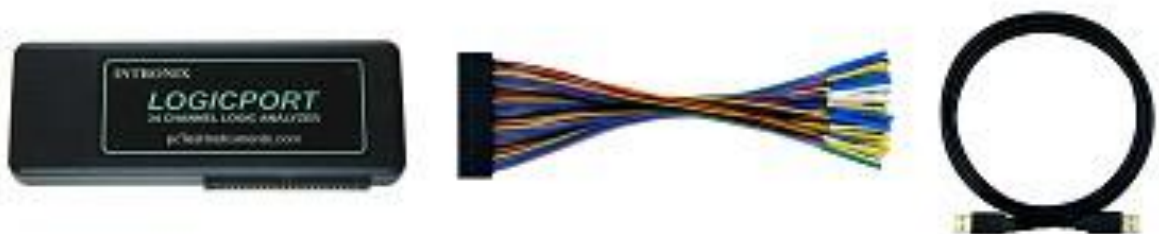


Figura 3-14: Analizador lógico

Tal y como se ha descrito, el experimento a realizar consiste en un sistema con los módulos 137.005, 137.021 y 137.023 en el que uno de ellos, el 137.023, manda un SMQ *broadcast* y un SMI esperando recibir la contestación de ambos módulos restantes. Pinchamos una línea del analizador lógico en el pin RX (de recepción) y otra en el pin de TX (de transmisión) para captar los datos que circulan por dichas líneas durante todo el experimento.

Los resultados los encontramos en las capturas de pantallas mostradas en Figura 3-15 y Figura 3-16. La línea TX (señal '137.023 Envía' en la figura) muestra los datos y

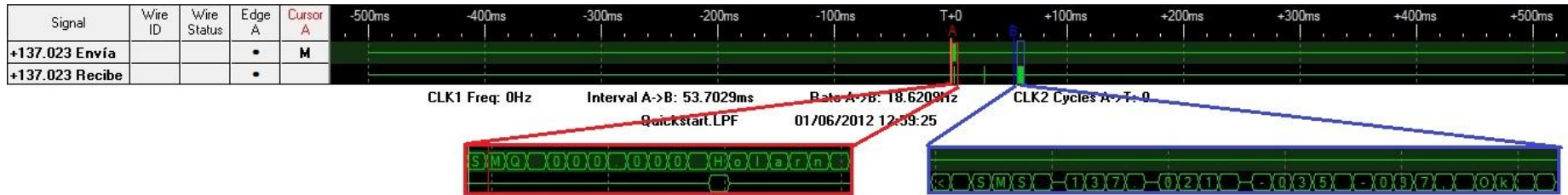


Figura 3-15: Error comando SMQ

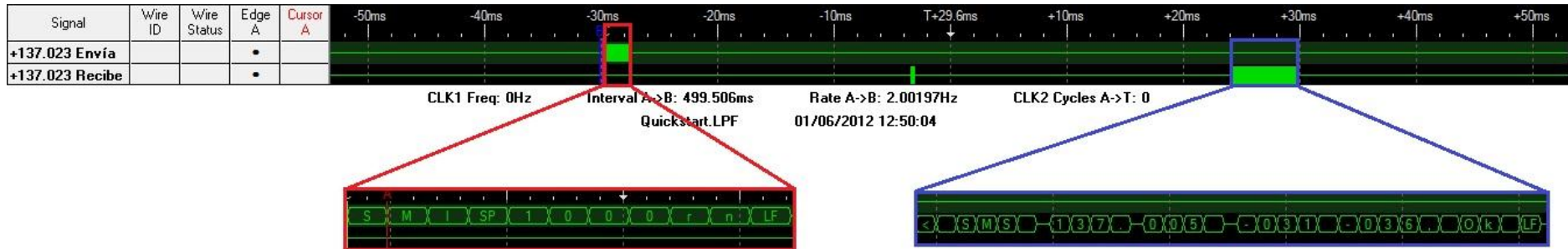


Figura 3-16: Error comando SMI

comandos que el PC envía al WM11. La línea RX (señal '137.023 Recibe' en la figura) muestra los datos que recibe vía radiofrecuencia (pin RF en Figura 3-10) tras en procesado del módulo. En ambas figuras se observa como el módulo emisor sólo recibe la contestación de uno de los restantes módulos. Esto puede deberse a colisiones en la recepción y pérdidas de mensajes pero no parece lógico que se repita en todos los casos y pruebas realizados. Como hemos explicado anteriormente, se ha comprobado que los dos módulos receptores reciben el mensaje por lo que ambos deben enviar el mensaje de contestación y el motivo no puede ser que uno de ellos no lo envíe. El problema debe proceder de la lógica interna del WM11 o algún buffer interno mal diseñado.

3.2.4 Placa auxiliar

Ha sido necesario el diseño y construcción en formato de circuito impreso o PCB (*Printed Circuit Board*) de una placa auxiliar (Figura 3-17) para la interconexión de todos los componentes del robot. La principal función de la placa es la adaptación de las señales procedentes de IGEPv2 al resto de dispositivos del robot (motores, encoders y sensores de distancia) y viceversa. Además, a través de la placa auxiliar se alimentará el resto de componentes del robot gracias al conector Jack incorporado para conectar una fuente de alimentación externa y a los dos pines para conectar una batería. En ambos casos la tensión de entrada que puede aceptar el sistema está entre los 5 V y los 9 V. La placa auxiliar se encarga de regular dicha tensión para obtener en cualquier caso 5 V, que es lo que necesitan todos los dispositivos del sistema. El control de todo el robot lo posee IGEPv2 que a través de los pines de entrada/salida GPIO (ver Figura 3-8) se comunica con la placa auxiliar para manejar el resto de dispositivos. El nivel de tensión de los pines GPIO es 1.8 V mientras que el resto de componentes funciona a 5 V tal y como se detallará más adelante. Por este motivo, todas las señales procedentes de GPIO o dirigidas hacia GPIO deben cambiarse de nivel, de 1.8 V a 5 V o viceversa. Para ello, se ha utilizado TXB0104 de *Texas Instrument* [20], un convertor de nivel de voltaje con 4 puertos bidireccionales automáticos.

Cada motor necesita 2 señales de control (2 motores – 4 señales) que necesitan ser tratadas por un *driver* antes de llegar al motor. El driver de motor utilizado es el DRV8833 de *Texas Instrument* [20], un driver tipo puente H para control de dos motores. Por su parte, cada encoder de cuadratura necesita dos líneas de alimentación (5 V y GND) y posee dos líneas de salida que van directamente al convertor de nivel de tensión y a IGEPv2. Para el conjunto motor-encoder se ha diseñado un conector de 6 pines que agrupa las 6 líneas necesarias para el control del motor y el encoder. De los 6 pines, hay 2 de alimentación para el encoder (Vcc y GND), las dos salidas del encoder y las dos líneas del motor procedentes del driver. Ya que hay dos conjuntos motor-encoder, hay dos conectores de 6 pines.

El robot cuenta con 4 sensores de distancia que también son conectados a través de la placa auxiliar. Cada uno de los sensores de distancia posee dos líneas de alimentación (5 V y GND) y una línea analógica con la información de la distancia al obstáculo. Por este motivo, la placa se ha diseñado con 4 conectores de 3 pines cada uno para la conexión de los sensores. La placa lleva incorporado un convertor analógico-digital (ADC) de 4 canales y 10 bit con función i2c, el MAX1136 de *Maxim*. Se ha elegido usar una comunicación I²C ya que al necesitar 4 sensores de distancia, para los que se necesitan 8 bits tras conversión ADC por sensor, necesitando el uso de muchas líneas y pines GPIO. El

número de pines GPIO es limitado y el I²C nos permite usar únicamente dos líneas para el control de los cuatro sensores. Las líneas I²C procedentes del ADC funcionan a 5 V por este motivo se ha utilizado un convertor de nivel de tensión específico para este tipo de líneas. El convertor elegido ha sido el PCA9306 de *Texas Instrument*, convertor de tensión bidireccional específico para buses I²C. Estas dos líneas I²C se conectan a IGEPv2 a través del conector J990 en los pines 23 y 24 cuyo modo por defecto 0 es i2c_SDA e I²C _SCL respectivamente (ver Figura 3-18). Cabe destacar que el robot posee el hardware para el control y funcionamiento de los 4 sensores de distancia pero no ha sido desarrollada la aplicación software para su utilización ya que las pruebas finales no hacen uso de esta herramienta.

Tal y como se ha explicado con anterioridad, la alimentación de todo el robot se lleva a cabo a través de la placa auxiliar. Para tal fin, posee un conector Jack para conectar una fuente de alimentación externa y un conector de dos pines (Vcc y GND) para conexión de, por ejemplo, una batería. Para encender el robot, a cualquiera de los dos conectores se le debe suministrar una tensión de entre 5.5 V y 9 V. Ya que todo el sistema es alimentado con 5 V, se utiliza un regulador de tensión para este fin. El regulador escogido es el UCC283-ADJ de *Texas Instrument*, un regulador ajustable, en nuestro caso a 5 V.

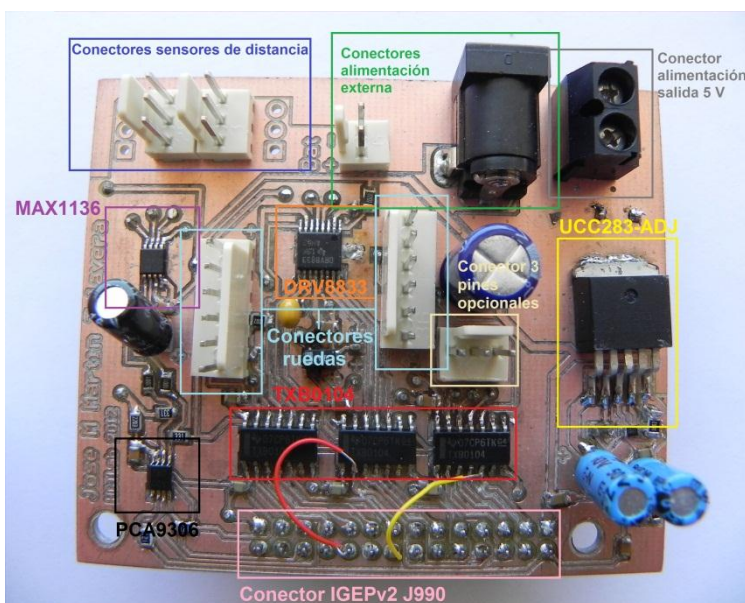


Figura 3-17: Placa auxiliar. Identificación componentes.

3.2.4.1 *Diseño*

El diseño de la placa auxiliar ha sido llevado a cabo con el software de desarrollo electrónico *Altium Designer* [21]. En el Anexo A se puede encontrar el esquemático general diseñado de toda la placa auxiliar.

La conexión de la placa diseñada e IGEPv2 se hace a través del conector J990. La Figura 3-18 muestra el *footprint* utilizado y el esquemático con las señales utilizadas correspondientes a cada pin del conector.

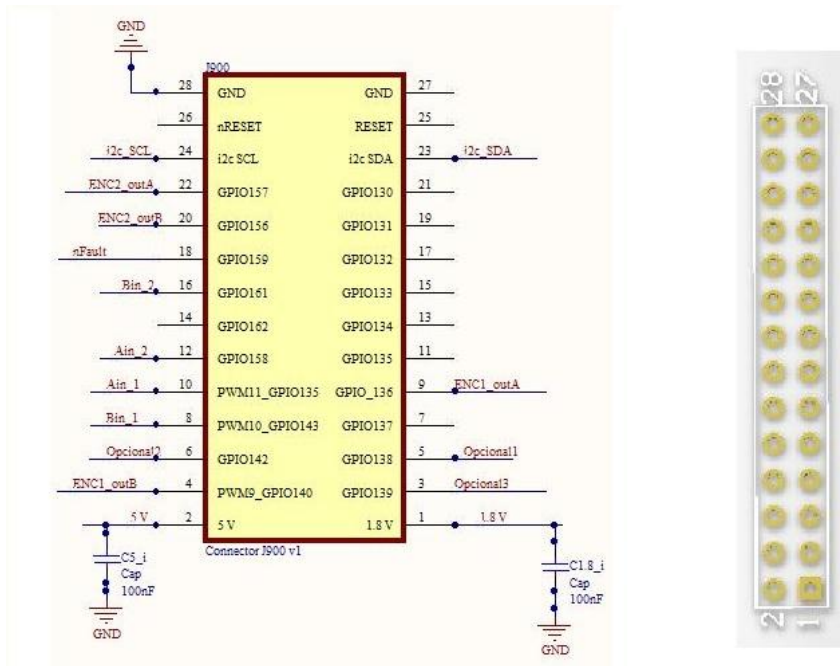


Figura 3-18: Esquemático y footprint conector J990 placa auxiliar

3.2.4.2 Conexión, control de motores y encoders de cuadratura

Los motores son controlados por IGEPv2 a través de determinados pines del conector J990 en modo GPIO. Estas señales de control, antes de llegar al motor, deben pasarse por un driver, DRV8833, que regula la corriente que se le entregará.

Las señales mandadas por el encoder de cuadratura a IGEPv2 van directamente al conector J990.

Ya que tanto las señales del motor, el driver y los encoders funcionan a 5 V y las señales procedentes de J990 son de 1.8 V, ha sido necesario el uso de TXB0104 de *Texas Instrument* [20], un convertor de nivel de voltaje con 4 puertos bidireccionales automáticos.

TXB0104

La Figura 3-19 muestra el esquemático de los tres convertidores de nivel de voltaje usados. El convertor de nivel TXB104 es posible alimentarlo entre 1.2 V y 3.6 V por el pin VccA y este voltaje debe coincidir con el nivel de voltaje de las señales A1:A4, en nuestro caso será 1.8 V procedentes del pin 1 del conector J990 de IGEPv2, Figura 3-8. Además, esta tensión ha de ser siempre inferior a VccB. Por su parte, VccB puede estar entre 1.65 V y 5.5 V y ha de coincidir con la tensión de las señales B1:B4, siendo en este caso de 5 V ya que el resto de componentes aceptan señales de este nivel. El pin OE (*Output Enable*) habilita o deshabilita el funcionamiento del chip, en este diseño el chip está habilitado permanentemente al estar conectado en nivel alto 1.8 V. Los pines NC (*No Connect*) no están conectados a ninguna señal ya que no poseen función alguna.

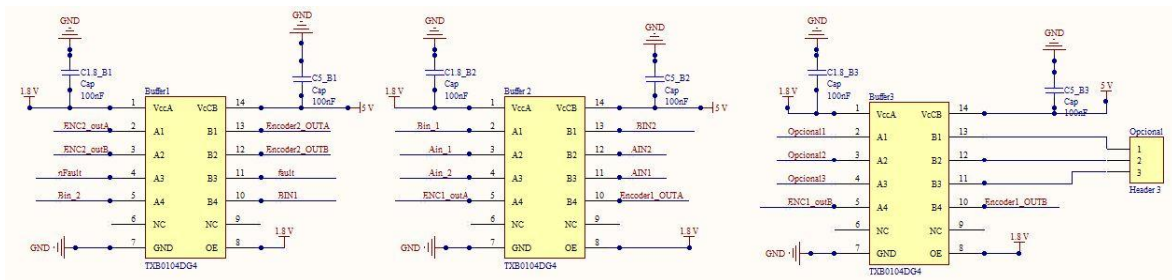


Figura 3-19: TXB0104 Conversores de nivel

Tal y como se aprecia en la figura anterior, por el ‘Buffer1’ pasan las dos señales de salida de uno de los encoders, la señal ‘nFault’ procedente del driver del motor y ‘Bin_2’, una de las dos señales necesarias para el control del motor 2. El ‘Buffer2’ cambia de nivel de tensión ‘Bin_1’, la señal restante para el control del motor 2, ‘A_in_1’ y ‘A_in2’ las señales de control del motor 1 y una de las señales de salida del encoder 1. Finalmente, por el ‘Buffer3’ pasa la segunda señal de salida del encoder 1 y tres líneas opcionales para uso general. Estas tres líneas se conectan al exterior a través de un conector de 3 pines, ‘Opcional1’, y pueden ser configuradas en IGEPv2 como entrada o como salida.

DRV8833

DRV8833 de *Texas Instrument* es el driver de motor elegido para el robot. Contiene dos driver idénticos tipo puente H, para el manejo de dos motores DC, capaces de entregar hasta 1.5 A de corriente. Este tipo de drivers permiten girar al motor en ambos sentidos, avance y retroceso. El rango de alimentación del driver está entre 2.7 V y 10.8 V según la tensión con que se quiera alimentar los motores. En este caso es de 5 V. La siguiente imagen ilustra la posición de los terminales en el encapsulado mientras que la siguiente tabla muestra más en detalle las funciones de cada uno de los terminales del driver:

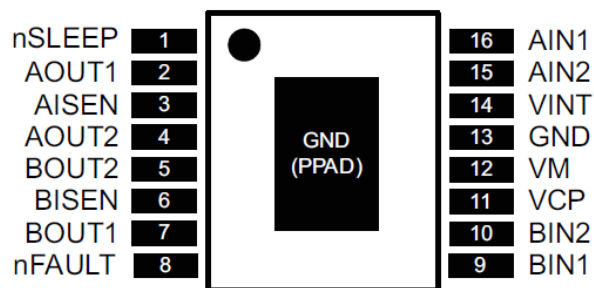


Figura 3-20: Terminales de DRV8833. Extraído de la hoja de datos de dispositivo.

El pin 1 nSLEEP permite activar y desactivar el driver según lo pongamos a nivel alto o bajo respectivamente con el objetivo que controlar el consumo. En el caso de este diseño se ha decidido optar por mantener activo el driver permanentemente añadiendo una resistencia de pull-up de 22 kΩ entre el pin y el nivel alto (5 V) para limitar la corriente.

El pin 8 de salida nFAULT permanece activo alto cuando el funcionamiento es correcto y cambia a nivel bajo cuando el driver entra en situación de fallo debido a un aumento considerable de temperatura o de corriente. Para que el microprocesador, en este caso IGEPv2, pueda leer dicho pin es necesario colocar una resistencia de pull-up de 1 k Ω a los 5 V de nivel alto.

AIN1 y AIN2 son los dos pines que manejan uno de los motores. Para el otro motor quedan reservados los pines BIN1 y BIN2.

AISEN y BISEN se usan para el control de la corriente pero como nuestro diseño no necesita control de corriente se han conectado a GND.

Finalmente, AOUT1 y AOUT2 son las salidas que se conectan a uno de los motores y BOUT1 y BOUT2 controlan el otro motor.

Ha sido necesario un aprendizaje previo del funcionamiento del driver que ha necesitado del diseño y construcción de una pequeña placa de prueba. Uno de los motivos principales de la construcción de dicha placa es la soldadura del *PowerPad* (PPAD), un plano de masa en la parte inferior del chip de difícil acceso al soldar, ya que como no se poseen las herramientas adecuadas para soldarlo ha sido necesario probar previamente el correcto funcionamiento. El método utilizado para soldar dicho pad ha sido colocar en la superficie donde se posa, una pequeña cantidad de estaño que se extiende hasta más allá del contorno del encapsulado del chip. Luego, se sitúa el chip y se calienta con el soldador la parte de estaño que sobresale, fundiendo todo el estaño y soldando el pad. Una vez construida la placa de prueba del chip, se ha probado utilizando una placa *protoboard*. La *protoboard* es una placa para experimentar con circuitos electrónicos y asegurar el buen funcionamiento de los mismos. La Figura 3-21 muestra una *protoboard* y su patrón de conexión interno. La Figura 3-22 muestra el aspecto de la placa de prueba construida.

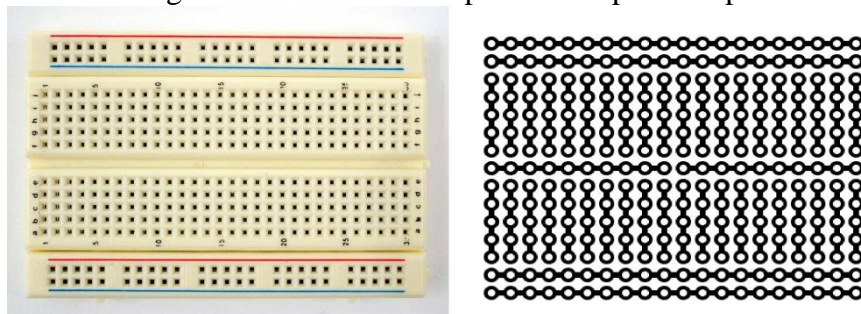


Figura 3-21: Protoboard

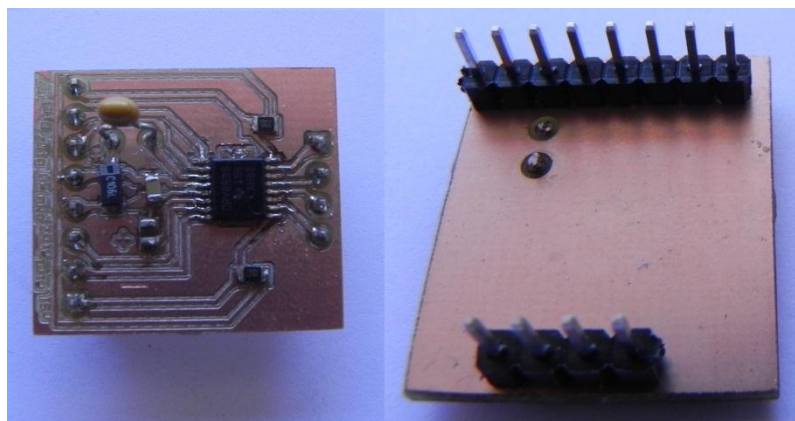


Figura 3-22: Placa prueba driver DRV8833

Tras probar la placa de prueba se comprobó el buen funcionamiento de la misma. Por lo tanto, se procedió a su incorporación en el diseño de la placa auxiliar. La siguiente figura muestra el esquemático y las conexiones del driver DRV8833 en la placa auxiliar:

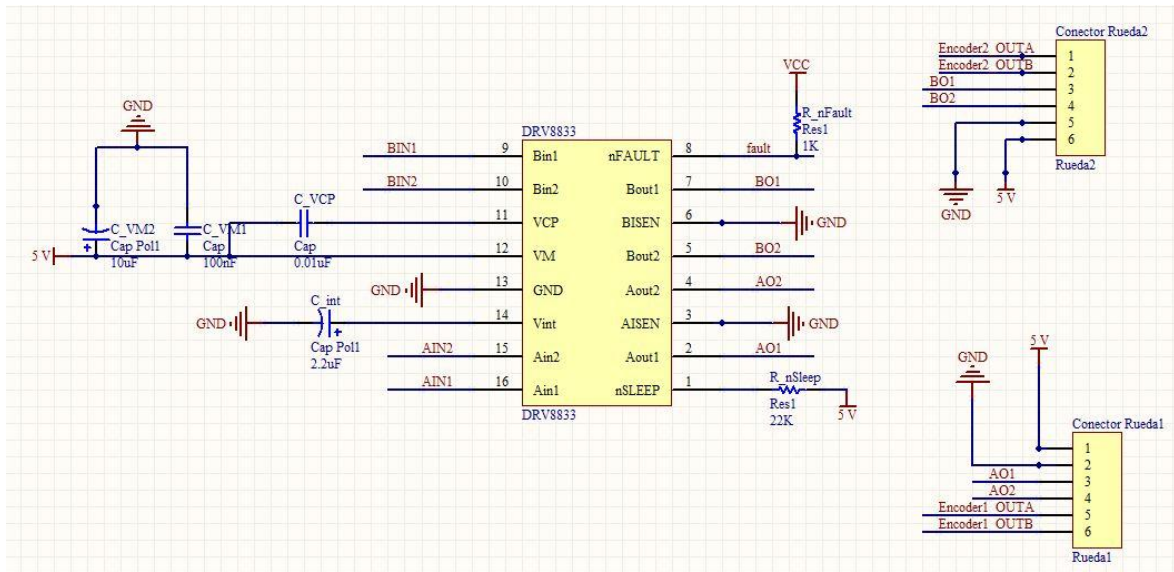


Figura 3-23: Esquemático DRV8833 y conectores ruedas

En la figura también aparecen los conectores para las ruedas. Cada conector entrega las siguientes señales:

- Para el encoder: las dos señales de alimentación (5 V y GND) y las dos señales de salida.
- Para las ruedas: las dos señales procedentes del driver DRV8833 para su control.

Los pines de entrada AIN1 y AIN2 controlan el estado de los pines de salida AOUT1 y AOUT2; similarmente BIN1 y BIN2 controlan el estado de BOUT1 y BOUT2, de acuerdo a la lógica representada en la siguiente tabla:

xIN1	xIN2	xOUT1	xOUT2	Function
0	0	Z	Z	Coast/fast decay
0	1	L	H	Reverse
1	0	H	L	Forward
1	1	L	L	Brake/slow decay

Tabla 3-7: Lógica driver DRV883

En el sistema final, los motores son controlados con una señal de PWM. El PWM (*Pulse-Width Modulation*) o modulación por ancho de pulsos es una técnica que se encarga de modificar el ciclo de trabajo de una señal periódica con el objetivo controlar la cantidad de energía que se entrega a la carga, en este caso el motor y de este modo poder variar su velocidad. Esto es, si la señal que se entrega a una de las entradas del motor, mientras la otra permanece constante, cambia de 1 a 0 controlando la cantidad de tiempo que dicha señal permanece en nivel alto y bajo se consigue variar la velocidad del motor. En 3.2.8.1

se pueden ver las pruebas realizadas para la generación de la señal de PWM. La siguiente tabla muestra las posibles configuraciones del PWM para el control del robot:

xIN1	xIN2	Function
PWM	0	Forward
1	PWM	Forward
0	PWM	Reverse
PWM	1	Reverse

Tabla 3-8: Configuración PWM

3.2.4.2.1 Diseño y conexión sensores de distancia

Los robots en general necesitan de mecanismos y sensores para obtener información del entorno en el que trabajan. Por ello, se decidió que es necesario que el robot disponga de sensores de distancia para detectar los objetos, paredes o cualquier tipo de obstáculo que existe en el medio donde actúe. Además de detectar los objetos será capaz de conocer a la distancia a la que se encuentran dichos obstáculos.

El robot dispone de 4 sensores de distancia para poder obtener información en 4 direcciones diferentes de su entorno. Por ello, la placa auxiliar ha sido diseñada con 4 conectores de 3 pines cada uno para conectar cada uno de los sensores (Figura 3-17 en azul oscuro). El sensor elegido es el GP2Y0A21YK0F de *Sharp* (ver Sección 3.2.5) que dispone de 3 pines: dos de alimentación (5 V y GND) y una salida analógica. El voltaje de la salida analógica corresponde con la distancia al obstáculo. Por este motivo, la placa auxiliar posee un conversor analógico digital, MAX1136, para poder obtener la información digital de la salida analógica y de este modo poder tratarla en IGEPv2. El ADC MAX1136 dispone de 4 canales seleccionables para poder conectar cada uno de los 4 sensores del robot. MAX1136 posee función de comunicación i2c que es la usada para comunicarse con IGEPv2. Utilizando una comunicación i2c se ocupan únicamente las dos líneas (CLK y DATA) de este tipo de comunicaciones para los 4 sensores de distancia ahorrando pines de IGEPv2. Estas dos líneas i2c se conectan a la IGEPv2 a través del conector J990 en los pines 23 y 24 cuyo modo por defecto 0 es i2c_SDA e i2c_SCL respectivamente (ver Figura 3-8). Ya que, como se ha comentado anteriormente, los pines del conector J990 de IGEPv2 funcionan a 1.8 V y las líneas i2c procedentes del MAX1136 trabajan a 5 V ha sido necesario la utilización de un conversor de tensión específico para las líneas i2c. El conversor elegido ha sido el PCA9306 de *Texas Instrument*.

La siguiente figura muestra la captura de pantalla de *Altium Designer* del esquemático del circuito de conexión de los sensores donde se pueden apreciar los 4 conectores para los sensores de distancia, el conversor A/D MAX1136, el PCA9306 y las conexiones oportunas:

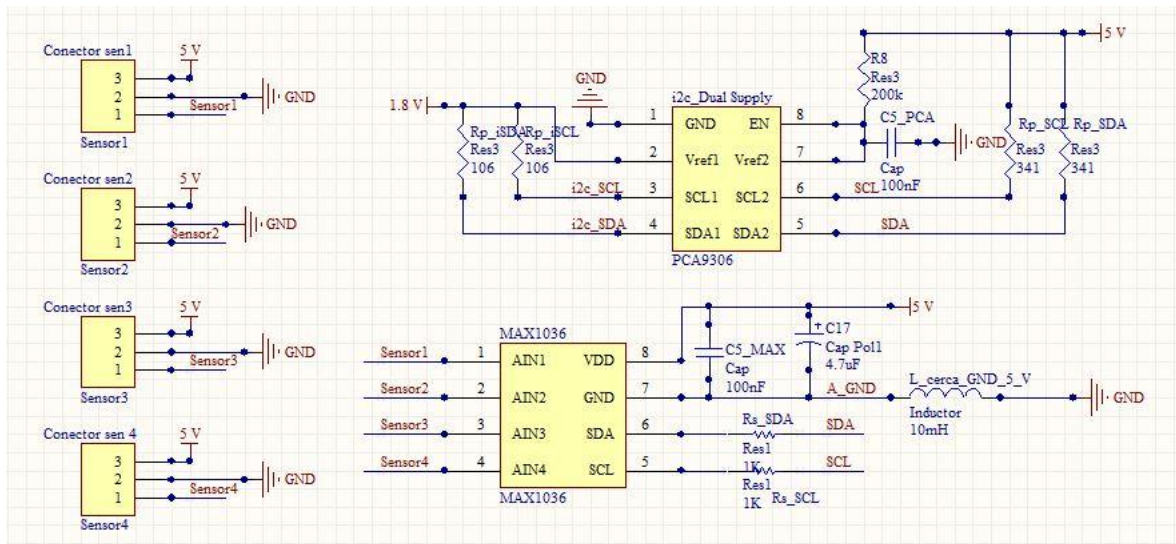


Figura 3-24: Esquemático circuito conexión sensores de distancia

MAX1136

MAX1136 es un convertor analógico-digital de 10 bits, 4 canales, bajo consumo y función i2c fabricado por *Maxim*. Opera entre 4.5 V y 5.5 V y consume 670 μ A. La siguiente figura muestra la posición física de los terminales que posee el convertor:

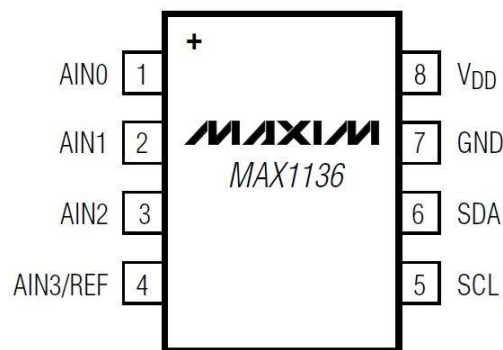


Figura 3-25: Terminales MAX1136

Los terminales 5 y 6 son los pines para la comunicación i2c (SDA y SCL). Por otro lado, los terminales 1, 2, 3 y 4 son los 4 puertos de entrada analógicos a los que se conectan las señales analógicas de los sensores de distancia.

PCA9306

El PCA9306 de *Texas Instrument* es un convertor bidireccional de nivel de tensión para las líneas SDA y SCL de las comunicaciones i2c. La Figura 3-26 muestra la posición de los terminales en el chip. V_{REF1} es conectado a 1.8 V para que las señales SCL1 y SDA1 funcionen a 1.8 V y puedan ser conectadas al conector J990 de IGEPv2. Por su parte, V_{REF2} es conectado a 5 V para que el puerto 2 del dispositivo (SDA2 y SCL2) funcione a los 5 V procedentes del convertor analógico-digital MAX1136.

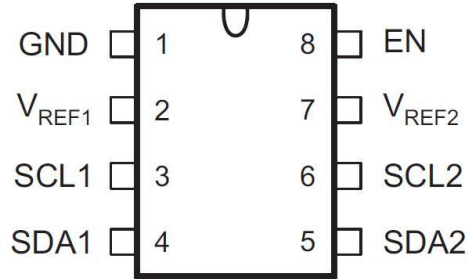


Figura 3-26: Terminales PCA9306. Extraído del *datasheet* del dispositivo

El pin EN permite habilitar y deshabilitar el dispositivo. Si se conecta a nivel bajo, el conversor deja de funcionar y sus puertos quedan en alta impedancia. En el diseño desarrollado dicho pin está permanentemente en nivel alto conectando, de este modo, el puerto 1 con el 2 y permitiendo el flujo bidireccional de los datos.

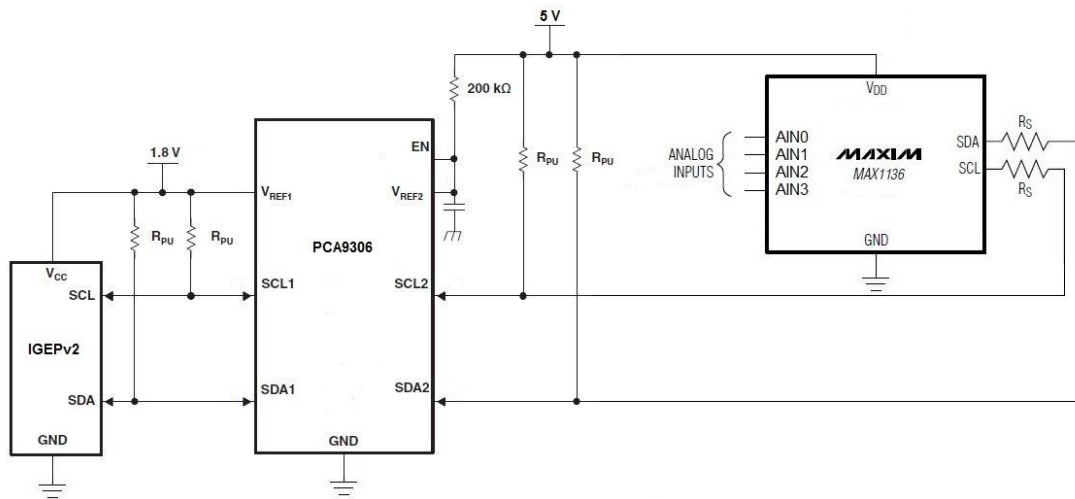


Figura 3-27: Esquema del circuito sensores de distancia.

La imagen anterior ilustra el esquema de las conexiones empleadas en el diseño del circuito. Las líneas SCL y SDA, tanto en la parte a 1.8 V o a 5 V, necesita de resistencias de pull-up (R_{PU} en la figura) para limitar la corriente y para proveer el nivel lógico alto en el conversor. Según la hoja de datos del PCA9306, para trabajar con 15 mA las resistencias de pull-up siguen la siguiente relación:

$$R_{PU} = \frac{V_{REFx} - 0.35 V}{0.015 A}$$

por lo que el valor de dichas resistencias, con un margen positivo del 10% aconsejado por el fabricante, son: 341 Ω para $V_{REF2} = 5 V$ y 106 Ω para $V_{REF1} = 1.8 V$.

3.2.4.2.2 Diseño del circuito de alimentación

Como ya se ha venido comentando, la alimentación de tensión del robot se lleva a cabo a través de una batería portátil o fuente de alimentación externa que se conecta a la placa auxiliar para alimentar al resto de componentes que forman el robot. El rango de tensión de alimentación permitido por dicha fuente externa oscila entre los 5 V y los 9 V, proporcionando, de este modo, cierto grado de libertad en la forma de alimentación. Además, las baterías tienden a descargarse y a suministrar menos tensión con el uso, siendo una característica obligatoria dicho margen.

La placa auxiliar posee dos conectores (ver Figura 3-17 en verde) para conectar la fuente externa de tensión: un conector Jack preparado para conectar un adaptador AC/DC para ser usado en las pruebas estáticas iniciales y un conector de dos pines para conectar cualquier tipo de batería portátil externa y así dotar de autonomía al robot. En ambos casos, la tensión ha de estar entre 5 V y 9 V y debe suministrar, al menos, 1.5 A. Cabe destacar, que no existe riesgo de cortocircuito si se conectan simultáneamente una fuente de tensión externa a cada uno de los dos conectores porque se ha diseñado el circuito de tal modo que al enganchar un conector al Jack, se aísla el GND del conector de dos pines dejando sin funcionamiento éste conector y dejando la alimentación de todo el robot en manos de la fuente conectada al primero.

Todos los componentes que forman el robot funcionan a 5 V por lo que ha sido necesario el uso de un regulador de tensión, UCC283-ADJ de *Texas Instrument*, para obtener los 5 V fijos a partir de la tensión suministrada externamente, la cual, tal y como se ha descrito anteriormente, puede estar entre 5 V y 9 V.

El circuito, además, posee un LED (*Light Emitting Diode*) o diodo emisor de luz, de color verde, que emite luz cuando existe tensión de alimentación en el robot, informando del correcto funcionamiento de esta parte del diseño. También se ha añadido al diseño de la placa un conector de dos pines, 5 V y GND, para alimentar cualquier otro dispositivo que fuera necesario añadir posteriormente al robot en caso de que fuese necesario (ver Figura 3-17 en gris).

A continuación, se muestran los esquemáticos diseñados en *Altium Designer* del circuito de alimentación:

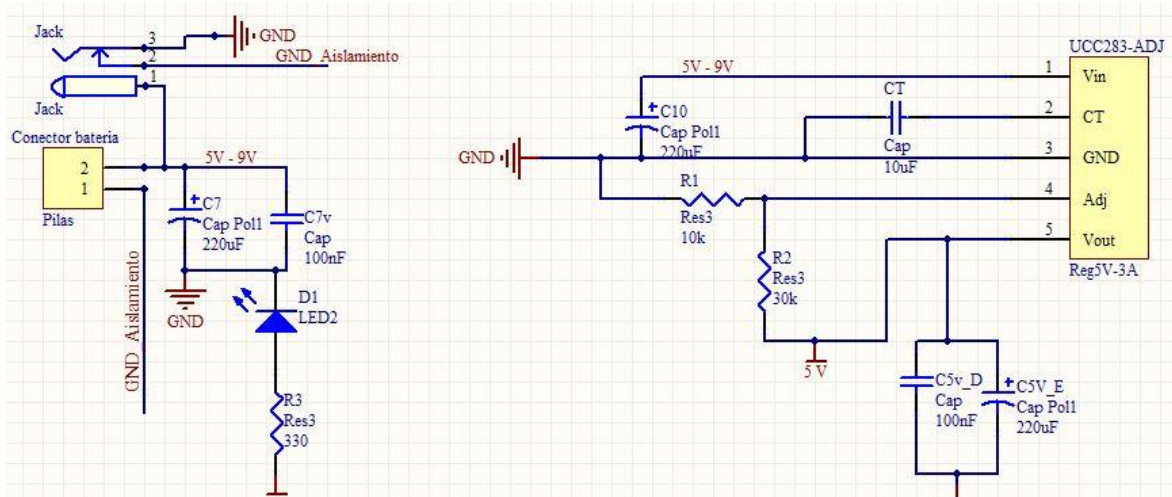


Figura 3-28: Esquemático circuito alimentación

UCC283-ADJ

UCC283-ADJ es un regulador de tensión ajustable de alta precisión. Permite un voltaje de entrada máximo de 9 V y puede llegar a suministrar hasta 3 A en la salida. El límite superior de alimentación externa del robot en general viene fijado por el máximo valor de 9 V de tensión de entrada que permite este componente. El límite inferior, 5 V, es fijado por el hecho de que para obtener 5 V a la salida del regulador, que es la tensión que todos los componentes de la plataforma necesitan, se necesitan a la entrada al menos 5 V.

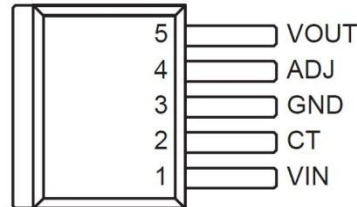


Figura 3-29: UCC283-ADJ. Extraído de la hoja de dato del dispositivo

La tensión de salida se puede programar colocando las resistencias oportunas según el caso. La Figura 3-29 presenta la posición física de los terminales del UCC283-ADJ. El pin ADJ permite elegir la tensión de salida colocando una resistencia R_1 entre ADJ y GND y una resistencia R_2 entre VOUT y ADJ que sigan la relación siguiente (siendo $V_{OUT} = 5$ V):

$$V_{OUT} = \frac{1.25 \text{ V} \times (R_1 + R_2)}{R_1} = 5 \quad \rightarrow \quad R_1 = \frac{R_2}{3}$$

En este caso, se ha elegido $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ y $R_2 = 30 \text{ k}\Omega$. La Figura 3-30 muestra el esquema del conexión típica (y el usado) del UCC283-ADJ procedente del *datasheet* del dispositivo suministrado por el fabricante. El pin CT permite fijar el tiempo que permanece el dispositivo deshabilitado en caso de producirse un cortocircuito que podría dañarlo. Colocando un condensador entre CT y GND se consigue programar dicho tiempo de acuerdo a la siguiente relación:

$$t = 750k \times C[F]$$

en este caso, se ha usado un condensador de 10 μ F que fija el tiempo en 7,5 segundos.

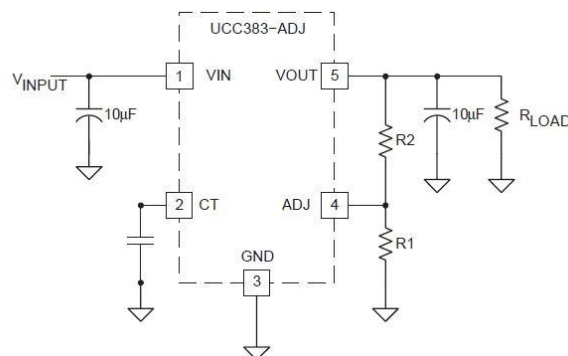


Figura 3-30: Conexión típica UCC283-ADJ. Extraído de la hoja de datos del fabricante

El UCC283-ADJ necesita disipar la energía innecesaria de la regulación mediante calor por lo que posee una superficie disipadora. Para favorecer la disipación, esta superficie se posiciona sobre una extensa zona de cobre en la parte superior de la placa auxiliar que además se comunica, mediante el uso de vías, con otra zona disipadora de la parte inferior de la misma distribuyendo mejor el calor.

3.2.4.3 Construcción

La placa auxiliar diseñada ha sido construida en formato de circuito impreso (PCB) en el taller de la EPS de la Universidad Autónoma de Madrid mediante el uso de una máquina fresadora, *ProtoMat S100 de LPKF*, como la mostrada en la Figura 3-31.



Figura 3-31: Fresadora ProtoMat S100

Antes de la construcción ha sido necesario el diseño del *layout* del PCB final que incluye el diseño físico del *footprint* de cada uno de los componentes y el rutado de las pistas entre ellos en el PCB final. En el Anexo A.B se encuentran las capturas de pantalla de *Altium Designer* de las capas utilizadas, *TOP* y *BOTTOM*, del circuito impreso.

Una vez hecho esto, es necesaria la generación de los ficheros que se le han de pasar a la fresadora para que pueda construir correctamente el PCB final: un fichero del *TOP*, otro del *BOTTOM* y un tercero con la información de las vías.

Posteriormente a la construcción del PCB, se procede a soldar todos y cada uno de los componentes que integran la placa auxiliar. Ésta etapa ha sido desarrollada en el taller propio del grupo HCTLab que posee todos los aparatos necesarios: estación de soldadura y el resto de herramientas necesarias. La siguiente imagen muestra el aspecto del *layout 3D* procedente de *Altium Designer* y el aspecto final de la placa auxiliar una vez construida, tanto la parte superior como la inferior:

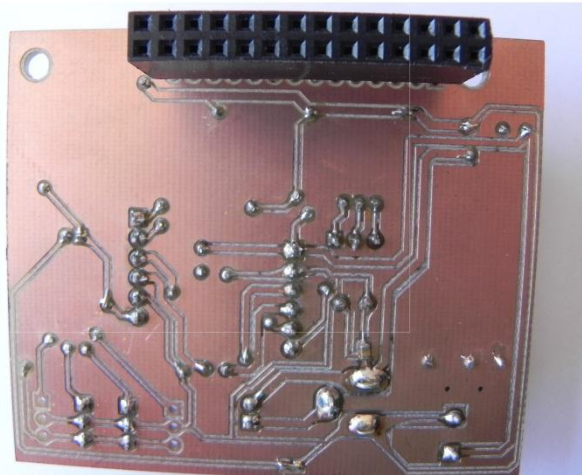
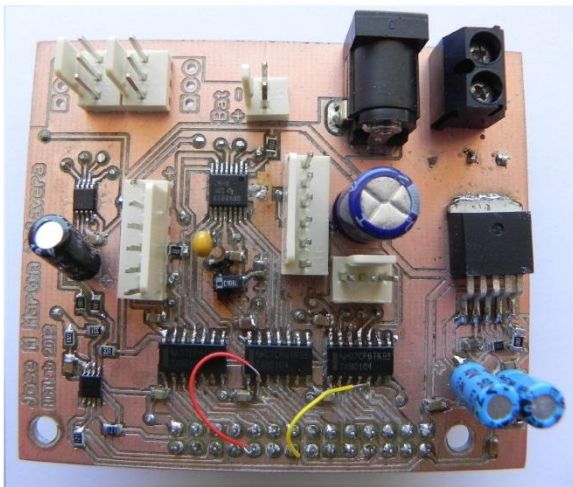
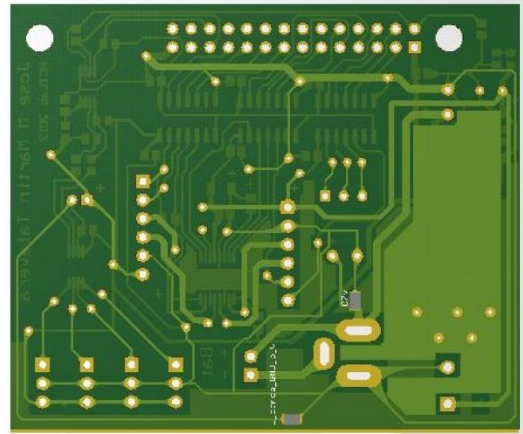
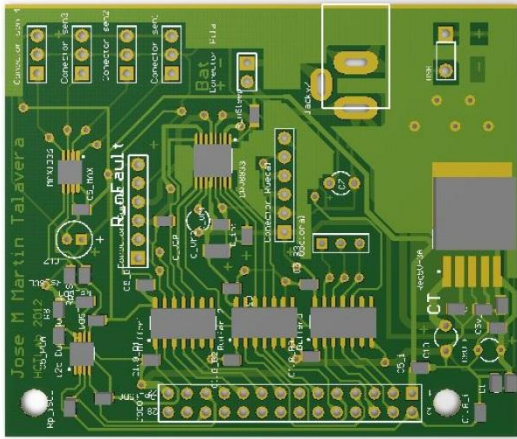


Figura 3-32: Placa auxiliar

3.2.5 Sensores de distancia

El modelo de sensor de distancia escogido para el diseño del robot es el GP2Y0A21YK0F de Sharp [22]. Es un sensor que mide la distancia a cualquier obstáculo opaco, compuesto por la combinación de un PSD (*Position Sensitive Detector*), IRED (*InfraRed Emitting Diode*) y un circuito de procesamiento de señal.

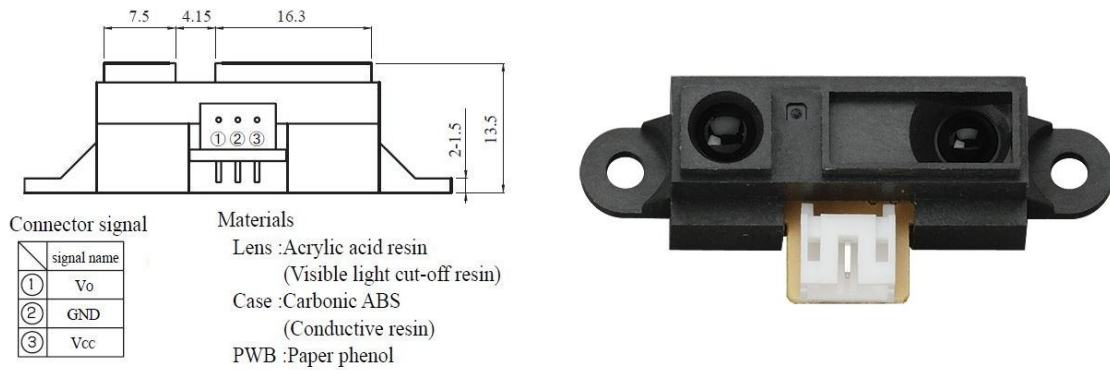


Figura 3-33: Sensor de distancia. Extraído del *datasheet* del sensor.

Las dimensiones del componente son: 29.5×13×13.5 mm. La tensión de alimentación que se le ha de aplicar oscila entre 4.5 V y 5 V, aplicándola entre los pines 3 (V_{cc}) y 2 (GND) representados en la Figura 3-34. El tercer y último pin, el número 1, es la tensión de salida que depende de la distancia a la que se encuentra un obstáculo, siguiendo la relación mostrada en la Figura 3-35. Como se puede apreciar en la gráfica, el rango de medida de distancia está entre 10 cm y 80 cm, donde el voltaje de la salida (V_{OUT}) puede coger valores entre los 0.5 V y los 3 V.

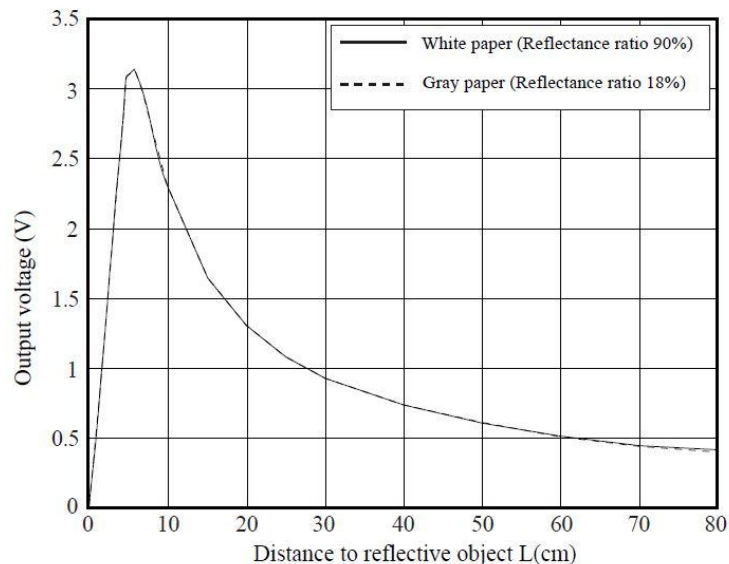


Figura 3-35: Sensor distancia - Relación V_{OUT}/Distancia. Extraído de la hoja de datos del sensor

3.2.6 Motores, encoders de cuadratura y ruedas

El robot está provisto de dos motores y dos ruedas que permiten su movimiento y autonomía. Además, dispone de un encoder de cuadratura por cada uno de las dos ruedas que permiten conocer la cantidad de movimiento de éstas y, por lo tanto, la distancia de desplazamiento del robot.

Se ha elegido el set de ruedas, motores y encoders de cuadratura de Pololu [Figura 3-36]. Estos motores Pololu son micro motores reductores DC que funcionan entre 3 V y 9 V. Las ruedas todoterreno están diseñadas para ajustarse perfectamente a los micro motores y tienen un diámetro de 42 mm y 19 mm de ancho. El interior de la rueda posee doce dientes de 3 mm de grosor cada uno y doce espacios entre los dientes de otros 3 mm de ancho diseñados especialmente para que el encoder de cuadratura pueda leer el giro de la rueda.



Figura 3-36: Pack motor, rueda y encoder de cuadratura.

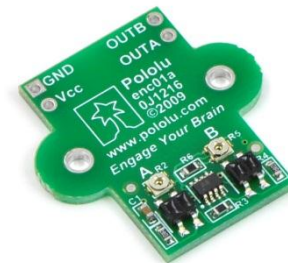


Figura 3-37: Encoder de cuadratura

Figuras extraídas de las página web del fabricante [23]

El encoder de cuadratura de Pololu tiene como función la medida de la cantidad de giro de la rueda y la dirección de giro. Se alimenta entre 4.5 V y 5 V por los pines GND y Vcc de la Figura 3-37. Posee dos sensores infrarrojos reflectantes que funcionan leyendo los dientes y ranuras que tiene la rueda permitiendo, de este modo, detectar o leer su movimiento. Cada uno de los dos sensores manda su información por los pines de salida OUTA u OUTB, siendo dicha salida 5 V o nivel lógico alto si ese sensor ha leído un diente o 0 V o nivel lógico bajo si ha leído una ranura.

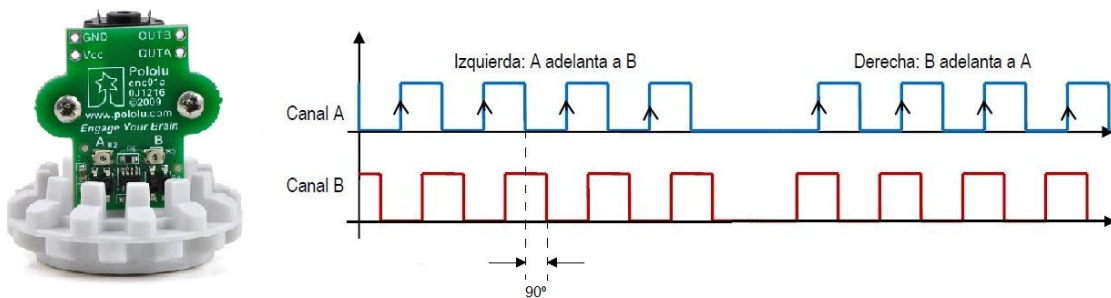


Figura 3-38: Modo de funcionamiento de encoder de cuadratura

Los encoders de cuadratura entregan dos señales tipo tren de pulsos A y B desfasadas 90° por cada uno de sus dos canales [Figura 3-38]. Cuando la rueda gira hacia una dirección el canal A adelanta al B y cuando gira en dirección contraria el canal B adelanta al A, detectando, de este modo, la dirección de giro de la rueda. En el caso del robot que se está describiendo, no se usa esta funcionalidad específicamente ya que es el propio sistema quien elige la dirección de giro de las ruedas controlando los pines del motor a su conveniencia (ver Tabla 3-8). En este caso, el encoder informará, únicamente, de la cantidad de giro de la rueda. La resolución del encoder es de 48 posiciones diferentes por vuelta completa de la rueda: 12 dientes, 12 ranuras y doble resolución por ranura y diente gracias al desfase de 90° de las señales ($[12+12]*2=48$). Estas 48 posiciones por vuelta equivalen aproximadamente a 3 mm por posición (siendo el radio de la rueda 21 mm):

$$\text{Distancia/posición} = \frac{\text{Longitud rueda}}{48} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{48} \approx 0.2748 \text{ cm}$$

Si, en un supuesto caso extremo, el robot se moviera a una velocidad de 1 m/s, supondría:

$$\text{Giros por metro ó giros por segundo} = \frac{100 \text{ cm}}{\text{longitud rueda}} = \frac{100 \text{ cm}}{2 \cdot \pi \cdot r} \approx 7.578$$

aproximadamente 7.6 vueltas por segundo, que equivaldría a $7.6 * 48 \approx 360$ cambios de estado por segundo. Ya que hay 2 encoders, ambos necesitarán atención por parte del microprocesador para leer su estado casi cada milisegundo. El procesador usado, IGEPv2, tiene una velocidad de 720 MHz, esto es cientos de millones de instrucciones por segundo, por lo que perfectamente se puede cubrir la atención de los encoders de cuadratura sin problema y sin necesidad de utilizar interrupciones. En la sección 3.2.8.2 se pueden analizar las pruebas realizadas sobre los encoders de cuadratura.

3.2.7 Ensamblaje final

Hasta ahora se ha descrito cada uno de los componentes que forman el robot y su modo de conexión y operación. En esta sección se expone el modo de ensamblar físicamente todos estos componentes.

Para la base del robot se ha utilizado un chasis de Pololu (Figura 3-39). Sobre el chasis se sujetan los dos conjunto motor, rueda y encoder de cuadratura usando los soportes proporcionados también por Pololu. Tanto en la parte trasera como delantera se ha colocado dos ruedas “locas” para estabilizar el robot y evitar su balanceo (Figura 3-40).

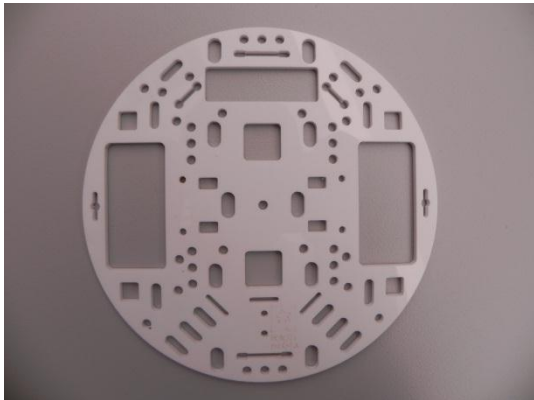


Figura 3-39: Chasis robot

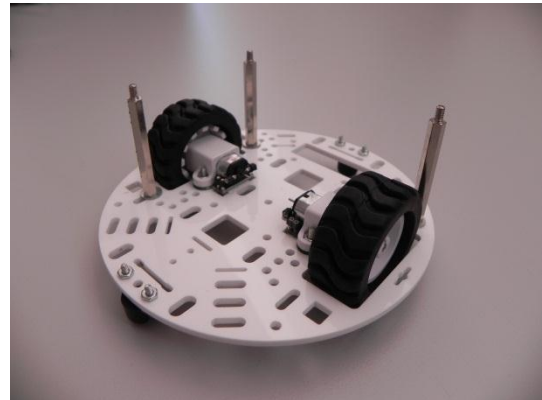


Figura 3-40: Robot montaje 1

En el siguiente nivel del robot se sitúa IGEPv2 y un nivel por encima se coloca la placa auxiliar (Figura 3-41). Ambas placas se conectan por el conector J990 y además a los conectores de 6 pines de la placa auxiliar se conectan las uniones oportunas con los motores y encoders de cuadratura (Figura 3-42).

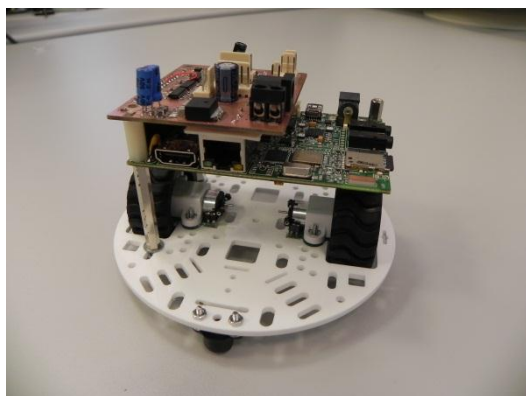


Figura 3-41: Robot montaje 2

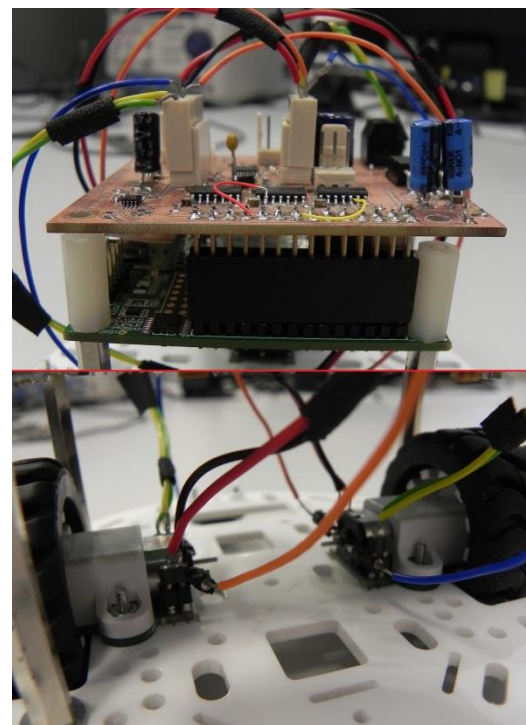


Figura 3-42: Robot montaje 3

En el último nivel se monta el módulo de RF (Figura 3-43). Es muy importante que esté en el nivel más elevado ya que, como se va a usar para medir distancias y tal como se comprobará en secciones posteriores, es indispensable aislar el módulo de posibles perturbaciones que pudieran influir en la señal recibida o enviada, dificultando, de este modo, el cálculo de distancias. Al estar en la parte más alta del robot se evita que los planos de masa de las placas puedan modificar las señales emitidas o recibidas, que se produzcan pérdidas por refracción, multitrayecto u otro tipo de perturbaciones debidas a la forma física del robot.

Finalmente, se ha de conectar el módulo de RF e IGEPv2 mediante un Hub USB. También es necesario conectar una batería que alimente al sistema completo. Las dimensiones finales del robot son 26 cm de altura y base circular de diámetro 12.7 cm.

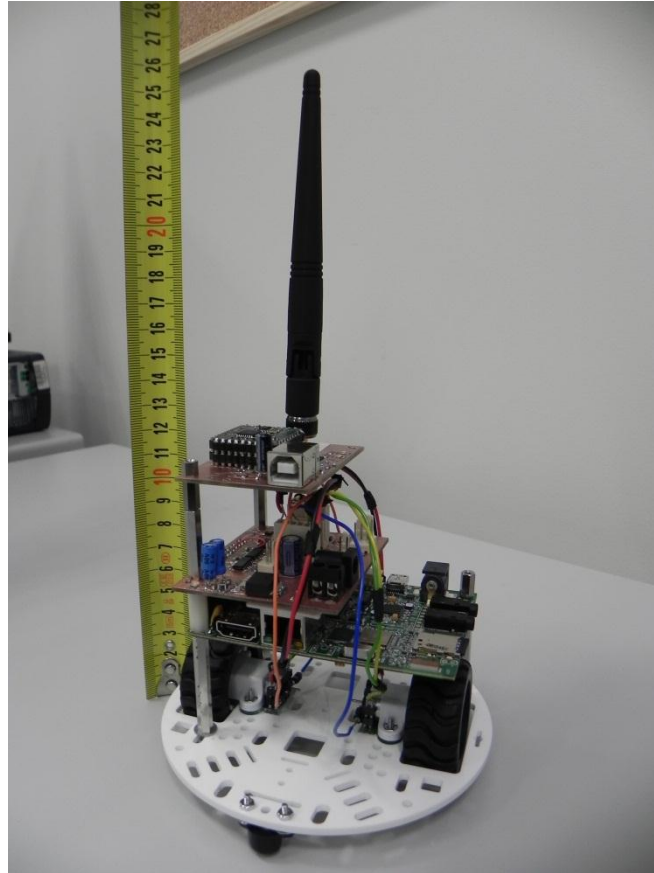


Figura 3-43: Robot diseñado

3.2.8 Control software del movimiento del robot

Esta sección describe las librerías desarrolladas en lenguaje C para el control del movimiento del robot.

Tal y como se ha comentado, para controlar el robot, IGEPv2 ha de configurar los pines de J990 en función GPIO (*General Purpose Input/Output*) correspondientes para controlar los motores y los encoder de cuadratura. La siguiente tabla muestra el número de pin GPIO que controla cada línea de motor y encoder.

Dispositivo		MUX Modo 4	Configuración
Derecha	Motor	A	Salida
		B	Salida
	Encoder	A	Entrada
		B	Entrada
Izquierda	Motor	A	Salida
		B	Salida
	Encoder	A	Entrada
		B	Entrada

Tabla 3-9: Configuración GPIO control robot

Para la configuración de todos los pines GPIO en el modo adecuado y para preparar e iniciar el robot se ha creado la función:

```
void init_robot();
```

Para mover el motor derecho se ha de aplicar un 0 y un 1 a los pines GPIO161 y GPIO131 o viceversa para cambiar la dirección de giro. Si se desea que el robot avance se le aplica un 0 a GPIO161 y GPIO 158 y un 1 a GPIO131 y GPIO141 para girar ambas ruedas al mismo tiempo. Es interesante poder controlar la velocidad de movimiento del robot. Para ello, se han usado señales de PWM creadas vía software.

Por otro lado, para controlar la distancia que recorre el robot o para controlar el ángulo de giro se usan los encoders de cuadratura. Se ha de leer el estado de los puertos de los pines a los que están conectados los encoders para así poder controlar su cantidad de movimiento.

Tal y como se comentó en 3.2.2.4, los pines configurados como GPIO se manejan mediante sus archivos correspondientes en Linux. Las funciones más importantes creadas en lenguaje C para el control de los pines GPIO son las siguientes:

- `int gpio_export(unsigned int gpio)`

Exporta al SO los archivos de control del pin GPIO especificado.

- `int gpio_set_dir(unsigned int gpio, unsigned int out_flag)`

Configura la dirección (entrada-salida) del pin especificado en GPIO. Si 'out_flag' es igual a 1 el puerto se configura como salida. Si es diferente de 1 el puerto se configura como entrada.

- `int gpio_set_value(unsigned int gpio, unsigned int value)`

Control del pin GPIO especificado. Si 'value' es igual 1, el puerto se pone a nivel alto (1.8 V). Si 'value' es diferente de 1 se pone a nivel bajo (0 V).

- `int gpio_get_value(unsigned int gpio)`

Lectura del pin especificado GPIO. Devuelve el valor del pin.

3.2.8.1 *Control de los motores*

Para controlar la velocidad de giro de los motores y por tanto de las ruedas, se han creado señales PWM vía software. El PWM (*Pulse-Width Modulation*) o modulación por ancho de pulsos para el control del motor es una técnica que modifica el ciclo de trabajo de una de las señales del motor con el fin de controlar la cantidad de energía que se le entrega al mismo y así variar su velocidad. La siguiente tabla muestra las diferentes funciones para el control de uno de los motores mediante PWM:

Motor pin A	Motor pin B	Function
PWM	0	Forward
1	PWM	Forward
0	PWM	Reverse
PWM	1	Reverse

Tabla 3-10: Control PWM de los motores

Las funciones creadas para el control de los motores mediante PWM son las siguientes:

- `void forward_PWM(int vel)` y `void back_PWM(int vel)`

Funciones para que el robot avance o retroceda a la velocidad de PWM especificada. 'vel' ha de estar entre 1 y 100, siendo 1 la velocidad más baja y 100 la máxima velocidad disponible del robot.

- `void turn_right_PWM(int vel)` y `void turn_left_PWM(int vel)`

Funciones para que el robot gire sobre sí mismo en una dirección o en la otra. 'vel' ha de estar entre 1 y 100, siendo 1 la velocidad más baja y 100 la máxima velocidad disponible del robot. Para que el robot gire sobre sí mismo en una posición fija se les aplica el PWM a velocidad 'vel' en direcciones opuestas a cada una de las ruedas. Este método se refleja en la Figura 3-44.

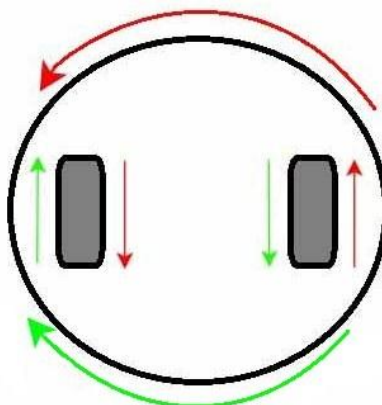


Figura 3-44: Método de giro del robot

3.2.8.2 Control de los encoders

Los encoders de cuadratura entregan dos señales tipo tren de pulsos A y B desfasadas 90° por cada uno de sus dos canales que van conectadas a los correspondientes pines GPIO. Tal y como se describió en 3.2.6, cada uno de los canales lee las ranuras y huecos que posee la rueda, permitiendo poseer una resolución de 48 posiciones diferentes por vuelta completa de la rueda: 12 dientes, 12 ranuras y doble resolución por ranura y diente debido al desfase de 90° de las señales ($[12+12]*2=48$). Estas 48 posiciones por vuelta equivalen aproximadamente a 3 mm por posición (siendo el radio de la rueda 21 mm):

$$Distancia/posición = \frac{Longitud\ rueda}{48} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{48} \approx 0.2748\ cm$$

Para el cálculo del número de posiciones que la rueda tiene que avanzar hasta concretar la distancia especificada ha sido creado la siguiente función:

```
int contador_encoder(double cm);
```

La lectura del estado de los pines del encoder se hace usando la función `int gpio_get_value(unsigned int gpio)` que se encarga de abrir y leer el archivo correspondiente al pin GPIO especificado. Dada la velocidad del procesador utilizado (OMAP3530 a 720 MHz) se ha optado por leer continuamente los cuatro archivos correspondientes a los cuatro pines a los que se conectan los dos encoders de cuadratura utilizados.

3.2.8.3 *Funciones de movimiento desarrolladas*

Todas las funciones desarrolladas para el control del movimiento del robot siguen las siguientes etapas:

1. Cálculo del número de posiciones (cambios de estado de cada pin GPIO) que tiene que leer cada encoder de cuadratura según el movimiento que se quiera realizar basándose en las 48 posiciones que posee una vuelta de la rueda y la medida de la longitud de la rueda.
2. Creación de un hilo en paralelo que mueva continuamente (bucle infinito) las ruedas en la dirección adecuada y con la velocidad de PWM que se haya especificado.
3. El hilo principal entra en un bucle en que se leen continuamente el estado de los pines GPIO correspondientes a los encoders de cuadratura. El bucle termina cuando se ha leído el número de cambios de estado calculados en el paso 1 que corresponden con el movimiento especificado.
4. Cuando se termina este bucle se “mata” el hilo hijo, del movimiento de las ruedas con el PWM, creado y se paran las ruedas inmediatamente.

El siguiente diagrama refleja el flujo anteriormente descrito:

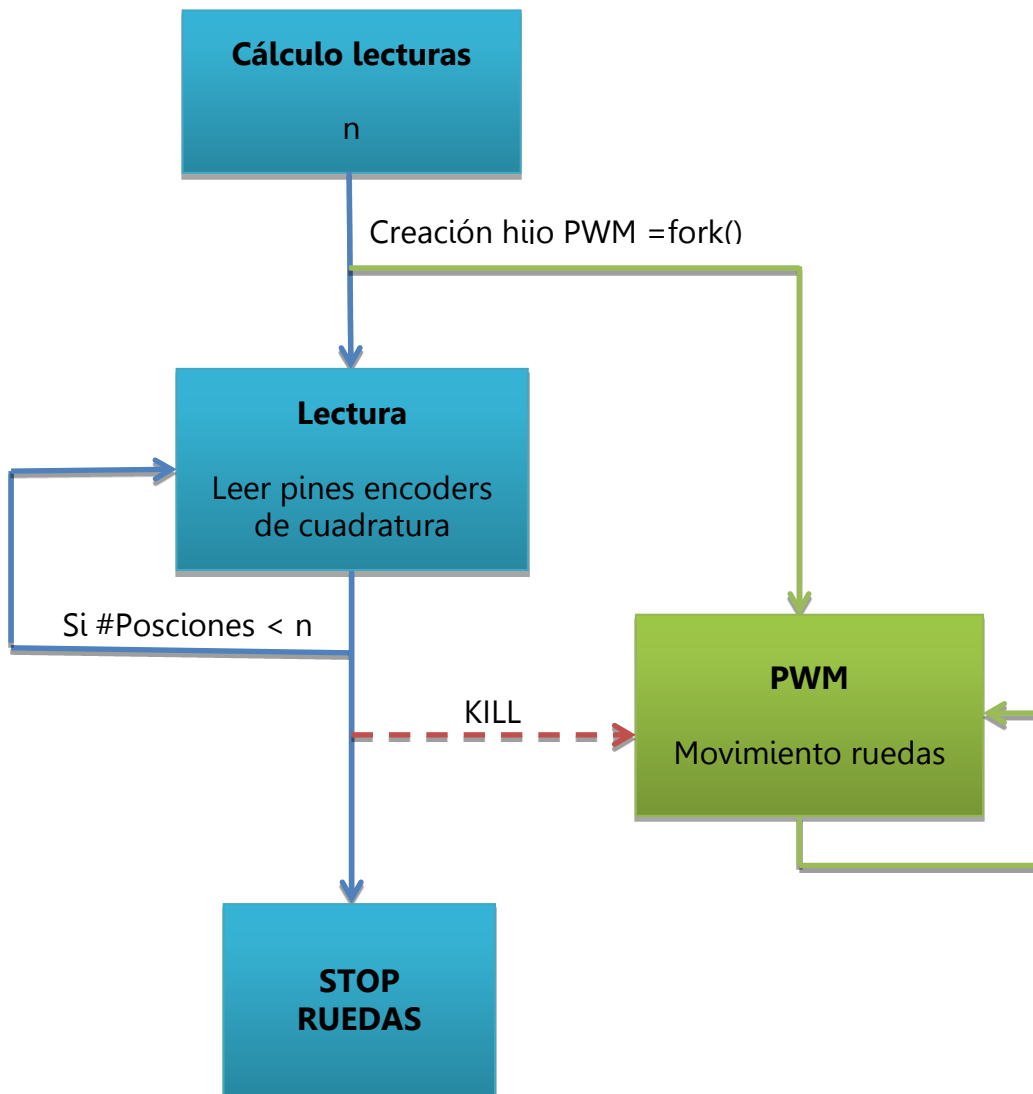


Figura 3-45: Flujo funciones de movimiento del robot

Las funciones de movimiento desarrolladas son las siguientes:

- `int drive_distance(double cm, int vel, int direction);`

Recorrer la distancia especificada en centímetros ‘cm’ a la velocidad determinada por el valor ‘val’ que ha de estar entre 1 y 100. Si ‘direction’ es igual a 1 el robot recorre la distancia avanzando hacia delante; si ‘direction’ es diferente de 1 el robot retrocede la distancia específica.

Para calcular el número de posiciones que tiene que avanzar la rueda para recorrer una determinada distancias se procede como sigue. Por ejemplo, para una distancia de 1 metro (1000 cm):

$$n = \text{redondear} \left(\frac{\text{distancia} \cdot 48 \text{ posiciones/vuelta}}{\text{longitud rueda}(= 2 \cdot \text{PI} \cdot \text{Radio})} \right)$$

$$n = \text{redondear} \left(\frac{1000 \text{ cm} \cdot 48 \text{ posiciones/vuelta}}{2 \cdot \text{PI} \cdot 2.1 \text{ cm}} \right) = 3638 \text{ posciones por rueda}$$

- `int turn_degree(int deg, int vel);`

Gira el ángulo en grados determinado por 'deg' a la velocidad especificada por 'vel'. Si 'deg' > 0° el robot gira en el sentido de las agujas del reloj; si 'deg' < 0° el robot gira en el sentido contrario.

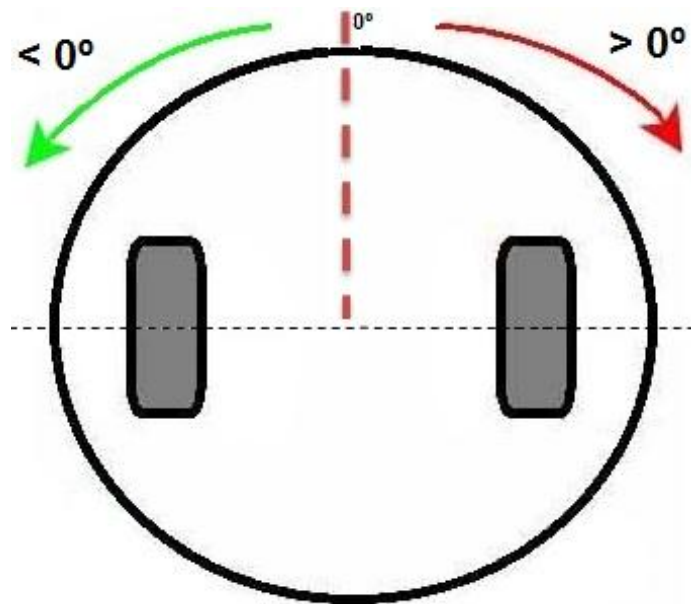


Figura 3-46: Giro del robot

Para calcular el número de posiciones que tiene que avanzar cada rueda (en direcciones opuestas) para que el robot gire un determinado ángulo se procede como sigue. Por ejemplo, para girar 90 grados:

$$\text{Distancia recorrida/rueda} = \frac{\text{Ángulo} \cdot \text{PI} \cdot \text{Distancia entre rueda}}{360^\circ}$$

$$\text{Distancia} \frac{\text{recorrida}}{\text{rueda}} = \frac{90 \cdot \text{PI} \cdot 8.8}{360^\circ} \approx 6.911 \text{ cm}$$

$$n = \text{redondear} \left(\frac{6.911 \text{ cm} \cdot 48 \text{ posiciones/vuelta}}{2 \cdot \text{PI} \cdot 2.1 \text{ cm}} \right) = 25 \text{ posciones por rueda}$$

Con el objetivo de comprobar el buen funcionamiento de estas dos funciones se ha procedido a su análisis haciendo uso de un osciloscopio digital *DL1740E Yokogawa* como el de la Figura 3-47. Este análisis es de vital importancia para comprobar que ambas funciones leen absolutamente todos los cambios de las líneas de los encoders de cuadratura y no se pierde alguno, lo que supondría un incremento del error en el desplazamiento de 3

mm por cada posición perdida. Las dos señales del encoder se conectan a los canales 1 y 4 del osciloscopio.



Figura 3-47: Osciloscopio digital DL1740E Yokogawa

Como comienzo, la captura de pantalla de la Figura 3-48 presenta una muestra cualquiera del encoder en la que se puede apreciar como las dos salidas de un mismo encoder están debidamente desfasadas unos 90°, tal y como se espera.

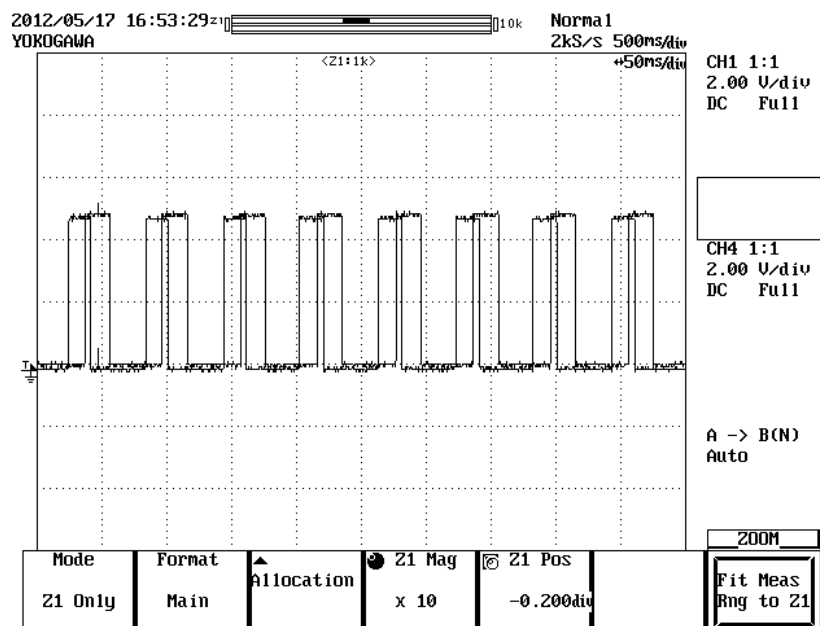


Figura 3-48: Salida estándar encoder de cuadratura

El siguiente experimento consiste en ejecutar la siguiente función:

```
drive_distance(10, 50, 1);
```

, la cual ordena al robot avanzar 10 cm al 50% de su máxima velocidad. Mientras se ejecuta la instrucción se captarán las salidas de uno de los encoder para comprobar que recogen lo esperado.

Se procede a calcular el número de posiciones (cambios de estado) que tiene que girar la rueda y, por consiguiente, que debe leer el encoder de cuadratura (las dos señales de salida juntas) para el caso de avanzar 10 cm:

$$n = \text{redondear} \left(\frac{10 \text{ cm} \cdot 48 \text{ posiciones/vuelta}}{2 \cdot \pi \cdot 2.1 \text{ cm}} \right) = 36 \text{ posiciones por rueda}$$

La captura de pantalla mostrada en la Figura 3-49 presenta la salida de las dos líneas de uno de los encoders de cuadratura en el momento de ejecutar la función anterior. Se puede observar como el cambio de estados (cambios de 1 a 0 y viceversa) entre las dos líneas es igual 36, que equivale a lo esperado y por lo tanto no estamos perdiendo posiciones y estamos cometiendo el error mínimo.

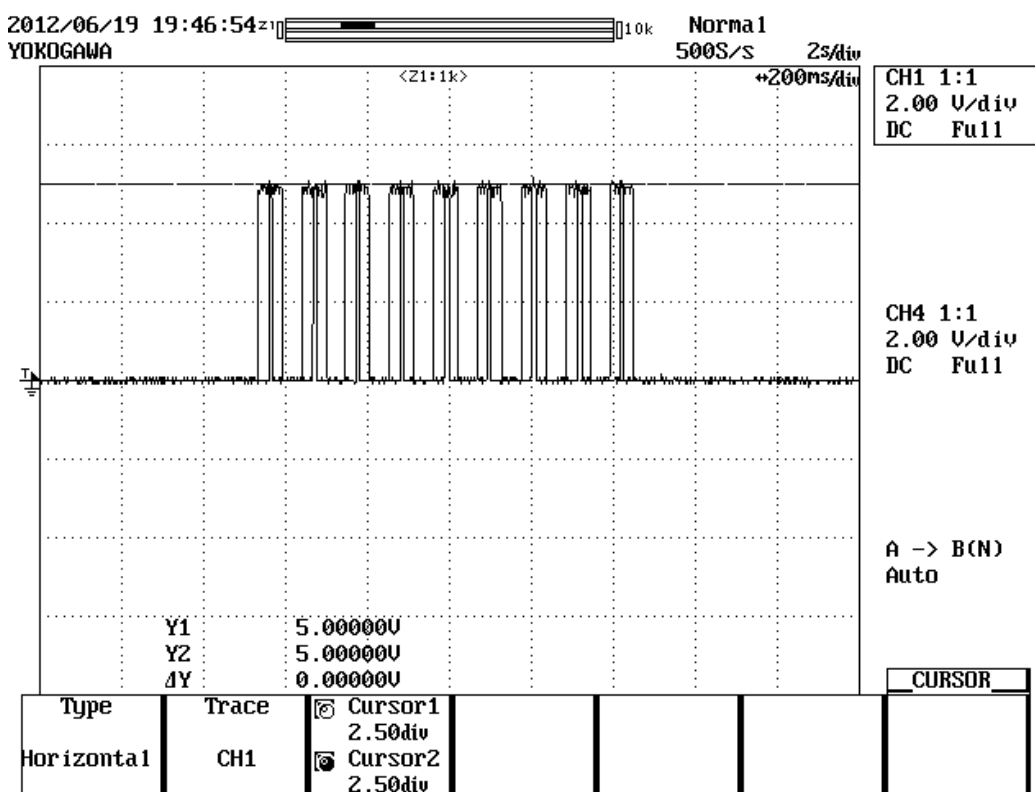


Figura 3-49: Captura encoder para 10 cm

El segundo experimento consiste en un desplazamiento de 30 cm ejecutando la siguiente función:

```
drive_distance(30, 50, 1);
```

En este caso el número de posiciones que ha de girar la rueda hasta alcanzar los 30 cm es el siguiente:

$$n = \text{redondear} \left(\frac{30 \text{ cm} \cdot 48 \text{ posiciones/vuelta}}{2 \cdot \pi \cdot 2.1 \text{ cm}} \right) = 109 \text{ posiciones por rueda}$$

En la Figura 3-50 se puede observar como, al principio del tren de pulsos, una de las dos señales del encoder pasa de 0 a 1 y viceversa en un lapso de tiempo muy pequeño y, además, la otra señal, que está en cuadratura con ésta, no ha sufrido ningún cambio. Esto se produce ya que la rueda tiene cierta holgura y si el sensor del encoder está situado en el límite entre un hueco y un diente, justo cuando la rueda comienza a girar puede leer un cambio como el explicado. El código en lenguaje C ha sido desarrollado previniendo esta situación.

Por otro lado, se puede apreciar en la imagen como los encoders han leído un total de 109 posiciones (cambios de estado) para avanzar los 30 cm estipulados inicialmente.

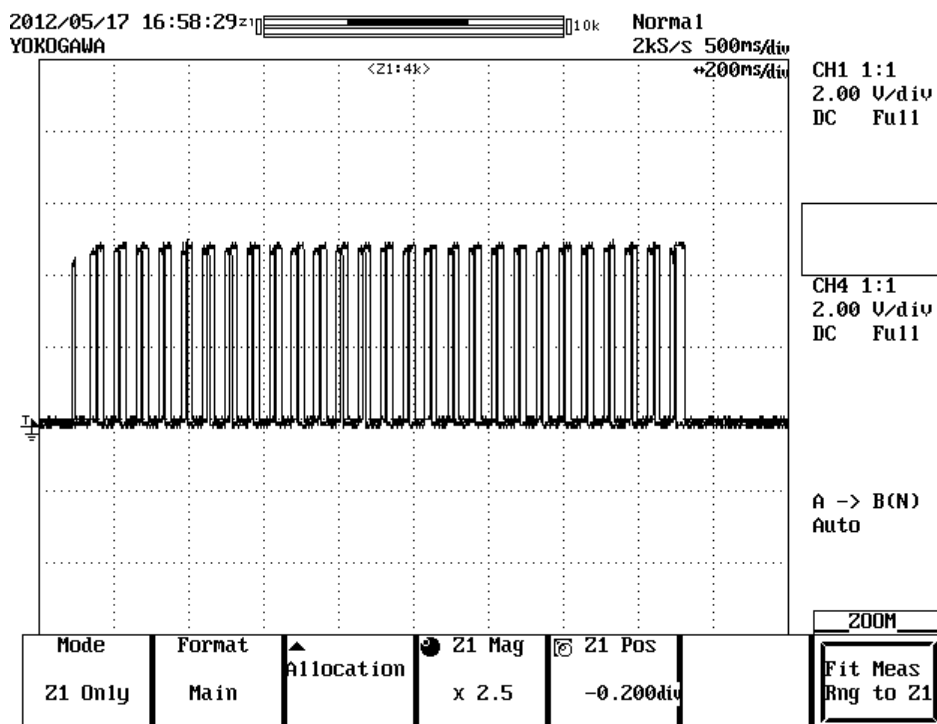


Figura 3-50: Captura encoder para 30 cm

También se han analizado con el osciloscopio las señales de PWM creadas vía software. La Figura 3-51 muestra la señal capturada para la siguiente instrucción:

```
forward_PWM(50);
```

es decir, un PWM del 50% y el resultado es bastante bueno tal y como se observa en la imagen.

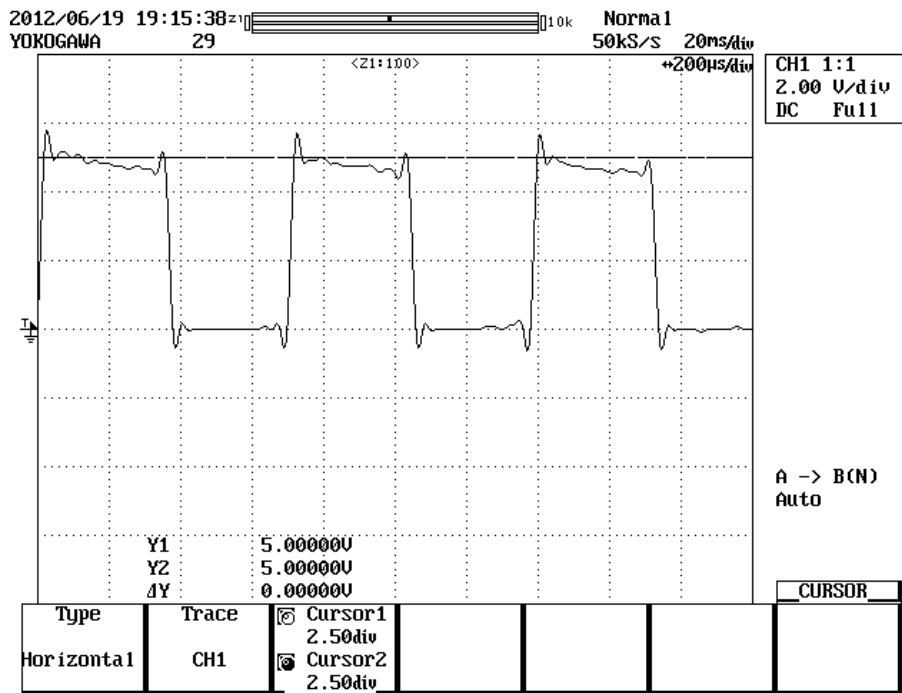


Figura 3-51: PWM a 50%

La en el siguiente caso se ejecutó la siguiente instrucción:

```
forward_PWM(65);
```

un PWM de 65%.

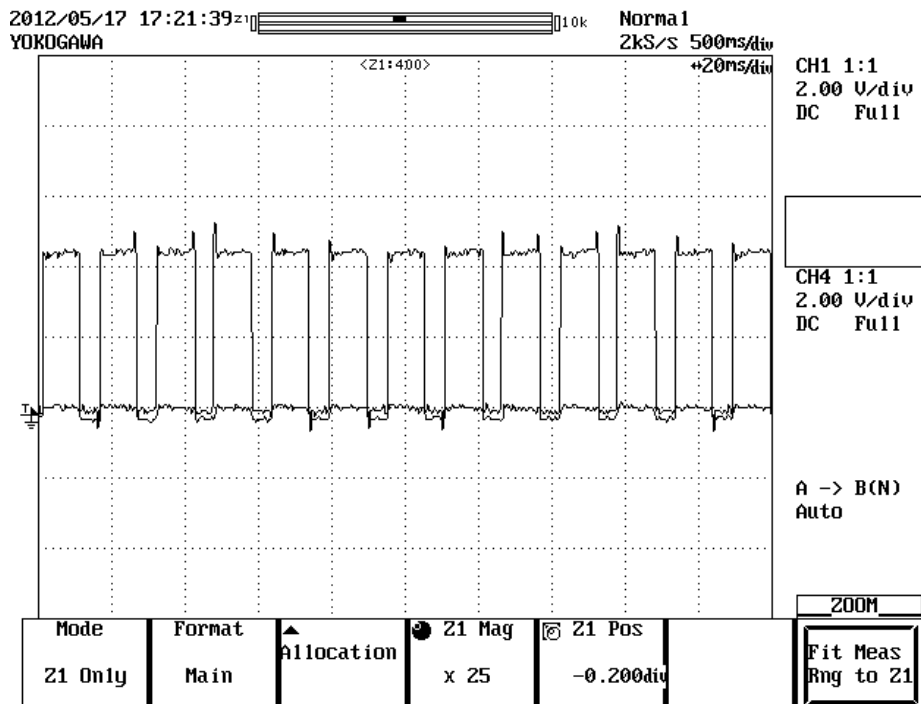


Figura 3-52: PWM 65%

4 Sistema de posicionamiento

4.1 Introducción

El sistema de posicionamiento se basa en la medida de la potencia recibida o RSSI (2.3.5) de los mensajes de radiofrecuencia mandados entre módulos de RF (3.2.3). La RSSI recibida depende, entre otros factores (ver 2.3.3), de la distancia entre antenas, por lo que utilizando el modelo de propagación adecuado se debería poder inferir la distancia a partir de la RSSI recibida. Luego, usando un algoritmo de posicionamiento desarrollado por Eloy Anguiano Rey, profesor titular de la Universidad Autónoma de Madrid, se intentará posicionar a cada uno de los agentes involucrados en el sistema.

4.2 Posicionamiento en 2D

El sistema de posicionamiento se aplica sobre agentes situados en el mismo plano, es decir, es un posicionamiento en 2-dimensiones. Esto es así porque el diagrama de radiación de las antenas usadas (ver Figura 3-13), aunque es omnidireccional, no emite en todas las direcciones con la misma potencia, esto quiere decir que a la misma distancia y a diferentes alturas la potencia recibida es distinta. El plano de máxima potencia de emisión y recepción es el horizontal. Las comunicaciones entre antenas que se encuentran en planos diferentes, existiendo cierto ángulo respecto a la dirección horizontal de la antena, sufren variaciones en la potencia de la señal. Por este motivo, el posicionamiento no tiene sentido en 3-dimensiones y el sistema de posicionamiento desarrollado en este proyecto se ha limitado a usarse en situaciones de 2D.

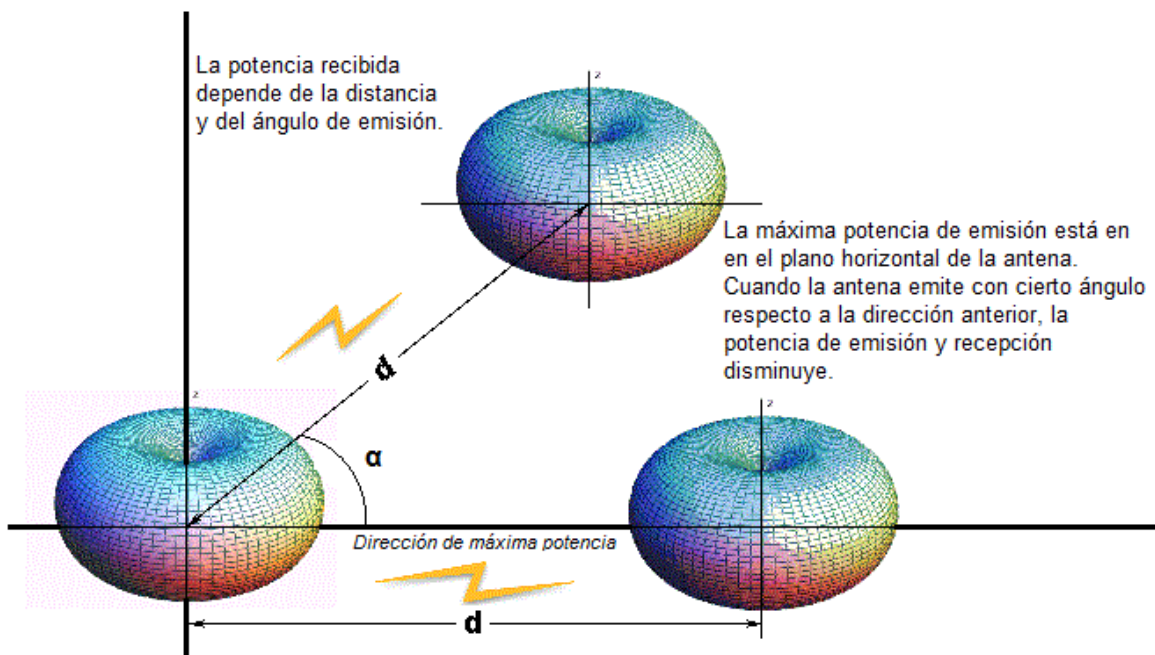


Figura 4-1: Argumentación posicionamiento 2D

Este razonamiento teórico ha sido comprobado y apoyado en la práctica mediante pruebas físicas reales. El experimento realizado consiste en comprobar la potencia de recepción de los mensajes en los módulos de RF a la misma distancia pero distinta altura de las antenas. Se ha comprobado que la máxima potencia recibida se obtiene cuando ambas antenas están en el mismo plano. Según se aumenta la altura de una de las antenas, la potencia disminuye poco a poco hasta el punto en que ambas antenas dejan de comunicarse y de recibir mensajes a causa de que ambas antenas se encuentran en la misma dirección en sentido vertical. Esta prueba se realizó para varias distancias, entre 0.25 m y 3 m, y en todos los casos el comportamiento observado era similar.

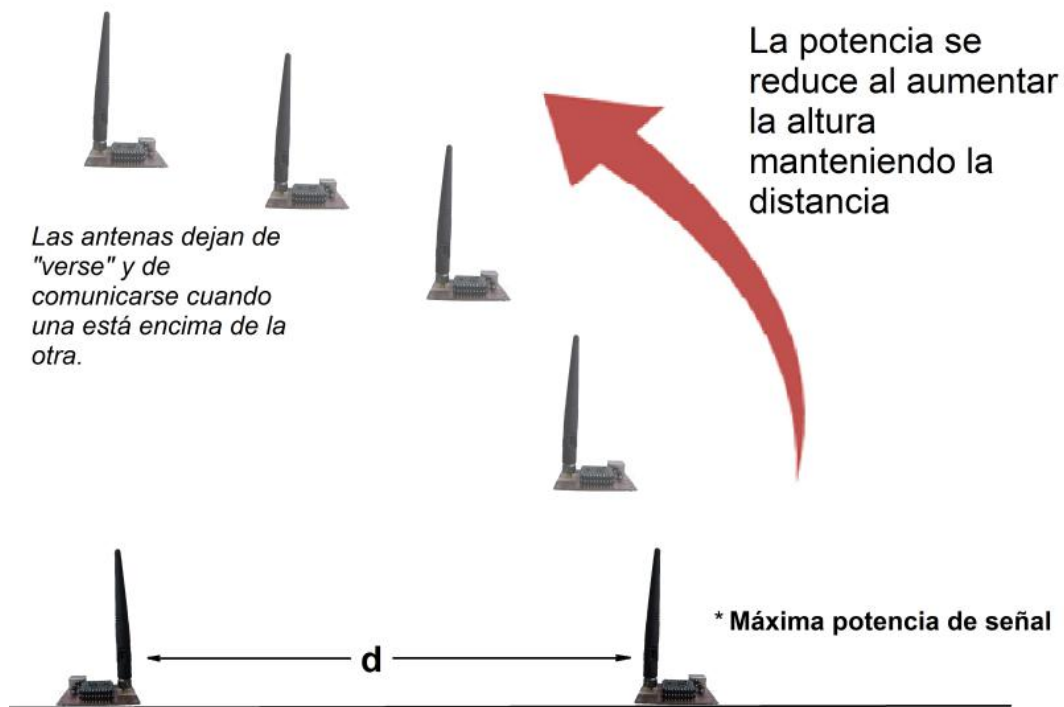


Figura 4-2: Experimento 2D

Este comportamiento es muy importante y obliga también a controlar la inclinación y altura de las antenas, todas ellas han de estar totalmente verticales y a la misma altura para que en todos los casos se reciba la misma potencia en situaciones similares. Si una antena tiene cierta inclinación, la potencia de emisión será diferente a la habitual y se producirán errores en el cálculo de distancias.

4.3 Modelo de propagación y cálculo de distancias

El sistema de posicionamiento hace uso de la potencia recibida o RSSI para inferir la distancia entre antenas. Luego, mediante trilateración (ver 2.2.4.2) se consigue posicionar el agente.

Para calcular distancias se hace uso de los modelos de propagación en interiores propuestos en la bibliografía (ver 2.3.3.1). Exactamente se estudiará el modelo de pendiente única. En general, la caracterización de un enlace radioeléctrico se puede expresar de la siguiente forma:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} + L_p + L_{otras}$$

donde P_{rx} es la potencia recibida por el receptor, P_{tx} es la potencia transmitida por el transmisor, G_{tx} es la ganancia de la antena transmisora, G_{rx} es la ganancia de la antena receptora, L_p son las pérdidas de potencia de la señal debida a la propagación y L_{otras} son pérdidas de otra naturaleza. Por otro lado, las pérdidas debido a la propagación en interiores basándonos en el modelo de pendiente única vienen definidas en la siguiente relación:

$$L_p[dB] = L_0 + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_g$$

donde L_0 son las pérdidas a la distancia referencia (d_0), $L_0 = 20 \log(4\pi d_0/\lambda)$ (λ es la longitud de onda en metros), n es el índice de propagación, d es la distancia entre transmisor y receptor y X_g es una variable aleatoria normal(o gaussiana) de media cero.

Teniendo en cuenta que el módulo de RF obtiene la potencia recibida, P_{rx} , de la señal y se quiere obtener la distancia, d , se puede reorganizar la expresión para obtener:

$$P_{rx} = Cnt - 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

siendo Cnt una constante y sin tener en cuenta la variable aleatoria, X_g . De este modo se consigue la relación teórica, entre P_{rx} (RSSI) y distancia, que se ha de buscar empíricamente con los módulos de RF disponibles.

También se tendrá en cuenta el modelo de propagación de doble pendiente y el modelo de propagación en exteriores (ver 2.3.3.2).

4.3.1 Campañas de medidas

En esta sección se exponen los resultados de las diferentes campañas de medidas realizados para su posterior estudio y comparación con el modelo teórico descrito en la sección anterior. Las distintas medidas se hacen con los dos módulos de RF con IP 137.005 y 137.023.

- **Escenario 1**

Las primeras medidas realizadas se llevaron a cabo en la planta baja del edificio C de la EPS. Uno de los dos módulos de RF se coloca en una posición fija y se toman medidas variando la posición del segundo desde 25 cm hasta 10 metros en intervalos de 25 cm y se hace el recorrido inverso tomando medidas desde 10 m hasta 25 cm en intervalos de 25 cm. En cada posición se toman 20 valores de la potencia recibida (RSSI).



Figura 4-3: Vista frontal del pasillo de la planta baja del edificio C de la EPS

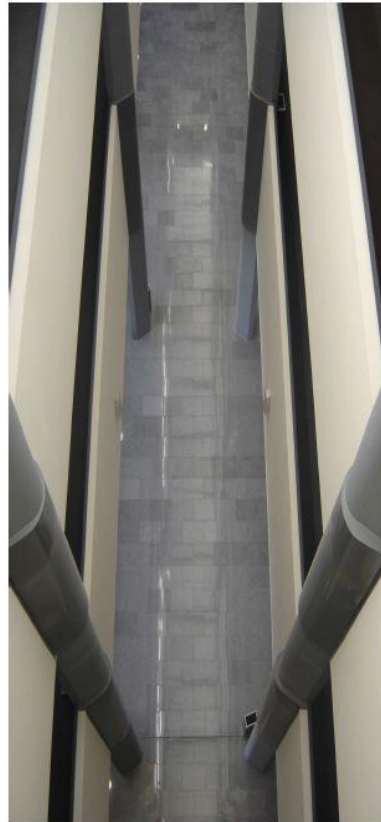


Figura 4-4: Vista de planta del pasillo de la planta baja del edificio C de la EPS.

Ambos módulos se posicionan uno en frente del otro y las diferentes medidas las realiza el módulo de RF fijo enviando el comando SMQ (ver 3.2.3.2) y esperando la contestación del módulo de RF móvil, el cual se va desplazando en línea recta a lo largo del pasillo y haciendo el recorrido inverso. En cada punto se envían 10 mensajes SMQ por lo que el módulo fijo recibe 10 SMS de contestación del móvil con dos potencias cada uno (la potencia de ida del SMQ y la potencia del mensaje de contestación). Por lo tanto, se toman en cada posición 40 medidas (20 en la ida y 20 en la vuelta) con el objetivo que comprobar si la RSSI recibida varía al medirse en diferentes momentos de tiempo por cualquier motivo: calentamiento de los módulos de RF, perturbaciones de señales de radiofrecuencia procedentes de otros dispositivos, etc. La posición de los módulos es equivalente a la mostrada en la Figura 4-5, donde se representan los dos módulos en vista planta, siendo el punto negro la antena y el cuadrado el contorno del módulo. La Figura 4-6 representa la vista planta de la porción del pasillo del edificio C de la EPS donde se han tomado las medidas, indicando la posición fija de uno de los módulos de RF y la posición final del módulo de RF móvil.



Figura 4-5: Posición módulos RF en las medidas

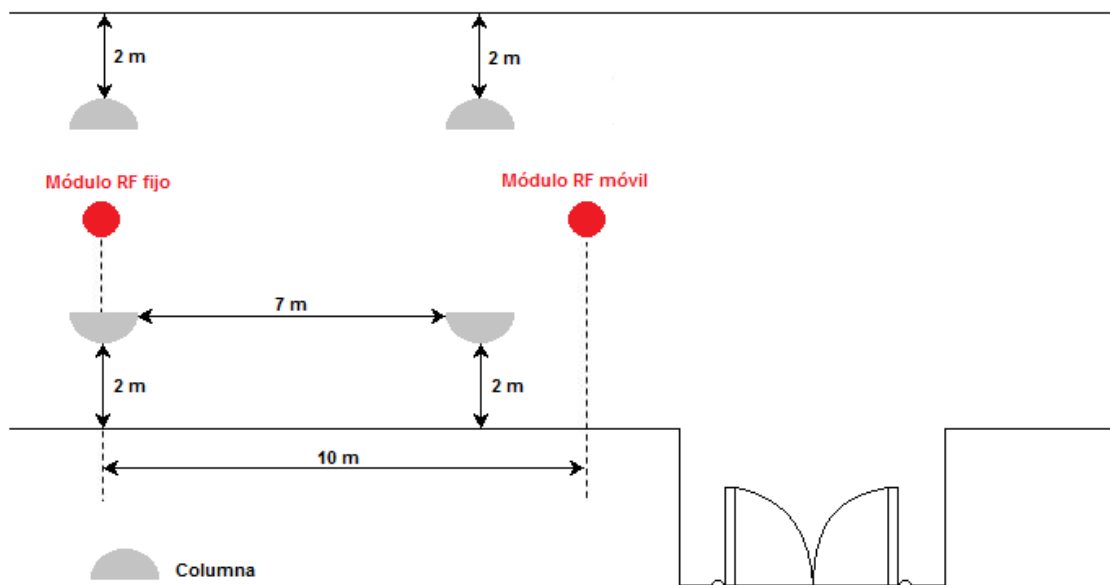


Figura 4-6: Vista planta de una porción del pasillo del edificio C de la EPS

En este escenario inicial se llevaron a cabo las medidas con tres potencias de transmisión diferentes: -15 dBm, 0 dBm y 10 dBm, con el objetivo de analizar el comportamiento del modelo de propagación a diferentes potencias de emisión. A continuación se muestran las tablas con los datos y la representación gráfica de los resultados. Cabe destacar que la media en cada punto se ha calculado realizando el promedio en unidades naturales (en mW) y luego convirtiéndolos a dBm.

- **POTENCIA TRANSMISIÓN: -15 dBm = 0.03162 mW**

Distancia [m]	Ida: Potencia recibida en dBm por			Vuelta: Potencia recibida en dBm por			Media total
	Módulo RF fijo	Módulo RF móvil	Potencia media	Módulo RF fijo	Módulo RF móvil	Potencia media	
0,25	-57,00	-59,00	-57,89	-57,60	-59,50	-58,45	-58,16
0,5	-60,00	-61,70	-60,77	-61,00	-62,70	-61,77	-61,24
0,75	-64,60	-66,00	-65,24	-65,00	-66,00	-65,47	-65,36
1	-67,50	-69,40	-68,35	-68,00	-70,00	-68,89	-68,61
1,25	-70,00	-71,90	-70,85	-70,90	-72,30	-71,54	-71,18
1,5	-72,40	-74,10	-73,17	-73,00	-74,70	-73,77	-73,46
1,75	-75,13	-76,88	-75,91	-75,10	-77,10	-75,99	-75,95
2	-75,90	-78,00	-76,82	-75,90	-78,10	-76,86	-76,84
2,25	-77,30	-79,30	-78,19	-77,10	-79,10	-77,99	-78,08
2,5	-79,90	-82,00	-80,82	-80,00	-81,80	-80,81	-80,82
2,75	-84,30	-86,50	-85,26	-83,80	-85,50	-84,57	-84,90
3	-83,80	-85,50	-84,57	-83,10	-84,80	-83,87	-84,20
3,25	-83,00	-83,90	-83,43	-82,90	-84,40	-83,59	-83,51
3,5	-84,90	-87,10	-85,86	-85,10	-87,40	-86,10	-85,98
3,75	-84,10	-85,90	-84,91	-84,20	-86,10	-85,05	-84,98
4	-89,10	-92,00	-90,31	-88,20	-91,00	-89,38	-89,82
4,25	-86,40	-90,10	-87,87	-88,80	-91,20	-89,84	-88,74
4,5	-90,00	-93,40	-91,38	-90,40	-94,00	-91,84	-91,60
4,75	-88,90	-91,90	-90,15	-90,10	-93,80	-91,57	-90,80
5	-92,20	-94,90	-93,34	-93,60	-95,50	-94,45	-93,86
5,25	-93,90	-95,90	-94,79	-92,90	-95,00	-93,82	-94,28
5,5	-88,40	-91,90	-89,81	-88,80	-91,00	-89,76	-89,78
5,75	-98,20	-100,70	-99,27	-97,90	-100,10	-98,86	-99,06
6	-99,95	-102,10	-100,89	-101,88	-103,25	-102,51	-101,63
6,25	-90,70	-94,10	-92,08	-94,00	-96,00	-94,89	-93,26
6,5	-100,11	-102,33	-101,08	-98,60	-100,20	-99,33	-100,12
6,75	-100,40	-102,10	-101,17	-97,60	-99,80	-98,56	-99,67
7	-96,90	-99,20	-97,90	-97,20	-99,50	-98,20	-98,05
7,25	-99,63	-101,75	-100,56	-104,63	-107,13	-105,70	-102,41
7,5	-107,50	-108,50	-107,97	-107,00	-109,00	-107,89	-107,93
7,75	-94,10	-96,00	-94,95	-93,40	-95,40	-94,29	-94,60
8	-100,50	-102,80	-101,50	-100,33	-102,44	-101,26	-101,38
8,25	-106,25	-108,75	-107,32	-105,75	-107,00	-106,33	-106,80
8,5	-95,10	-96,70	-95,83	-96,70	-99,20	-97,77	-96,69
8,75	-99,00	-101,22	-99,97	-100,63	-102,63	-101,51	-100,67
9	-100,13	-102,88	-101,29	-100,60	-102,80	-101,56	-101,42
9,25	-94,60	-96,40	-95,41	-94,50	-96,60	-95,42	-95,42
9,5	-104,50	-106,67	-105,45	-105,20	-106,60	-105,84	-105,64
9,75	-96,70	-99,20	-97,77	-97,30	-99,40	-98,22	-97,99
10	-99,11	-101,33	-100,08	-98,88	-100,50	-99,61	-99,84

Tabla 4-1: Medidas edificio C EPS a -15 dBm

Tras analizar los resultados de las medidas con potencia de transmisión a -15 dBm se comprueba que dicha potencia es demasiado baja para su uso en el sistema que se pretende desarrollar ya que el rango de actuación de éste ha de ser al menos de un radio de 10 metros. Además, a partir de 7 metros se pierden muchos de los mensajes enviados; exactamente a 7.5 metros sólo se pudo recibir 1 mensaje tras varios intentos. Se puede comprobar que a partir de 7 metros la potencia recibida ronda los -100 dBm llegando en algunos casos, incluso, a los -109 dBm. Usando el comando RSI (ver 3.2.3.2) se comprobó que el ruido ambiente estaba en torno a los -113 dBm, por lo que los mensajes, muchas veces, podían confundirse con el ruido.

Finalmente, se descartó el uso de esta potencia de emisión en el sistema de posicionamiento final.

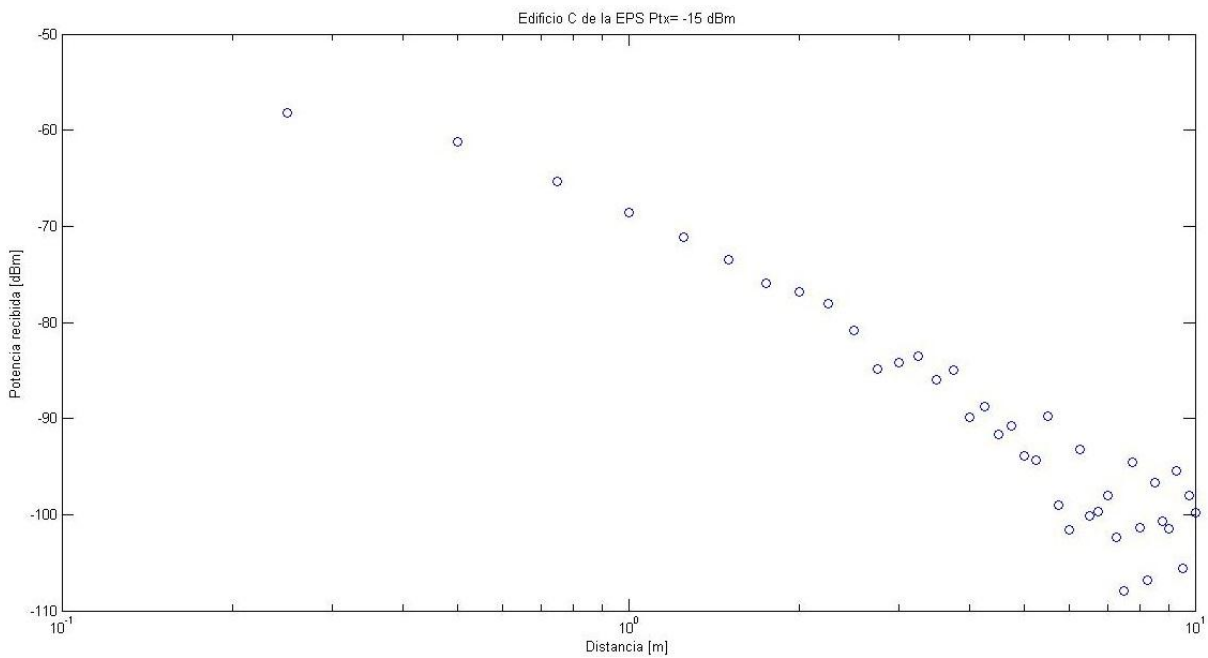


Figura 4-7: Medidas edificio C EPS a -15 dBm

- **POTENCIA TRANSMISIÓN: 0 dBm = 1 mW**

Distancia [m]	Ida: Potencia recibida en dBm por			Vuelta: Potencia recibida en dBm por			Media total
	Módulo RF fijo	Módulo RF móvil	PWR media	Módulo RF fijo	Módulo RF móvil	PWR media	
0,25	-40	-38,3	-39,07	-41	-39	-39,89	-39,46
0,5	-46	-44	-44,89	-45,2	-44	-44,56	-44,72
0,75	-48	-47	-47,47	-47,9	-46	-46,85	-47,15
1	-51	-49	-49,89	-51	-49	-49,89	-49,89
1,25	-54	-53	-53,47	-54	-53	-53,47	-53,47
1,5	-57	-55	-55,89	-57	-55	-55,89	-55,89
1,75	-59,2	-58	-58,56	-60	-58,7	-59,30	-58,91
2	-60,5	-59	-59,69	-61	-60	-60,47	-60,06
2,25	-61	-60	-60,47	-61,1	-60,1	-60,57	-60,52
2,5	-64	-62	-62,89	-64,8	-63	-63,81	-63,32
2,75	-67	-65,8	-66,36	-67	-66	-66,47	-66,41
3	-67,2	-66,1	-66,62	-67,8	-66,6	-67,16	-66,88
3,25	-67	-66	-66,47	-67,6	-66,2	-66,84	-66,65
3,5	-70,5	-69,1	-69,74	-70	-68	-68,89	-69,29
3,75	-71,1	-69,8	-70,40	-71,7	-70,3	-70,94	-70,66
4	-70,4	-69	-69,64	-70,6	-69,1	-69,79	-69,71
4,25	-73,1	-72	-72,52	-72,8	-71,1	-71,87	-72,18
4,5	-71,8	-70,3	-70,99	-72	-70,4	-71,13	-71,06
4,75	-72,2	-71	-71,56	-72,7	-71,2	-71,89	-71,72
5	-77,2	-76,2	-76,67	-77,8	-76,1	-76,87	-76,77
5,25	-73	-71,6	-72,24	-73,9	-72,1	-72,91	-72,56
5,5	-69,9	-67,9	-68,79	-70	-68,2	-69,01	-68,90
5,75	-78	-77	-77,47	-75,6	-75	-75,29	-76,24
6	-77,3	-75,9	-76,54	-78,1	-77	-77,52	-77,00
6,25	-74,2	-72,8	-73,44	-74	-72,6	-73,24	-73,34
6,5	-78	-77	-77,47	-79,5	-78,7	-79,08	-78,20
6,75	-77	-75,7	-76,30	-75,9	-75	-75,43	-75,84
7	-75	-73,9	-74,42	-75,5	-74,9	-75,19	-74,79
7,25	-84	-83,5	-83,74	-84,3	-83,6	-83,94	-83,84
7,5	-90	-89,5	-89,74	-91,6	-90,8	-91,18	-90,40
7,75	-76,8	-75,4	-76,04	-77	-75,6	-76,24	-76,14
8	-86,22	-85,22	-85,69	-85,1	-84,3	-84,68	-85,16
8,25	-89,1	-88,5	-88,79	-90,7	-89,8	-90,23	-89,45
8,5	-77,8	-76,8	-77,27	-77,1	-76	-76,52	-76,88
8,75	-73,9	-72,6	-73,20	-73,7	-72,4	-73,00	-73,10
9	-80,1	-79,1	-79,57	-80,6	-79,9	-80,24	-79,89
9,25	-78,6	-77,8	-78,18	-78,6	-77,4	-77,96	-78,07
9,5	-85,8	-85,3	-85,54	-92,3	-91,9	-92,10	-87,69
9,75	-82,1	-81	-81,52	-82	-81,2	-81,58	-81,55
10	-79,7	-78,7	-79,17	-79,5	-78,8	-79,14	-79,15

Figura 4-8: Medidas edificio C EPS a 0 dBm

Tras las nuevas medidas se puede concluir que en este caso la potencia de emisión de 0 dBm (1mW) es suficiente para alcanzar el rango de actuación esperado ya que la mínima potencia recibida ronda los -92 dBm, muy lejos del ruido ambiente para ser afectado por éste.

También se puede observar como hay un desequilibrio entre lo recibido por el módulo RF fijo y el módulo RF móvil para las mismas distancias y las mismas potencias de emisión, llegando a haber diferencias de hasta 2 dBm entre ambos casos. Al observar este extraño modo de comportarse, se procedió a comprobar si este mismo comportamiento se repetía entre diferentes parejas de módulos; se comprobó que no todas las parejas mostraban tal desequilibrio sino que en algún caso los módulos de RF mostraban la misma potencia recibida. Para corregir este problema se ha realizado una calibración de los cinco módulos de RF eligiendo la potencia de emisión en cada uno de ellos que hace que la potencia recibida de la señal de RF sea la misma en todos los casos (ver Tabla 4-8).

Por otro lado, se ha comprobado que las medidas en diferentes momentos de tiempo (ida y vuelta) no suponen una variación significativa en la medida del RSSI, observándose variaciones de un máximo de 1 dBm en casos puntuales y una variación media de únicamente 0.3 dBm.

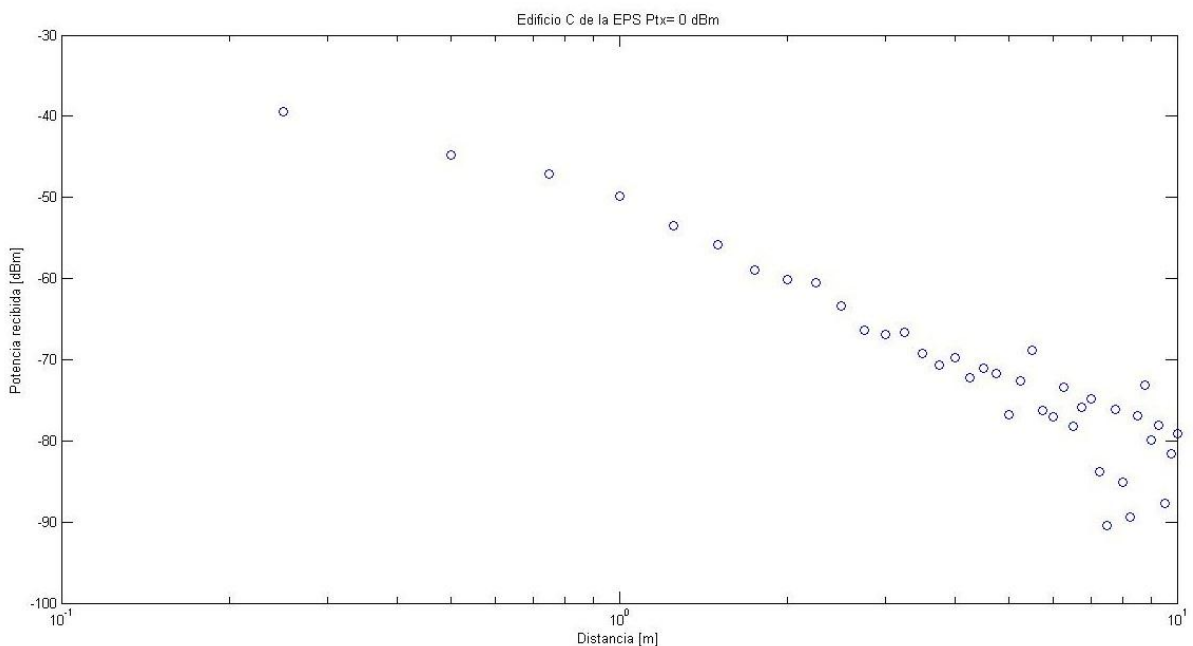


Figura 4-9: Medidas edificio C EPS a 0 dBm

En la figura anterior se observa cierta linealidad en la medida del RSSI tal y como se desprende del modelo de propagación teórico de pendiente única. Teniendo en cuenta el modelo de propagación de doble pendiente se observa como a partir de un metro cambia la pendiente de la tendencia de las potencias medidas, encontrando cierto paralelismo con este modelo.

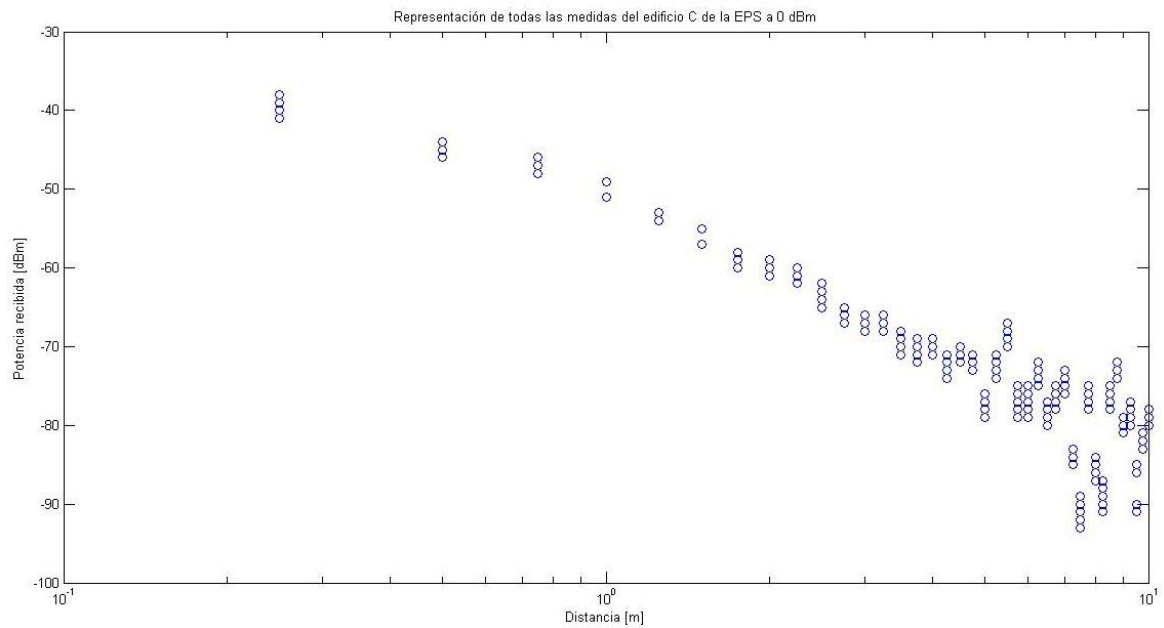


Figura 4-10: Todas las medidas en el edificio C a 0 dBm

En la figura anterior se representan las 40 medidas por posición (20 ida y 20 vuelta y en cada caso 10 recibidas por módulo RF fijo y 10 recibidas por módulo RF móvil) para apreciar la variabilidad de las medidas producidas según que módulo de RF las recibe y según el momento temporal en que se llevan a cabo. Se pueden apreciar variaciones de hasta 7 dBm que dificultan mucho el posicionamiento.

• **POTENCIA TRANSMISIÓN: 10 dBm = 10 mW**

Distancia [m]	Ida: Potencia recibida en dBm por			Vuelta: Potencia recibida en dBm por			Media total
	Módulo RF fijo	Módulo RF móvil	PWR media	Módulo RF fijo	Módulo RF móvil	PWR media	
0,25	-38,09	-35,00	-36,28	-38,86	-35,00	-36,52	-36,39
0,5	-42,00	-38,76	-40,08	-43,10	-38,37	-40,12	-40,10
0,75	-47,00	-43,00	-44,55	-48,70	-44,00	-45,74	-45,11
1	-50,31	-47,00	-48,35	-51,86	-47,09	-48,85	-48,59
1,25	-52,10	-49,00	-50,28	-55,32	-51,00	-52,64	-51,30
1,5	-57,00	-54,00	-55,25	-58,28	-54,00	-55,63	-55,43
1,75	-61,57	-58,78	-59,96	-59,86	-55,00	-56,78	-58,09
2	-68,37	-65,00	-66,37	-62,37	-60,00	-61,03	-62,92
2,25	-62,00	-59,00	-60,25	-61,92	-58,09	-59,60	-59,91
2,5	-63,00	-59,09	-60,62	-64,81	-60,57	-62,19	-61,34
2,75	-70,47	-66,78	-68,25	-66,55	-64,09	-65,15	-66,43
3	-70,89	-67,09	-68,59	-66,52	-62,09	-63,76	-65,54
3,25	-67,37	-64,28	-65,55	-68,76	-65,00	-66,48	-65,99
3,5	-74,98	-71,98	-73,22	-70,08	-67,89	-68,85	-70,51
3,75	-69,35	-66,18	-67,48	-70,08	-65,16	-66,96	-67,21
4	-75,65	-72,78	-73,98	-75,48	-75,20	-75,34	-74,61
4,25	-72,00	-68,18	-69,68	-72,82	-68,95	-70,47	-70,06
4,5	-71,55	-67,91	-69,36	-74,31	-70,18	-71,77	-70,40
4,75	-75,18	-72,18	-73,43	-77,26	-76,31	-76,76	-74,78
5	-75,23	-71,82	-73,20	-75,19	-71,89	-73,23	-73,22
5,25	-73,18	-70,09	-71,37	-75,74	-72,93	-74,11	-72,53
5,5	-75,70	-72,74	-73,97	-74,56	-72,80	-73,60	-73,78
5,75	-72,00	-68,47	-69,89	-74,28	-69,78	-71,47	-70,61
6	-80,18	-77,47	-78,62	-79,68	-76,89	-78,06	-78,33
6,25	-76,98	-74,09	-75,30	-78,71	-76,33	-77,36	-76,21
6,5	-79,37	-76,65	-77,80	-77,82	-75,00	-76,18	-76,92
6,75	-82,18	-79,68	-80,75	-86,23	-85,45	-85,82	-82,58
7	-80,68	-77,37	-78,72	-84,33	-80,57	-82,06	-80,07
7,25	-87,41	-88,18	-87,77	-87,96	-94,57	-90,12	-88,79
7,5	-78,73	-74,23	-75,92	-80,27	-81,30	-80,76	-77,70
7,75	-77,28	-74,47	-75,65	-76,00	-72,47	-73,89	-74,68
8	-78,73	-76,55	-77,50	-77,29	-73,55	-75,03	-76,09
8,25	-80,07	-77,84	-78,81	-81,99	-82,47	-82,23	-80,19
8,5	-77,73	-73,98	-75,46	-78,89	-76,28	-77,39	-76,32
8,75	-75,58	-72,35	-73,67	-77,53	-75,57	-76,44	-74,84
9	-76,80	-74,88	-75,73	-76,47	-73,00	-74,40	-75,01
9,25	-82,16	-86,50	-83,81	-78,55	-78,00	-78,27	-80,21
9,5	-77,11	-72,76	-74,41	-75,18	-72,57	-73,68	-74,03
9,75	-75,18	-72,78	-73,82	-76,03	-72,47	-73,90	-73,86
10	-77,30	-75,47	-76,29	-	-	-	-76,29

Tabla 4-2: Medidas edificio C EPS a 10 dBm

Observando los resultados para este escenario se puede comprobar como a partir de 5 metros las medidas tomadas sufren variaciones muy grandes debido a fenómenos estocásticos que no se pueden controlar, tales como el multitrayecto, reflexión, difracción, refracción, dispersión de la señal de radiofrecuencia, la precisión de emisión y recepción de los módulos de RF, etc. Esta ligera aleatoriedad se corresponde con el término X_g (variable aleatoria normal o gaussiana) que se desprecia en el modelo de propagación teórico descrito en la sección 4.3. También es importante controlar la posición de las antenas, que estén totalmente rectas y a la misma altura tal y como se describió en 4.2, para que este efecto se reduzca lo máximo posible y no malogre las medidas. Cabe destacar que las dos columnas del pasillo se encuentran a 7.75 metros de distancia del módulo de RF fijo.

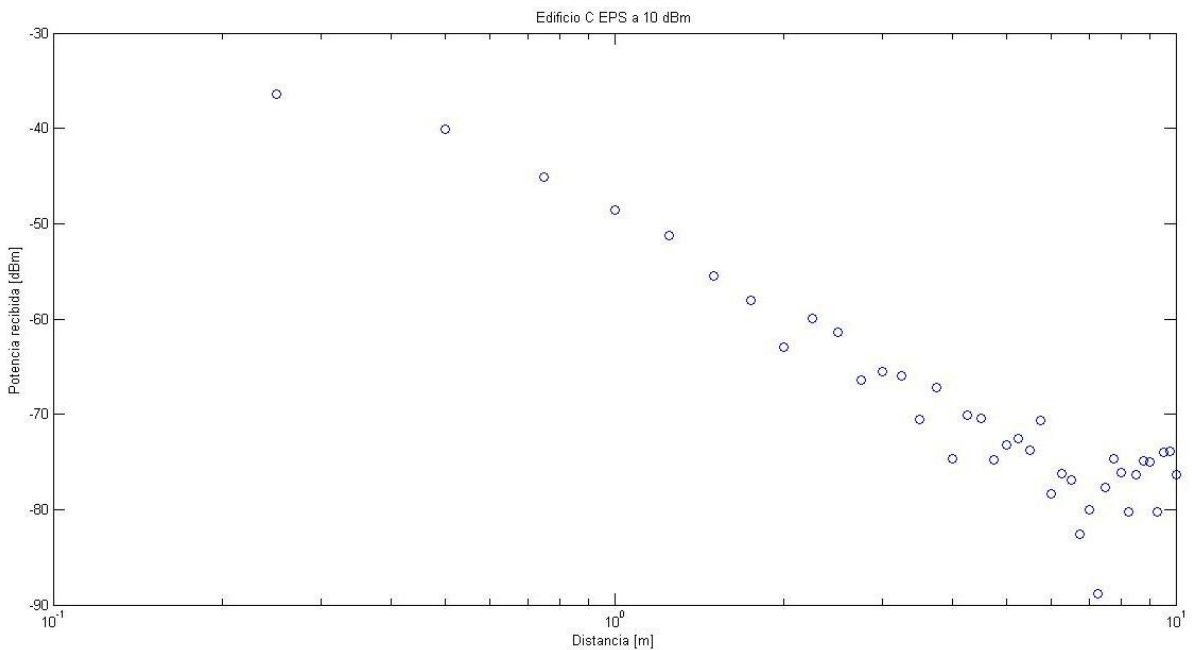


Figura 4-11: Medidas edificio C EPS a 10 dBm

La Figura 4-12 muestra las medidas para las tres potencias de transmisión (-15 dBm, 0 dBm y 10 dBm) en un gráfico para poder analizar y comparar visualmente mejor los tres resultados. Al intentar predecir estos tres resultados se puede pensar que las medidas a -15 dBm han de estar 25 dBm por debajo de las medidas tomadas a 10 dBm y 15 dBm por debajo de las tomadas a 0 dBm; por su parte, las tomadas a 0 dBm deberían estar 10 dBm por debajo de las medidas a 10 dBm. Observado la gráfica se aprecia como esto no se cumple y que los resultados a 0 dBm y 10 dBm son prácticamente iguales llegándose a confundir. Los datos a -15 dBm están entre 20 dBm y 10 dBm por debajo de las primeras, incumpliendo las premisas lógicas iniciales.

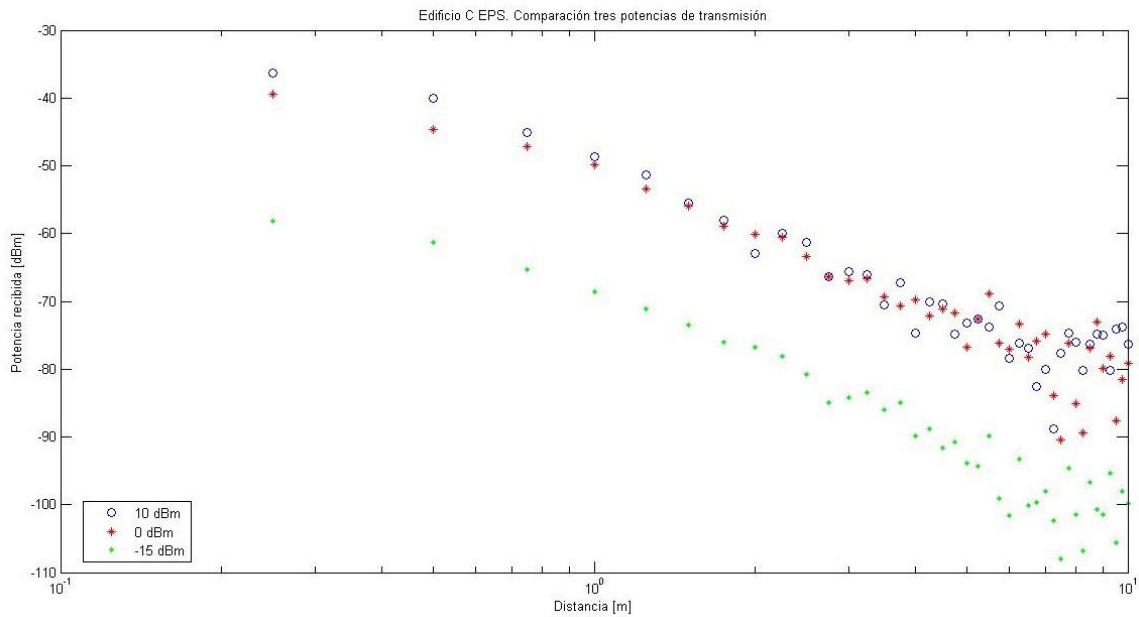


Figura 4-12: Comparación tres medidas edificio C EPS

- **Escenario 2**

El segundo escenario elegido para realizar las pruebas ha sido un escenario más complicado, con más obstáculos y más impredecible, con el objetivo de comprobar y comparar los resultados en este tipo de entorno. Este escenario es una terraza alargada de unos 18 m². La Figura 4-14 muestra el plano planta de la terraza. Las medidas se realizaron siguiendo el mismo procedimiento que el escenario anterior: se posicionan dos módulos enfrentados; uno de ellos, el fijo, hace las medidas enviando 10 comandos SMQ y obteniendo, por lo tanto, 20 valores de RSSI por posición (10 recibidos por el módulo de RF fijo y 10 por el móvil); las posiciones las marca el módulo RF móvil que se desplaza en línea recta desde 25 cm de distancia al módulo fijo hasta 8 metros en este caso (esta es la posición presentada en Figura 4-14), y volviendo por el mismo camino hasta su posición inicial en intervalos de 25 cm. En esta ocasión sólo se hicieron medidas a 10 dBm y se muestran únicamente la media de las 20 medidas por posición tanto en la ida como en la vuelta.



Figura 4-13: Escenario 2. Terraza

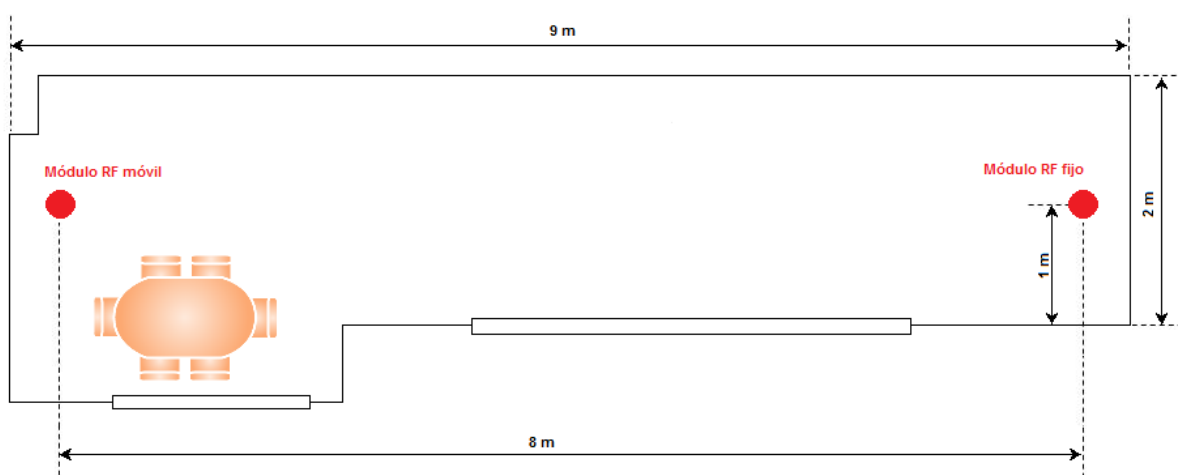


Figura 4-14: Plano planta terraza

Distancia [m]	Media Ida	Media vuelta	Media total
0,25	-34,60	-33,50	-34,02
0,5	-37,50	-38,65	-38,04
0,75	-43,50	-41,60	-42,45
1	-46,50	-45,33	-45,87
1,25	-54,53	-55,42	-54,95
1,5	-52,18	-52,45	-52,31
1,75	-50,45	-52,28	-51,27
2	-53,50	-56,75	-54,83
2,25	-61,70	-65,58	-63,22
2,5	-56,50	-55,50	-55,97
2,75	-56,50	-56,30	-56,40
3	-57,60	-56,83	-57,20
3,25	-57,88	-56,98	-57,40
3,5	-57,00	-56,15	-56,55
3,75	-59,35	-59,53	-59,44
4	-61,53	-60,63	-61,05
4,25	-65,08	-66,15	-65,58
4,5	-71,40	-71,38	-71,39
4,75	-71,44	-73,08	-72,19
5	-72,45	-74,40	-73,32
5,25	-73,43	-73,73	-73,57
5,5	-72,75	-72,50	-72,62
5,75	-74,23	-76,35	-75,16
6	-73,40	-74,93	-74,10
6,25	-91,43	-85,23	-87,30
6,5	-73,88	-75,80	-74,73
6,75	-72,15	-71,40	-71,76
7	-68,78	-69,95	-69,32
7,25	-73,29	-74,18	-73,71
7,5	-77,45	-74,48	-75,71
7,75	-83,75	-85,25	-84,44
8	-76,05	-76,68	-76,35

Tabla 4-3: Medidas terraza a 10 dBm

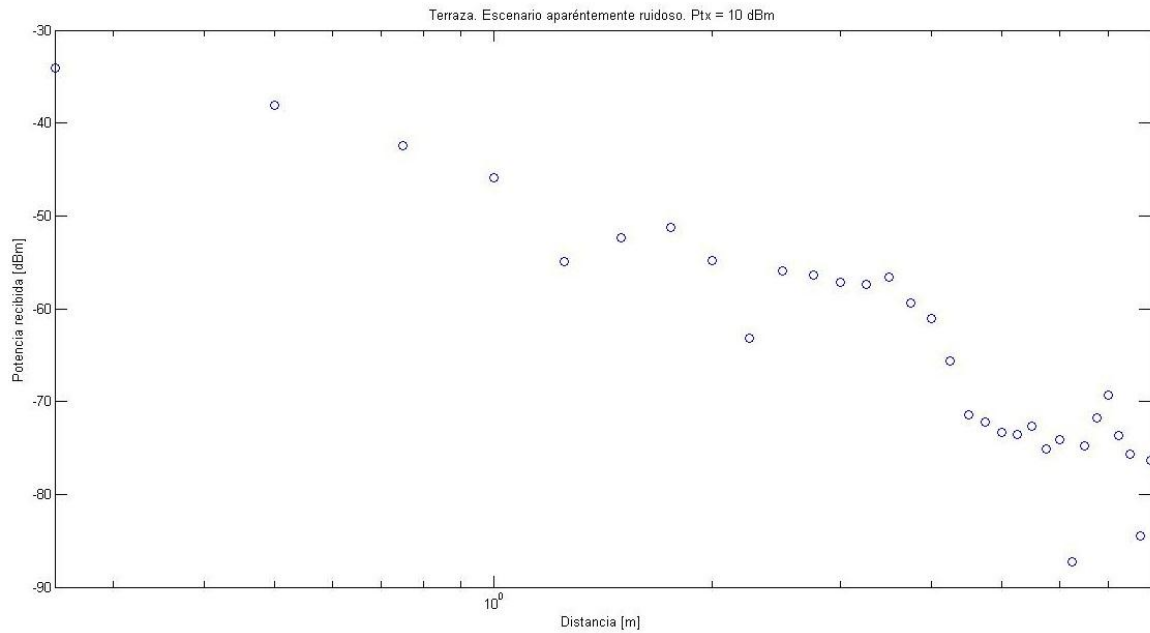


Figura 4-16: Terraza a 10 dBm

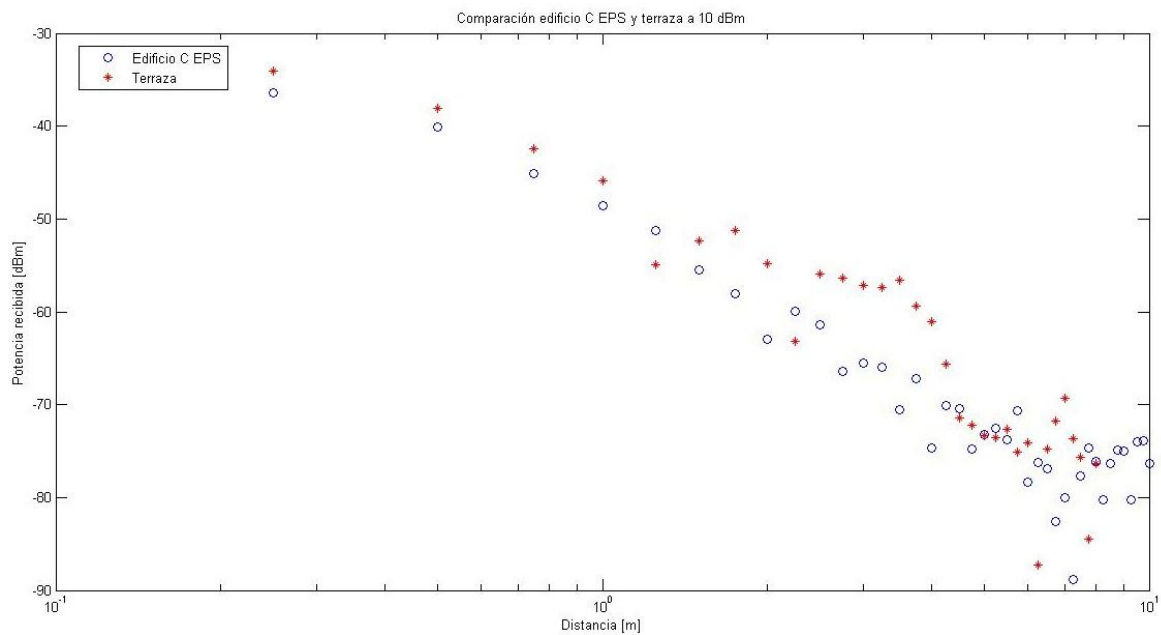


Figura 4-15: Comparación Edificio C EPS y terraza a 10 dBm

En las dos figuras anteriores se puede observar como las medidas tomadas en este escenario tan caótico difieren bastante de las tomadas en el escenario 1, mucho más controlado, para la misma potencia de emisión de 10 dBm. Se puede comprobar que cada escenario muestra un modelo de propagación diferente y sería interesante ajustarlo según sea éste para conseguir mejores resultados.

▪ Escenario 3

Para el último escenario, se ha elegido un entorno completamente opuesto al anterior: un escenario sin apenas ruido, sin perturbaciones aparentes, sin obstáculos, mucho más controlado, en definitiva, un espacio abierto donde las medidas tomadas sean lo más puras y precisas posible y no estén influenciadas por el entorno. Este escenario es la explanada desierta usada como recinto ferial en Alcobendas.



Figura 4-17: Escenario 3. Recinto ferial de Alcobendas

En este caso, las medidas se tomaron utilizando el programa desarrollado por Eloy Anguiano y descrito en la sección 4.5. Una parte de este programa se encarga de enviar el comando SMS (ver 3.2.3.2) constantemente a la dirección IP especificada en el archivo *iplist.dat* y en un hilo aparte el programa lee continuamente si ha recibido mensajes vía radiofrecuencia. Si este programa se compila en modo *POWER* muestra por pantalla únicamente las potencias recibidas. En el experimento realizado, se ejecuta este programa en dos PCs, que tienen conectado cada uno de ellos un módulo de RF. Uno de los módulos de RF queda fijo y el segundo se mueve en línea recta desde 25 cm de distancia hasta 10 en intervalos de 25 cm (en este caso sólo se hace la ida). En cada posición se ejecuta en ambos PCs el programa y se deja funcionando durante un minuto aproximadamente, permitiendo acumular alrededor de 35 medidas por módulo, lo que se traduce a 70 medidas posición. En esta ocasión, se utilizó una potencia de emisión de 5 dBm, que será la potencia utilizada en el sistema final.

Distancia [m]	Potencia recibida en dBm por		Media [dBm]
	Módulo RF fijo	Módulo RF móvil	
0,25	-33	-33,74	-33,3542578
0,5	-40,79	-40,97	-40,8790675
0,75	-46,02	-46,85	-46,415202
1	-48	-47,49	-47,737518
1,25	-48,15	-49	-48,5542379
1,5	-49,32	-50,02	-49,6559119
1,75	-51,02	-51,77	-51,37883
2	-52,19	-53,02	-52,585202
2,25	-53,08	-53,97	-53,5022413
2,5	-55	-55,14	-55,0694359
2,75	-56,45	-57,05	-56,7396466
3	-56,39	-56,78	-56,5806237
3,25	-58,17	-59,03	-58,5787473
3,5	-60,19	-60,94	-60,54883
3,75	-58,77	-59,03	-58,8980546
4	-62,04	-62,84	-62,4216053
4,25	-61,75	-62,2	-61,9691742
4,5	-62,44	-63,14	-62,7759119
4,75	-64,25	-64,99	-64,6042578
5	-64,05	-63,81	-63,9283423
5,25	-65,31	-64,88	-65,0896803
5,5	-64,41	-64,09	-64,2470534
5,75	-65,61	-65,07	-65,3316125
6	-71,89	-71,26	-71,5635863
6,25	-69,13	-69,2	-69,164859
6,5	-66,22	-65,84	-66,0258452
6,75	-73,66	-73,05	-73,3442989
7	-68,06	-67,64	-67,8449248
7,25	-67,88	-66,2	-66,9592663
7,5	-70,16	-69,34	-69,7306755
7,75	-72,88	-72,12	-72,4833965
8	-73,66	-72,79	-73,203251
8,25	-66,87	-90	-69,8592268
8,5	-73,73	-73,41	-73,5670534
8,75	-74,86	-74,66	-74,7588488
9	-77,75	-77,8	-77,774928
9,25	-71,76	-71,18	-71,4603248
9,5	-72,01	-72,54	-72,2669201
9,75	-77,46	-77,22	-77,3383423
10	-75,02	-74,46	-74,7309801

Figura 4-18: Medidas espacio libre a 5 dBm

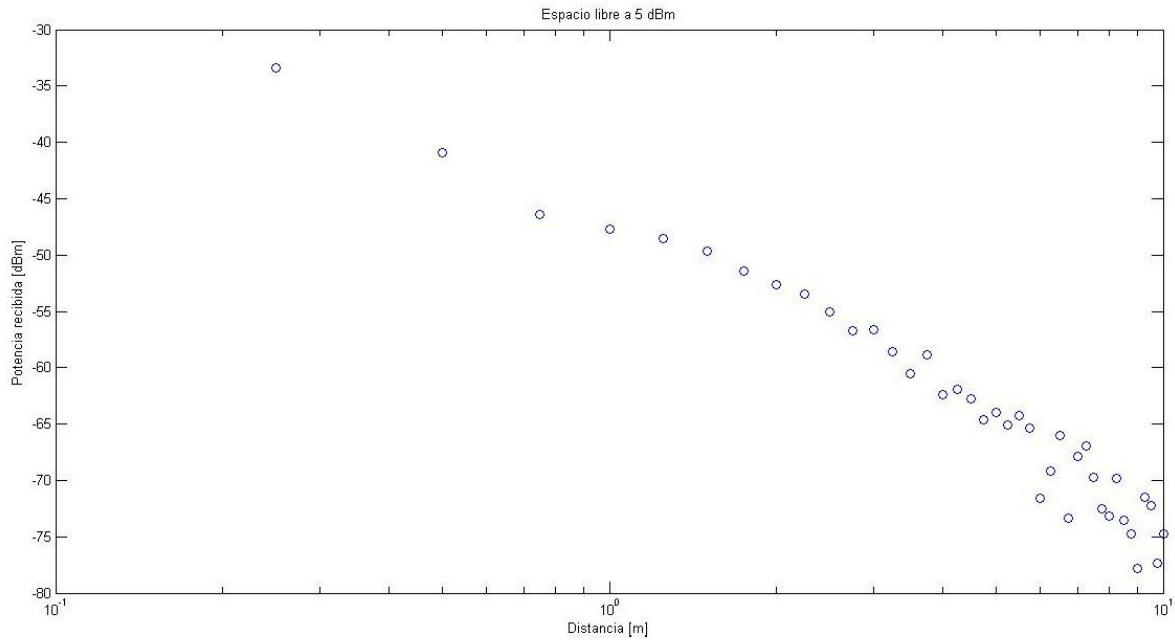


Figura 4-19: Medidas espacio libre a 5 dBm

En la siguiente figura se comparan las medidas tomadas en el edificio C de la EPS a 10 dBm y las tomadas, 6 meses después, en una pista de fútbol dónde el comportamiento puede considerarse cercano al producido en el espacio libre, en este a una potencia de 5 dBm. Puede observarse un comportamiento totalmente incongruente entre ambas medidas ya que para el caso de emisión a 5 dBm la potencia recibida es mayor que la recibida por las medidas tomadas a 10 dBm. Las medidas se realizaron con la misma pareja de módulos de RF en ambos casos, sólo que hubo un periodo de 6 meses entre ambas. El motivo de este comportamiento puede deberse a que el escenario interior (edificio C EPS) produce mayores pérdidas en la señal de RF debido a efectos de la propagación tales como el multitrayecto o la reflexión en paredes y demás obstáculos.

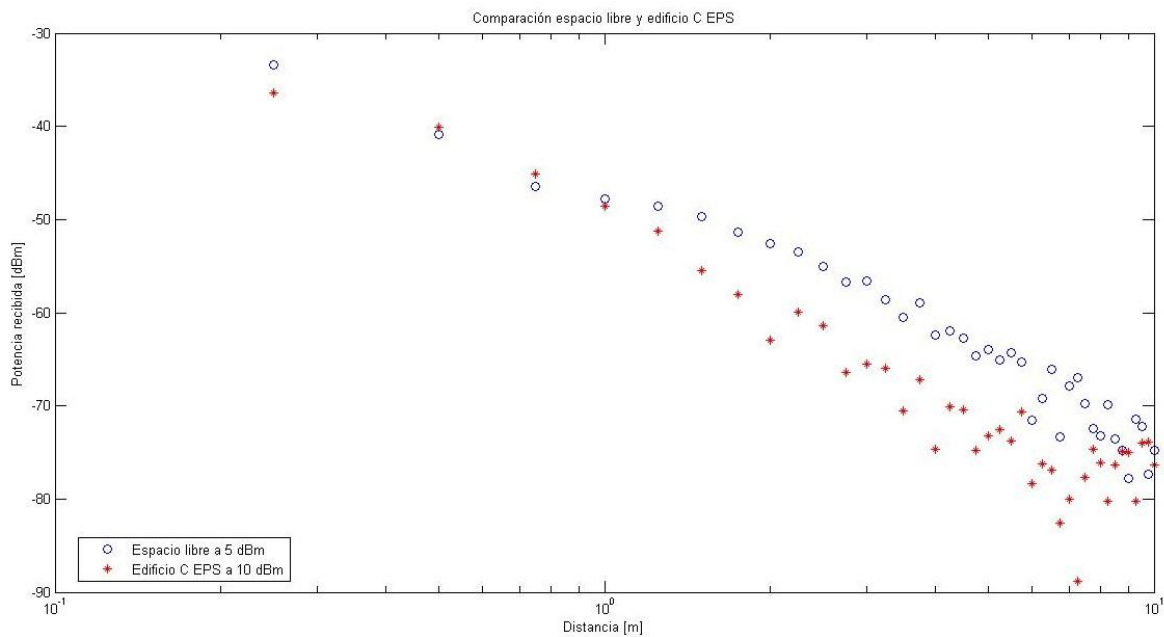


Figura 4-20: Comparación espacio libre a 5 dBm y edificio C EPS a 10 dBm

Por otro lado, se observa que las medidas en espacio libre no son tan dispersas como las tomadas en el edificio interior, están más concentradas y parece que se producirían menos errores en el cálculo de distancias.

4.3.2 Análisis de las medidas

En esta sección se intenta encontrar una relación lo más precisa posible entre potencia recibida (RSSI) y distancia entre antenas haciendo uso de las medidas tomadas en la sección anterior e intentando encontrar el paralelismo con el modelo teórico.

Como ya se ha comentado, en cada escenario la señal de radiofrecuencia se comporta de distinto modo debido a las características del entorno. En entornos interiores, la relación RSSI-distancia varía según la distribución de obstáculos como columnas, según la altura del techo y la distancia a las paredes debido a que la señal de radiofrecuencia sufre multitrayecto y reflexiones en estos elementos. Por lo tanto, para las pruebas finales del sistema de posicionamiento será necesario ajustar dicha relación según el entorno interior. Por otro lado, en espacios exteriores el comportamiento de la señal de radiofrecuencia es más homogéneo e incluso idéntico si el espacio exterior no tiene paredes ni obstáculos relativamente cercanos.

A continuación se expone un ejemplo de como se ha procedido para hallar la relación entre RSSI y distancia de acuerdo a los modelos de propagación escogidos. Este ejemplo se ha desarrollado usando las medidas tomadas en el escenario 3, el recinto ferial de Alcobendas cuyo comportamiento, en principio, se puede aproximar al del espacio libre. Según el escenario donde se vaya a utilizar el sistema final, se deberá proceder del mismo modo usando las medidas propias del entorno para calcular la relación a utilizar en ese caso.

El modelo de propagación en espacio libre, que debe seguir el escenario 3 con el que se va a trabajar, posee la siguiente relación teórica:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_p - L_{others}$$

$$L_p[dBm] = 92.45 + 20\log_{10}(f[MHz]) + 20\log_{10}(d[m])$$

donde P_{rx} es la potencia recibida por el receptor, P_{tx} es la potencia transmitida por el transmisor, G_{tx} es la ganancia de la antena transmisora, G_{rx} es la ganancia de la antena receptora, L_p son las pérdidas de potencia de la señal debida a la propagación y L_{others} son pérdidas de otra naturaleza. Ya que se busca la relación entre potencia recibida y distancias se puede agrupar y simplificar para obtener la siguiente relación:

$$P_{rx} = Cnt - 20\log_{10}(d[m])$$

siendo Cnt una constante.

En la siguiente imagen se muestran algunos ejemplos de aproximación de las medidas tomadas en el escenario 3 a este modelo de propagación. En ella podemos

observar como la pendiente de las diferentes aproximaciones (definidas por el término $-20 \cdot \log_{10}(d)$) no concuerdan con la pendiente de las medidas y se puede asegurar que este modelo es una aproximación no muy exacta del caso tratado. Esto se debe a que el escenario 3 no se puede aproximar a espacio libre tal y como se pensaba en un principio ya que la señal de radiofrecuencia viaja en dos direcciones distintas: la señal directa y señal con rebote en el suelo. El suelo está situado relativamente cerca de las antenas alterando la señal de radiofrecuencia al existir multitrayecto.

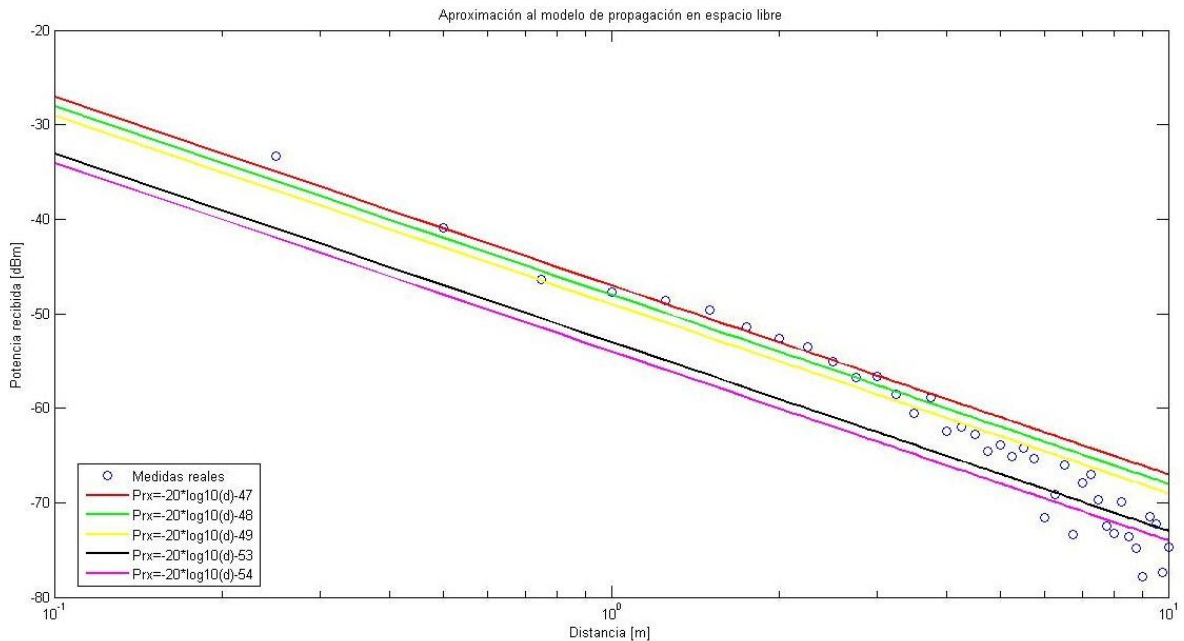


Figura 4-21: Aproximación de las medidas tomadas al modelo de propagación en espacio libre

Ahora se procederá a encontrar una mejor aproximación mediante interpolación logarítmica de las medidas tomadas usando el software matemático Matlab. Una vez obtenida la interpolación, se buscará su relación con el modelo de propagación en interiores de pendiente única expuesto en 4.3, el cuál viene definido por la siguiente expresión condensada:

$$P_{rx} = Cnt - 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

La interpolación logarítmica obtenida de las medidas tomadas que relaciona RSSI recibida y distancia es la siguiente:

$$P_{rx} = -46.476 - 27.026 \cdot \log_{10}(d)$$

Relacionando las dos últimas expresiones se obtiene n , índice de propagación para el caso tratado, igual a 2.7026. Si la comunicación se ejecuta en un entorno con visión directa (LOS) el índice de propagación ha de estar entre 1.5 y 2. El caso de espacio abierto se corresponde con $n=2$ ($-20 \cdot \log(d)$). Sin embargo si no existe visión directa (NLOS), n se

encuentra dentro del rango (3,5). En este caso el índice hallado se encuentra entre ambos casos. En [15] se muestran algunos valores pre-calculados para el índice de propagación según el escenario. En la siguiente tabla se muestran dichos datos:

Escenario	n
Oficina	(1.4~2.5)
Pasillo	(1.9~2.5)
Parque	(2.7~2.5)
Balcón	(1.4~2.4)
Patio	(2.8~3.8)
Barrera	(4.6~5.1)
Pared de piedra	(3.3~3.7)
Bosque de bambú	(4.5~5.4)
Callejón	(2.1~3.0)
Hierba	(3.0~3.9)
Arena	(3.8~4.6)

Tabla 4-4: Índice de propagación en diferentes escenarios

Las diferentes investigaciones apuntan que cada escenario muestra un modelo de propagación ajustado a su circunstancia y no existe una relación absoluta para todos los escenarios.

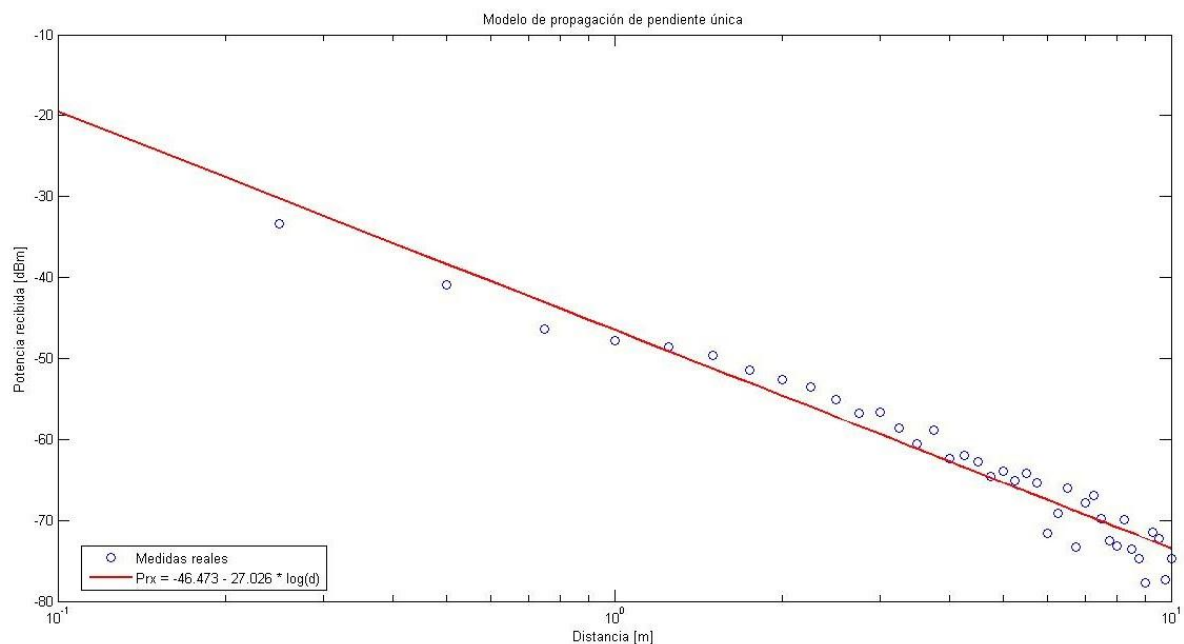


Figura 4-22: Interpolación pendiente única

La figura anterior muestra la relación encontrada para las medidas realizadas en espacio libre. Se observa que, a pesar de ajustarse mejor a las medidas que las aproximaciones consideradas para el modelo de propagación en espacio libre, todavía existen pequeñas desviaciones producidas por el hecho de que a partir de un metro hay un cambio significativo en la linealidad de las medidas. Por este motivo, se intentará mejorar la relación usando el modelo de propagación de doble pendiente para interiores.

Este modelo sigue la siguiente relación:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_p - L_{others}$$

$$L_p[dBm] = \begin{cases} L_0 + 10 \cdot n_1 \cdot \log_{10}(d) + X_{g1} & d \leq d_r \\ L_1 + 10 \cdot n_2 \cdot \log_{10}\left(\frac{d}{d_r}\right) + X_{g2} & d > d_r \end{cases}$$

agrupando y simplificando se obtiene:

$$P_{rx}[dBm] = \begin{cases} Cnt1 - 10 \cdot n_1 \cdot \log_{10}(d) & d \leq 1 \\ Cnt2 - 10 \cdot n_2 \cdot \log_{10}(d) & d > 1 \end{cases}$$

prescindiendo de las variables aleatorias (X_{gx}). Usando Matlab se obtiene la siguiente relación por interpolación logarítmica:

$$P_{rx}[dBm] = \begin{cases} -48.494 - 24.892 \cdot \log_{10}(d) & d \leq 1 \\ -43.904 - 30.487 \cdot \log_{10}(d) & d > 1 \end{cases}$$

En este caso, los índices de propagación, n_1 y n_2 , son 2.49 y 3.05 respectivamente. La siguiente figura muestra la representación gráfica de la relación encontrada:

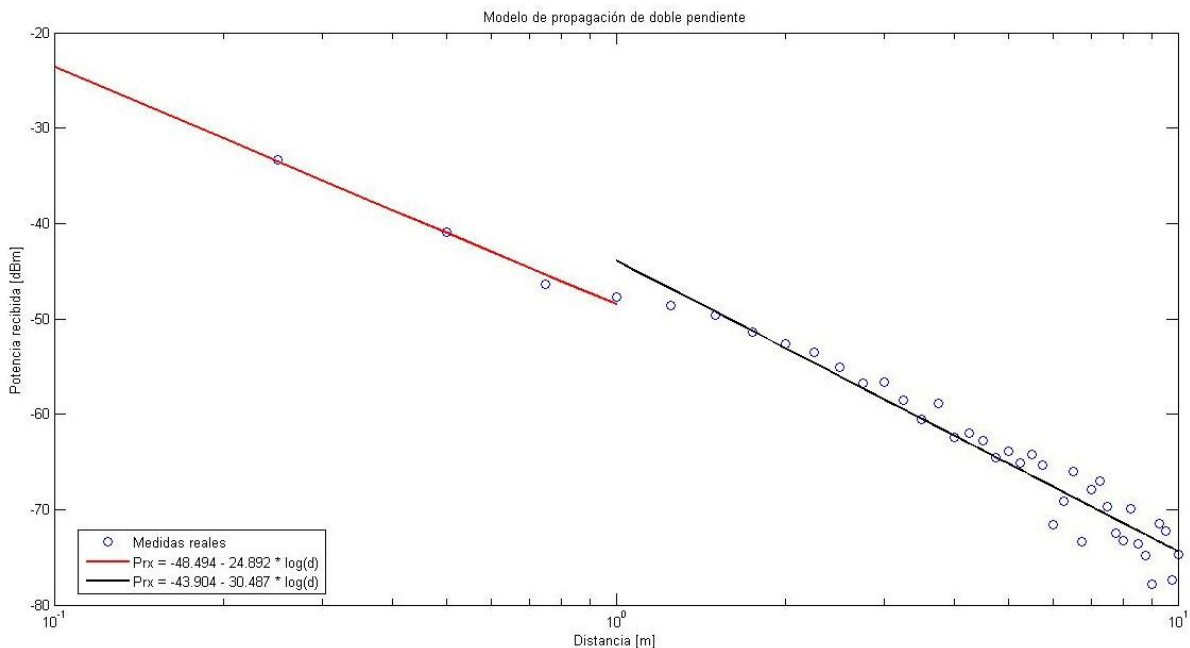


Figura 4-23: Modelo de propagación de doble pendiente

Para evaluar la precisión de la interpolación se ha calculado el error instantáneo que se hubiese producido en el cálculo de distancia si se hubiesen obtenido los mismos valores de potencia. La siguiente tabla muestra la comparación de los errores para los dos métodos de interpolación utilizados: pendiente única y doble pendiente. La Figura 4-24 grafica los datos representados en la tabla.

Distancia [m]	Modelo de pendiente única		Modelo de doble pendiente	
	Predicción [m]	Error [m]	Predicción [m]	Error [m]
0,25	0,45078	-0,20078	0,24648	0,00352
0,5	0,79576	-0,29576	0,49441	0,00559
0,75	1,2088	-0,4588	0,82507	-0,07507
1	1,3358	-0,3358	1,3358	-0,3358
1,25	1,4208	-0,1708	1,4208	-0,1708
1,5	1,5441	-0,0441	1,5441	-0,0441
1,75	1,7587	-0,0087	1,7587	-0,0087
2	1,9264	0,0736	1,9264	0,0736
2,25	2,0646	0,1854	2,0646	0,1854
2,5	2,324	0,176	2,324	0,176
2,75	2,6365	0,1135	2,6365	0,1135
3	2,605	0,395	2,605	0,395
3,25	3,0293	0,2207	3,0293	0,2207
3,5	3,5153	-0,0153	3,5153	-0,0153
3,75	3,1033	0,6467	3,1033	0,6467
4	4,0494	-0,0494	4,0494	-0,0494
4,25	3,9134	0,3366	3,9134	0,3366
4,5	4,1592	0,3408	4,1592	0,3408
4,75	4,7751	-0,0251	4,7751	-0,0251
5	4,5375	0,4625	4,5375	0,4625
5,25	4,9534	0,2966	4,9534	0,2966
5,5	4,648	0,852	4,648	0,852
5,75	5,0448	0,7052	5,0448	0,7052
6	8,0771	-2,0771	8,0771	-2,0771
6,25	6,7387	-0,4887	6,7387	-0,4887
6,5	5,3164	1,1836	5,3164	1,1836
6,75	9,2398	-2,4898	9,2398	-2,4898
7	6,0993	0,9007	6,0993	0,9007
7,25	5,7047	1,5453	5,7047	1,5453
7,5	7,0329	0,4671	7,0329	0,4671
7,75	8,6582	-0,9082	8,6582	-0,9082
8	9,1419	-1,1419	9,1419	-1,1419
8,25	7,1015	1,1485	7,1015	1,1485
8,5	9,3966	-0,8966	9,3966	-0,8966
8,75	10,282	-1,532	10,282	-1,532
9	12,912	-3,912	12,912	-3,912
9,25	8,0143	1,2357	8,0143	1,2357
9,5	8,5177	0,9823	8,5177	0,9823
9,75	12,493	-2,743	12,493	-2,743
10	10,26	-0,26	10,26	-0,26

Tabla 4-5: Comparación interpolación

El error global ha sido establecido a partir del índice del error medio cuadrático (EMC):

$$EMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i^{estimado} - x_i^{real})^2}{n}}$$

La siguiente tabla muestra el EMC calculado para cada uno de los modelos de propagación utilizados, considerando todas las medidas en un caso y considerando sólo las medidas tomadas hasta 5 metros dónde la estimación es mejor.

Error cuadrático medio (EMC)	Modelo de pendiente única	Modelo de doble pendiente
Hasta 5 metros	0.3872 m	0.2656 m
Hasta 10 metros	1.4812 m	1.1224 m

Tabla 4-6: EMC interpolación

Se puede comprobar como el modelo de pendiente doble mejora la estimación de los valores en comparación al modelo de pendiente única. También se puede comprobar como la estimación mejora en los 5 primeros metros, con un error de unos 26 cm, debido a la dispersión de las medidas en los segundos 5 metros.

Cabe destacar que estos errores no se corresponden con los del sistema final.

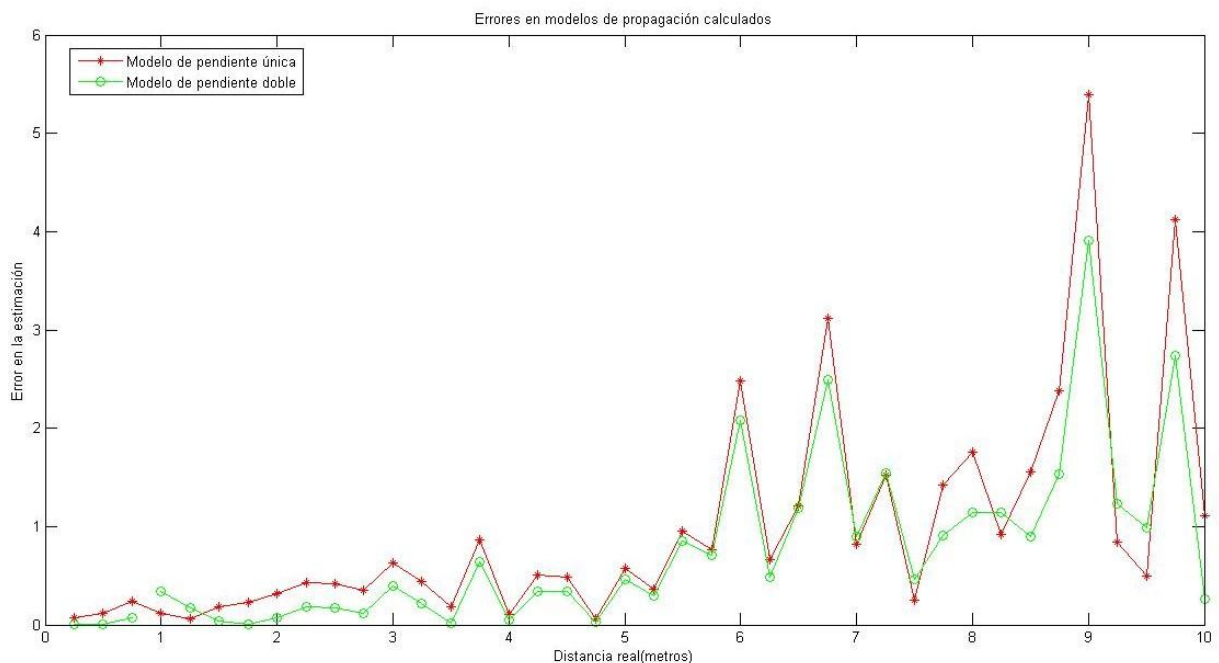


Figura 4-24: Errores estimados en los modelos de propagación

4.4 Análisis heurístico del RSSI

El análisis heurístico se puede definir como un conjunto de reglas metodológicas no necesariamente formalizadas, positivas y negativas, que sugieren o establecen cómo proceder y que situaciones evitar en la solución de problemas y elaboración de hipótesis.

En esta sección se expone el análisis heurístico realizado sobre los módulos de RF con el objetivo de conocer las posibles situaciones anómalas en las que el RSSI recibido se distancie mucho del esperado, pudiendo producir, de este modo, grandes errores en el sistema de posicionamiento final. Ante las situaciones anómalas encontradas se propondrá una posible solución o se evitará que dicha situación ocurra en las pruebas finales del sistema general de posicionamiento.

Tal y como se explicó en la sección anterior, para medir la distancia entre módulos de RF se usará una relación entre la potencia recibida y la distancia entre ellos obtenida empíricamente. Esta relación es obtenida mediante medidas realizadas en situaciones muy concretas, por lo que dicha relación puede incurrir en graves errores al enfrentarse a situaciones diferentes a la inicial. El análisis teórico de la señal de radiofrecuencia puede aportar ideas sobre este tipo de situaciones. A continuación se enuncian situaciones teóricas que han sido comprobadas en la práctica.

- Perturbaciones producidas por otros sistemas de radiofrecuencia emitiendo a frecuencias similares y estando relativamente cerca. No se puede controlar este tipo de situaciones.
- Pérdidas en las señales recibidas causadas por el multitrayecto. El sistema de posicionamiento ha de convivir con este problema e intentar reducir su efecto lo máximo posible.
- Pérdidas por refracción a causa obstáculos entre las antenas que producen pérdidas en la señal recibida de diferente magnitud dependiendo del material del obstáculo. Materiales metálicos afectan mucho más que materiales no metálicos. Una caja de cartón vacía afecta menos que la misma caja llena de libros. El sistema de posicionamiento final se probará en interiores pero sin obstáculos entre las antenas.
- Para 10 dBm, la distancia mínima entre antenas para que los módulos RF se puedan comunicar (exista conectividad, se “vean”) es 7 cm. A menor distancia no se pueden comunicar.
- Posicionar un objeto, tal como una pared o una caja en un lateral del enlace de comunicación entre los módulos puede producir variaciones en la potencia de la señal recibida dependiendo de la distancia a dicho objeto. A mayor distancia menos afecta.

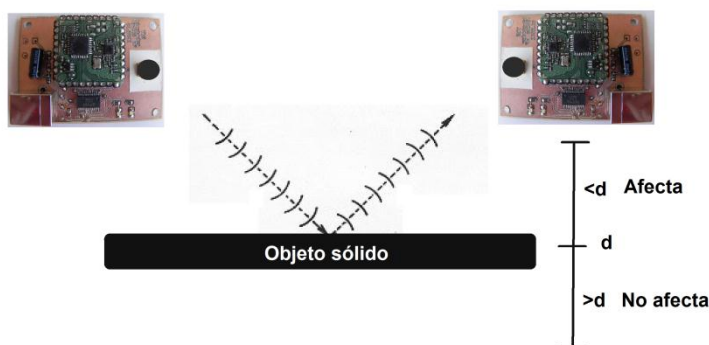


Figura 4-25: Objeto lateral

Según el diagrama de radiación teórico de la antena, la potencias recibidas desde un módulo de RF situado en el mismo plano horizontal y en cualquier posición de una circunferencia de radio determinado y centro el módulo receptor han de ser iguales o muy parecidas. Esta característica es imprescindible para poder posicionar correctamente los diferentes agentes y poder aplicar el algoritmo de posicionamiento. Los siguientes experimentos prácticos demuestran que esto no ocurre exactamente igual en la realidad. El experimento se basa en comparar la potencia recibida para la misma distancia pero con los módulos de RF colocados en diferente posición. La siguiente tabla muestra los resultados:









Posición relativa antenas [vista planta]	RSSI recibido a diferentes distancias [dBm]			
	10 cm	30 cm	20 cm	40 cm
	-28	-32	-35, -37	-37
	-28	-32	-37	-37
	-30	-36	-38	-
	-28	-33	-40, -41	-
	-30	-36	-42	-
	-30	-35	-36	-
	-29	-32	-43	-
	-30	-32	-34	-

Tabla 4-7: RSSI a diferentes posiciones de las antenas

Al analizar los datos tomados, se puede apreciar que para una misma distancia puede llegar a haber diferencias de hasta 8 dBm produciendo un error muy grande en su traducción a distancias. Este comportamiento puede deberse a que el diagrama de radiación real no es exactamente un toroide perfecto. El módulo de RF posee una superficie de cobre con función de plano de masa que posiblemente modifique la forma teórica del diagrama de radiación, elevando la parte del lóbulo del toroide cercana al módulo de RF y por tanto al plano de masa, tal y como muestra la Figura 4-26.

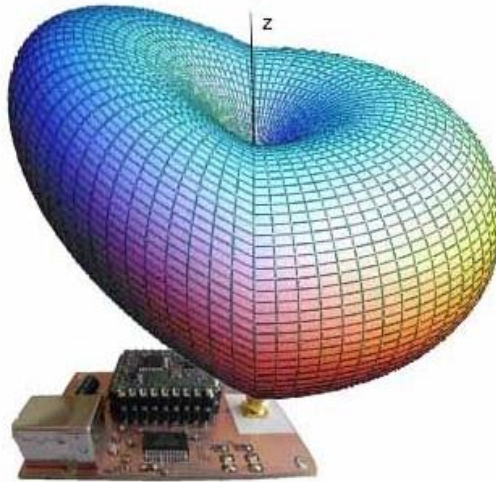


Figura 4-26: Diagrama de radiación modificado

Este problema impide calcular correctamente la distancia a la que se encuentran las diferentes antenas ya que para la misma distancia la potencia recibida varía en función de la posición relativa respecto de los módulos.

La solución propuesta a este importante problema es elevar las antenas unos 5 centímetros respecto del módulo de RF y por tanto del plano de masa haciendo uso de unos pequeños cables coaxiales rígidos con sus correspondientes conectores SMA. Cabe destacar que los cables coaxiales usados no añaden pérdidas adicionales significativas a la señal.



Figura 4-27: Coaxial alargador

Tras el análisis de los resultados arrojados usando el cable coaxial alargador se han apreciado pequeñas mejoras pero, aun así, no se ha conseguido solucionar completamente el problema.

Otro problema importante encontrado es el siguiente: para una misma potencia de emisión las potencias recibidas en módulos de RF diferentes son distintas con diferencias de hasta 4 dBm. El experimento realizado hace uso de diferentes parejas de módulos de RF en los que se les fija la misma potencia de emisión y consiste en el envío de mensajes entre ellos y la comprobación de la similitud o disparidad entre ambas.

Una de los motivos que podría producir este comportamiento es el efecto antena asociado al plano de masa que posee el módulo de RF. Esto es, el plano de masa puede funcionar como antena recibiendo las señales de radiofrecuencia de los otros módulos. Si este es así, la señal de radiofrecuencia final será una combinación de la señal recibida por la antena y la recibida por el plano de masa. Si estas dos señales están en fase la señal resultado será la suma de ambas; sin embargo, si las señales están en oposición de fase la señales de restarán. Cada módulo podría tener uno de estos comportamientos y ser el motivo de la diferencia de potencia recibida en cada módulo de RF. La siguiente imagen resume el razonamiento anterior:

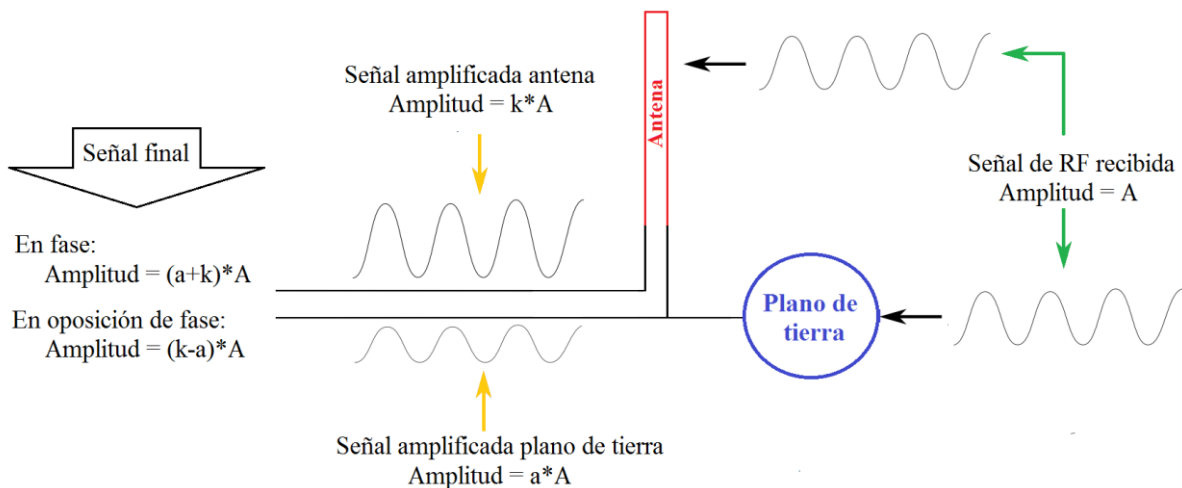


Figura 4-28: Efecto antena en el plano de masa

Para comprobar si este efecto se produce en los módulos de RF que se están utilizando se ha realizado el siguiente experimento: colocar una jaula de Faraday alrededor de cada módulo de RF, es decir entorno al plano de masa, dejando fuera la antena y repetir el experimento anterior.

Una jaula de Faraday es una caja metálica que protege de los campos eléctricos estáticos. El efecto jaula de Faraday provoca que el campo electromagnético en el interior de la caja sea nulo, anulando el efecto de los campos externos. Esto se debe a que, cuando el metal de la caja está sujeto a un campo electromagnético externo, se polariza, de manera que queda cargado positivamente en la dirección en que va el campo electromagnético, y cargado negativamente en el sentido contrario. Puesto que la caja se ha polarizado, esta genera un campo eléctrico igual en magnitud pero opuesto en sentido al campo electromagnético, luego la suma de ambos campos dentro del conductor será igual a 0.

En el experimento realizado se han cubierto dos módulos de RF con papel de aluminio (conductor) asegurándose que el aluminio no está en contacto con ningún otro metal del módulo de RF, lo que arruinaría el experimento. Esto provoca que el plano de masa en el interior del papel de aluminio no se vea afectado por la señal de radiofrecuencia externa y de este modo no pueda actuar como antena. Una vez preparadas las antenas se ha procedido a repetir el experimento: fijar la potencia de emisión en los módulos y comprobar si la potencia recibida varía considerablemente. Se ha comprobado que el comportamiento explicado (cada módulo de RF recibe potencias diferentes a la misma potencia de transmisión) sigue ocurriendo por lo queda descartado que el plano de masa esté actuando de antena o en todo caso que su efecto sea significativo.

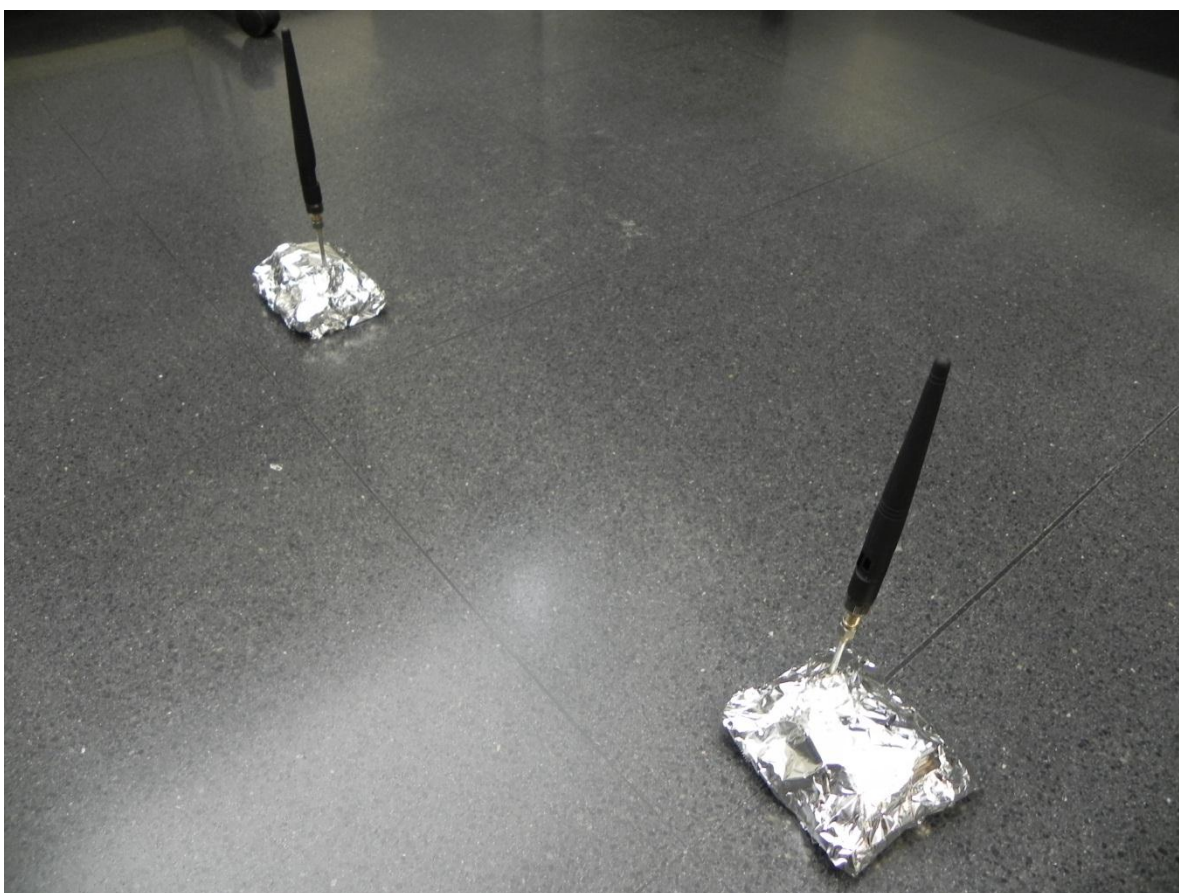


Figura 4-29: Módulos RF efecto jaula Faraday

Finalmente, se ha procedido a calibrar todos los módulos de RF para que la potencia recibida (RSSI) sea lo más parecida en todos los casos. Esto quiere decir que se han escogida las potencias de transmisión en cada módulo que hacen que la potencia recibida sea similar tomando como referencia uno de los módulos de RF usados en las medidas en espacio libre y tomando como potencia de emisión de referencia 5 dBm.

Para escoger las potencias de emisión en cada módulo de RF se han seguido los siguientes pasos. Previamente se conoce que la potencia utilizada en las medidas para la obtención de la relación final entre RSSI y distancia es 5 dBm y se coge uno de los

módulos de RF utilizados en estas medidas (137.005). El módulo RF de referencia es el 137.005 a 5 dBm de potencia de emisión. Para calibrar el resto, cada uno de ellos se comunica con el módulo referencia y se comprueba la potencia recibida en cada caso. Si la potencia recibida en el referencia es diferente que la recibida en el que se está probando, se ajusta la potencia de emisión en el segundo hasta conseguir unas potencias en recepción lo más similares posibles. Finalmente se ha conseguido que la mayoría de los módulos reciban una potencia similar, con diferencias de un máximo de 2 dBm en algún caso. La siguiente tabla muestra la potencia seleccionada en cada módulo de RF que será utilizada en el sistema final.

IP módulo de RF	#Potencia en WM11	Potencia RF de transmisión
137.005	8	5 dBm
137.023	9	7 dBm
137.021	8	5 dBm
137.009	10	10 dBm
137.007	7	0 dBm

Tabla 4-8: Potencia calibradas en módulos RF

4.5 Algoritmo de posicionamiento

El algoritmo de posicionamiento ha sido desarrollado por Eloy Anguiano Rey, profesor titular de la Universidad Autónoma de Madrid, en lenguaje C. El presente proyecto ha colaborado puntualmente en el desarrollo de este programa: en la comunicación con el puerto serie, la triangulación y en la realización de las pruebas, tanto de comprobación del correcto funcionamiento del programa como en las pruebas finales del algoritmo.

El algoritmo de posicionamiento se basa en un sistema de agentes reactivos que poseen diferentes características dependiendo de su función dentro del sistema definidas por parámetros. En general, pueden existir dos tipos de agentes con diferentes propiedades: los agentes reactivos activos, que suelen ser agentes con movilidad cuya posición varía con el tiempo y los agentes reactivos pasivos, que suelen ser agentes fijos cuya posición permanece constante. Cada agente posee un comportamiento muy simple pero, en conjunto, todos los agentes que componen el sistema tendrán un comportamiento complejo. El programa agente dispone de tres partes claramente diferenciadas:

- Zona de memoria compartida donde se almacenan la información del resto de agentes del sistema.
- Proceso que realiza permanentemente lecturas del puerto serie al que está conectado el módulo de RF para obtener mensajes con información del resto de agentes. Esta información se guarda en la zona de memoria compartida.
- Proceso de envío de mensajes y algoritmo de posicionamiento. Se envían mensajes aleatoriamente a los agentes del sistema con información acerca de sí mismos. El algoritmo de posicionamiento lee la información de los agentes de la zona de memoria compartida para calcular posición de cada uno de ellos dependiendo del estado del agente.

El algoritmo de posicionamiento, exactamente, se basa en un comportamiento de biestabilidad consistente en un sistema de tensión-relajación. Según el estado del agente, tensión o relajación, su comportamiento será diferente. Un agente tenderá a relajarse en función del tiempo transcurrido desde su última potencia recibida o porque las potencias que recibe son congruentes con la posición calculada. Un agente tenderá a tensarse por dos motivos diferentes en función del comportamiento deseado del agente. Los agentes reactivos pasivos se tensarán cuando los mensajes recibidos aporten información incongruente con el estado del agente y los agentes reactivos activos se tensarán cuando la información sea congruente con el estado. Un agente en estado de tensión tiende a calcular nuevas posiciones constantemente con el objetivo de relajarse.

Los cambios de estado se realizarán normalmente con un umbral doble. Este umbral doble permite mantener durante más tiempo cada uno de los estados permitiendo un comportamiento más estable que con un umbral único. La Figura 4-30 describe el sistema de tensión-relax. Las flechas indican en qué valores se cambia de estado, valor configurable por parámetros.

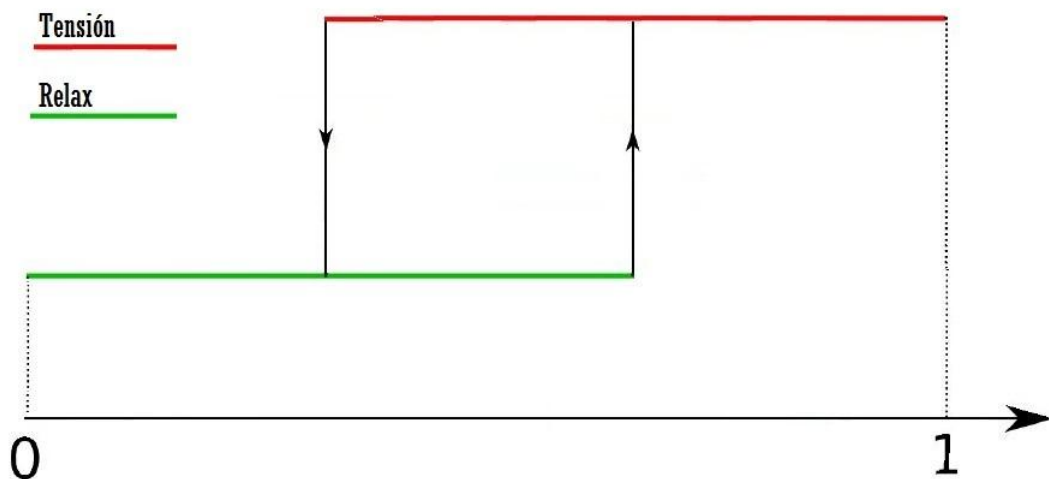


Figura 4-30: Sistema biestable. Estados tensión-relax.

La Figura 4-31 muestra el diagrama de bloques general de cada uno de los agentes del sistema. El programa comienza cargando la configuración del agente leyendo la información del archivo de configuración (*file.conf*) que se le pasa al programa o cargando los valores por defecto. Algunos de los parámetros configurables más importantes son los siguientes:

- *SerialDevice*: Dirección del puerto serie al que se conecta el módulo de RF. Habitualmente */dev/ttyUSB0*.
- *IPListFile*: Archivo con la lista de IPs del sistema. Ej. *iplist.dat*.
- *TypeAgent*: Tipo de agente: pasivo o activo.
- *IntensityIntegrationFactor*: Factor de integración de la nueva medida con respecto a las anteriores (*factor*).

$$distancia_{final} = distancia_{anterior} \cdot factor + distancia_{nueva} \cdot (1 - factor)$$

- *DistanceSlope* y *DistanceOrigin*: Valores pertenecientes a la relación entre distancia y potencia recibida. Calculado en 4.3.2.

$$P_{rx} = DistanceOrigin - DistanceSlope \cdot \log_{10}(d)$$

- *PowerValue*: Valor de la potencia de emisión de las señales de RF. Calibradas en Tabla 4-8.
- *AdmisibleError*: Error admisible en las medidas. Influye en el sistema de estados tensión-relax. Si las medidas tomadas difieren de las enviadas por el resto de módulos en un rango mayor que el error admisible, el agente se tensiona.
- *SendRate*: Probabilidad de envío de mensajes ajustable para no saturar la red de comunicaciones.
- *TensionRate*: Incremento del valor de tensión.
- *RelaxRate*: Decremento del valor de tensión.

- *TensRel* y *RelTens*: Valor de la tensión en que cambia de estado de tensión a relax y viceversa.

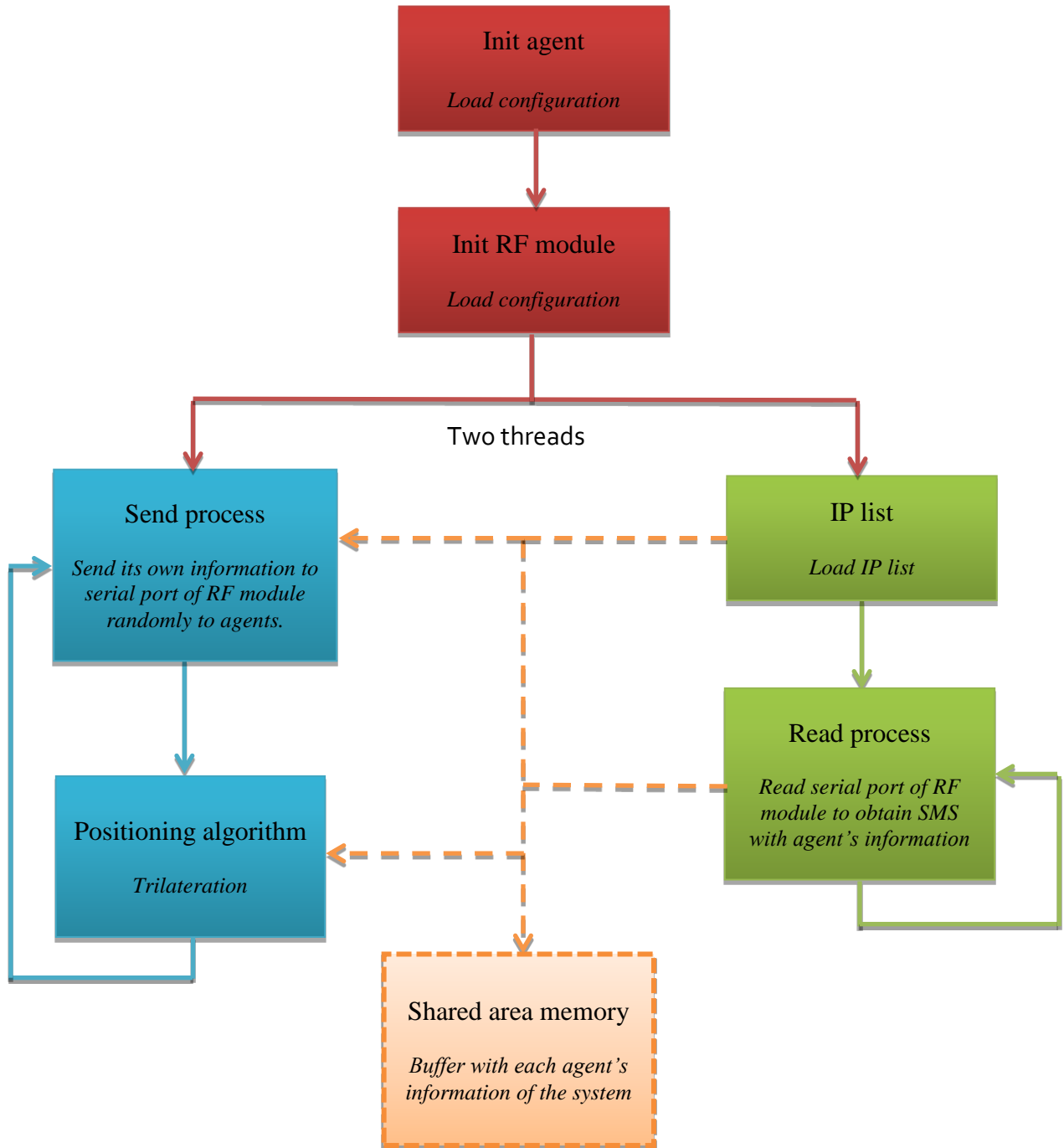


Figura 4-31: Diagrama de flujo de agentes

El programa continua configurando el módulo de RF con los parámetros seleccionados [3.2.3.2]. Luego se crea la zona de memoria compartida y se crea un hilo

hijo. Cada uno de los hilos crea los semáforos oportunos para poder operar con la zona de memoria compartida.

El hilo hijo carga el archivo con las IPs de todos los agentes del sistema y las guarda en la zona de memoria compartida. La memoria compartida contiene un buffer que contiene en cada posición la siguiente información de cada uno de los agentes:

- IP
- Posición (x, y, z)
- Distancia
- Última potencia recibida en dBm de dicho agente
- Estado (tensión o relax)
- Validez (Yes o Not)

El hilo hijo, por último, entra en un proceso de lectura ininterrumpido. En este proceso, se lee continuamente el puerto serie al que está conectado el módulo de RF para obtener los mensajes del resto de agentes del sistema. Los mensajes que recibe contienen la IP del agente del que procede, su posición (x, y, z), el estado (relax o tensión) en el que se encuentra y la potencia con la que se recibe el mensaje. Con la potencia recibida del mensaje se calcula la distancia a la que se encuentra dicho agente y se guarda en la memoria compartida al igual que el resto de datos recibidos.

Por otro lado, el hilo padre entra en otro bucle. En éste, al principio se envía un mensaje a uno de los agentes elegido aleatoriamente entre los almacenados y activos en la memoria compartida. El mensaje que se envía está compuesto por la propia IP, su posición (x, y, z) y el estado en el que se encuentra. El mensaje se envía con una probabilidad la cual es configurable por parámetros, *SendRate* (por ejemplo, si *SendRate*=0.2, en el 20% de las iteraciones del bucle se enviarán mensajes), para no saturar la red de comunicaciones. Por último, se ejecuta el algoritmo de posicionamiento.

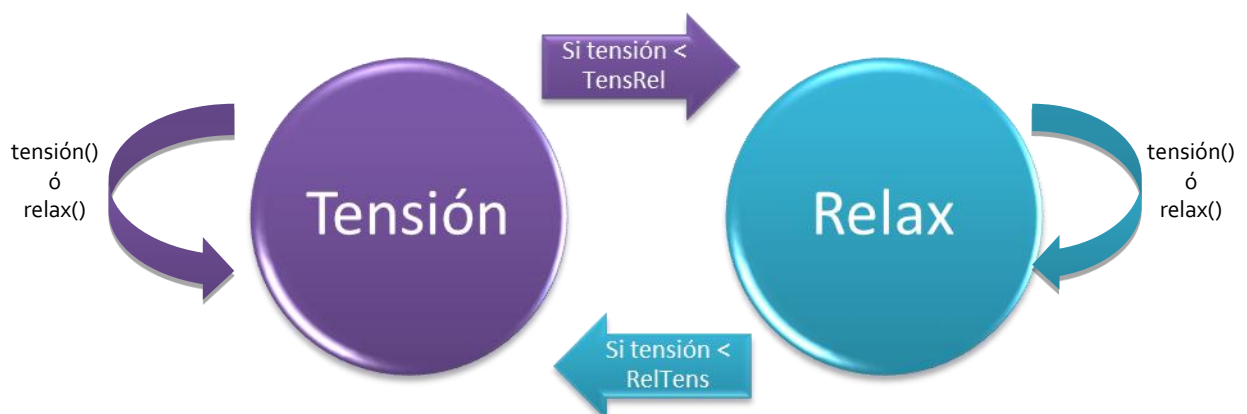


Figura 4-32: Diagrama de estados del sistema tensión-relax

La figura anterior describe el diagrama de estados del algoritmo de posicionamiento al igual que la Figura 4-30. El algoritmo de posicionamiento se basa en comprobar el estado en el que se encuentra el agente y actuar en base a ello. Si está en estado de relax,

simplemente calcula la distancia entre las coordenadas (x, y) del propio agente y las de cualquier otro (éstas coordenadas las envía el agente, no se calculan con la potencia recibida) y se compara con la distancia calculada a través de la potencia recibida. Si la diferencia es mayor que el error admisible, el sistema de tensa la cantidad estipulada en la variable *tensionRate*; si la diferencia es menor el sistema se relaja la cantidad determinada por la variable *relaxRate*. Si por el contrario, el agente se encuentra en estado de tensión se calcula la nueva posición del propio agente mediante trilateración. Si la función de trilateración devuelve NOK el sistema se tensa, mientras que si devuelve OK el sistema se relaja.

La función de trilateración se encarga de posicionar el agente haciendo uso de las distancias calculadas mediante la potencia recibida del resto de agentes del sistema. Según el número de agentes de los que se ha recibido información, la función de trilateración posee varias situaciones y diferentes formas de actuar en cada una de ellas. Funcionamiento según se tienen:

- Ningún dato: Si el agente no ha recibido información de ningún agente, la función devuelve NOK y el sistema se tensa.
- Un dato: Si sólo se dispone de la medida de un agente, se calcula una posición aleatoria en la circunferencia cuyo radio es la distancia calculada mediante la potencia recibida y centro las coordenadas del agente. Devuelve NOK y el agente se tensa.
- Dos datos: Si el agente dispone de mensajes precedentes de dos agentes, se calcula los dos puntos de intersección entre las circunferencias cuyos centros son las coordenadas de dichos agentes y el radio la distancia calculada mediante la potencia recibida. Se elige uno de ellos aleatoriamente. Si las dos circunferencias no se cortan, se elige un punto entre ambas circunferencias. En ambos casos la función devuelve NOK y el sistema se tensa.
- Tres o más datos: Si el agente dispone de información de 3 o más agentes, se eligen tres de ellos aleatoriamente y con los dos primeros se procede como en el caso anterior para dos datos. De los dos puntos obtenidos de la intersección de sus dos circunferencias, se elige la más cercana al tercer círculo. Si la distancia entre el tercer círculo y el punto elegido es mayor que el error admisible, se devuelve NOK y el agente se tensa. En caso contrario, se devuelve OK y el sistema se relaja.

El algoritmo de posicionamiento realiza un posicionamiento relativo de los agentes ya que no existe un punto fijo conocido que posibilite un posicionamiento absoluto de las balizas. Por ello, el algoritmo no posee un sistema de coordenadas fijo, sino que éste varía con el tiempo hasta que todos los agentes entran en estado de relax y todos ellos adoptan el mismo sistema de coordenadas. Durante el tiempo en el que los agentes están en estado de tensión el sistema de coordenadas cambia dinámicamente pero, para el mismo instante de tiempo, todos los agentes utilizan el mismo sistema de referencia.

El programa tiene varios modos de compilación según se quiera obtener por pantalla una información determinada acerca del estado del agente u otra. El programa se compila con una instrucción del tipo:

make MODO

donde *MODO* es la opción de compilación mencionada. A continuación, se enumeran algunos de los modos más útiles del programa:

- **ALL:** Muestra todas las trazas y toda información del agente.
- **POWER:** Muestra todas las potencias recibidas (RSSI) extraídas de los mensajes leídos por radiofrecuencia.
- **POSITION:** Muestra el estado del agente (relax o tensión), el instante de tiempo al que corresponde el estado y la posición (x,y) y distancias de cada uno de los agentes del sistema.
- **MATLAB:** Muestra los mismos datos que el modo anterior pero de un modo más sencillo. Interesante para volcar toda la información de cada uno de los agentes a un archivo y tratar dicha información con un programa matemático, como Matlab.

La forma de ejecutar el programa de posicionamiento descrito es la siguiente.

`./agente file.conf`

donde *agente* es el archivo ejecutable generado tras la compilación y *file.conf* es el archivo de configuración

El programa de posicionamiento descrito hasta el momento es el que utilizan los nodos fijos. Para el robot móvil se ha utilizado un programa exactamente igual al anterior sólo que se le ha añadido la librería de movimiento del robot descrita en 3.2.8.3. La Figura 4-33 muestra el diagrama de flujo del programa de posicionamiento del nodo móvil. Como se puede observar el programa es idéntico al del nodo fijo (Figura 4-31) sólo que tiene un tercer hilo que se encarga del movimiento del robot. En este nuevo hilo, se ha predefinido la trayectoria del robot.

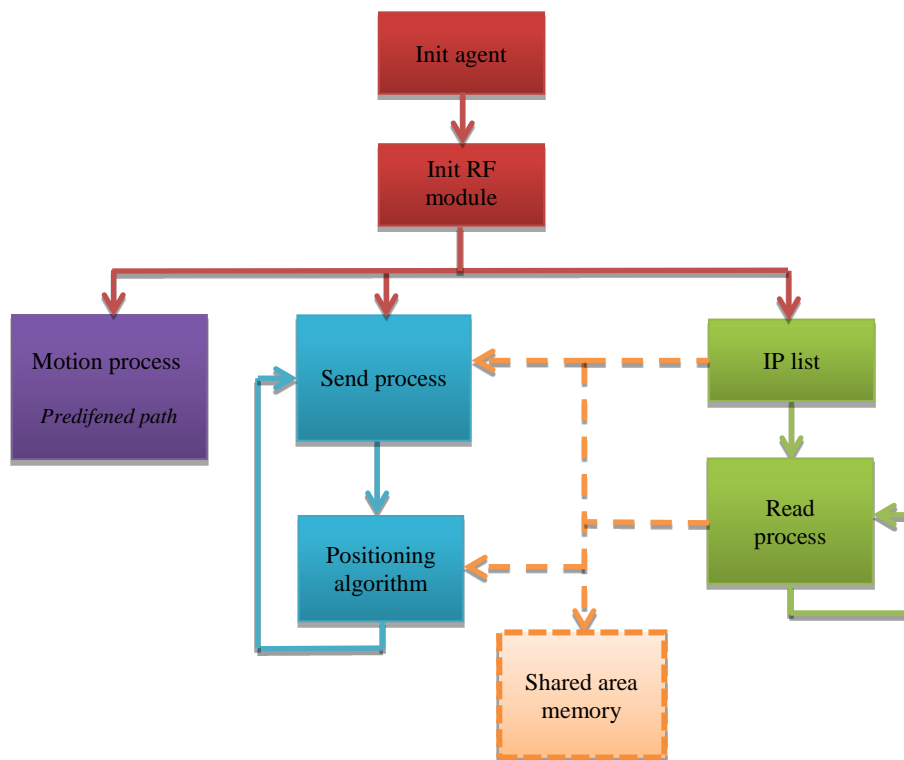


Figura 4-33: Diagrama de flujo del programa de posicionamiento del nodo móvil

5 Integración, pruebas y resultados

5.1 Introducción

En esta sección se exponen las pruebas realizadas con el sistema completo y los resultados obtenidos.

Las primeras pruebas se han realizado únicamente con cinco nodos fijos en diferentes entornos para comprobar el buen funcionamiento del algoritmo. Las dos últimas pruebas se han realizado con el sistema completo: cuatro nodos fijos y el robot móvil describiendo una trayectoria conocida.

Los nodos fijos se han conectado vía USB a uno o dos ordenadores portátiles para su fácil manejo. El programa de posicionamiento se ha compilado en todos los casos en modo MATLAB y se ha volcado la información en archivos usando la siguiente instrucción:

```
./agente file.conf > salida.dat
```

donde *salida.dat* contiene las trazas que el programa *agente* mostraría por pantalla.

Para la realización de las pruebas ha sido necesario el desarrollo de una serie de programas en Matlab para tratar la información obtenida en los archivos de salida (*salida.dat*), con el objetivo de calcular el error en el posicionamiento y representar gráficamente las posiciones de cada uno de los nodos que intervienen en el sistema. Estos archivos pueden ser usados al mismo tiempo que el sistema está funcionando con la ventaja de poder ver en tiempo real el estado del sistema. Los resultados que se muestran a continuación, tanto errores como gráficas, han sido extraídos de estos programas realizados en Matlab.

Ya que el programa de posicionamiento realiza un posicionamiento relativo de los agentes usando un sistema de coordenadas dinámico que varía con el tiempo, el programa Matlab se encarga de cambiar el sistema de coordenadas a uno fijo siguiendo unas reglas estipuladas con el objetivo de homogeneizar la representación de los agentes en el espacio cualquiera que sea el sistema de coordenadas usado. Para realizar dicha homogenización, primero se define el punto (un agente en concreto) que se situará en el origen de coordenadas y se hará una traslación de cada una de las coordenadas de los agentes para conseguirlo. Habitualmente el origen de coordenadas será el agente cuya IP es 137.005. Luego se define que agente se situará sobre el eje de las abscisas (eje x) y se realizará una rotación de los ejes de las posiciones de cada uno de los agentes para conseguirlo. Habitualmente este agente será el 137.007. Finalmente, se elige un agente que siempre estará por encima del eje de abscisas. Este agente habitualmente será el 137.009. Una vez realizada esta normalización, se obtendrán las posiciones de todos los agentes del sistema en el mismo sistema de coordenadas independientemente del sistema de coordenadas que usen inicialmente.

Previamente a la realización de las pruebas finales, se han realizado unas pequeñas pruebas de calibración del programa de posicionamiento ajustando los parámetros de éste

para obtener el mejor comportamiento posible. Los parámetros elegidos para la realización de las pruebas son los siguientes:

Parámetro	Nodo fijo	Nodo móvil
<i>TypeAgent</i>	Pasivo	Activo
<i>IntensityIntegrationFactor</i>	0.9	0.5
<i>AdmissibleError</i>	10 cm	15 cm
<i>SendRate</i>	10%	20%
<i>TensionRate</i>	0.25	0.3
<i>RelaxRate</i>	0.05	0.05
<i>TensRel</i>	0.3	0.3
<i>RelTens</i>	0.7	0.7

Tabla 5-1: Parámetros elegidos del programa de posicionamiento

El programa de posicionamiento necesita de cierto tiempo para poder posicionar correctamente a todos los agentes del sistema ya que el envío de mensajes con la información propia se hace aleatoriamente a cada uno de los agentes. El algoritmo de posicionamiento necesita también cierto tiempo para que los agentes entren en estado de relax y así poder asegurar que sus posiciones son lo más coherentes posible de acuerdo a las potencias recibidas y la información recibida de cada uno de los agentes. Por este motivo, las capturas de pantalla con la posición de cada uno de los agentes se han realizado tras la estabilización de los mismo (estado de relax) transcurrido cierto tiempo. En todas las capturas de pantalla se representa con círculos la posición real del agente y con asteriscos la posición calculada.

5.2 Pruebas con cinco nodos fijos

- **HCTLab**

Estas primeras pruebas han sido realizadas dentro del laboratorio HCTLab, exactamente en el espacio existente entre las mesas del laboratorio, un entorno muy impredecible y con muchos errores debido a los obstáculos (mesas, sillas...) situados a una distancia relativamente cercana. Se han usado únicamente nodos fijos, cinco en total, para probar el buen funcionamiento del programa de posicionamiento.

Previamente a la realización de las pruebas, es necesario encontrar la relación entre RSSI y distancia más precisa en este entorno. Para ello, se han tomado las siguientes medidas:

Distancia	Potencia recibida (dBm)
0,2	-34
0,4	-48
0,6	-49
0,8	-49
1	-47
1,2	-53
1,4	-51
1,6	-52

1,8	-54
2	-54,471281
2,2	-54,471281
2,4	-55
2,6	-58
2,8	-58
3	-60
3,2	-57
3,4	-55
3,6	-66
3,8	-59

Tabla 5-2: Relación RSSI-distancia HCTLab

Como se puede observar, en estos cuatro metros, las potencias recibidas varían mucho, observando, por ejemplo, -53 dBm a 1.2 metros y -55 dBm a 3.4 metros, por lo que se prevé un comportamiento del sistema no muy bueno. Usando las medidas de la Tabla 5-2, se ha obtenido la relación RSSI-distancia usando un modelo de doble pendiente:

$$P_{rx}[dBm] = \begin{cases} -54.034 - 25.525 \cdot \log_{10}(d) & P_{rx} \leq 45 \\ -48.409 - 20.650 \cdot \log_{10}(d) & P_{rx} > 45 \end{cases}$$

La siguiente fotografía muestra la posición física real de los módulos en la primera prueba realizada. Cada baldosa del suelo tiene unas dimensiones de 40x40 cm.

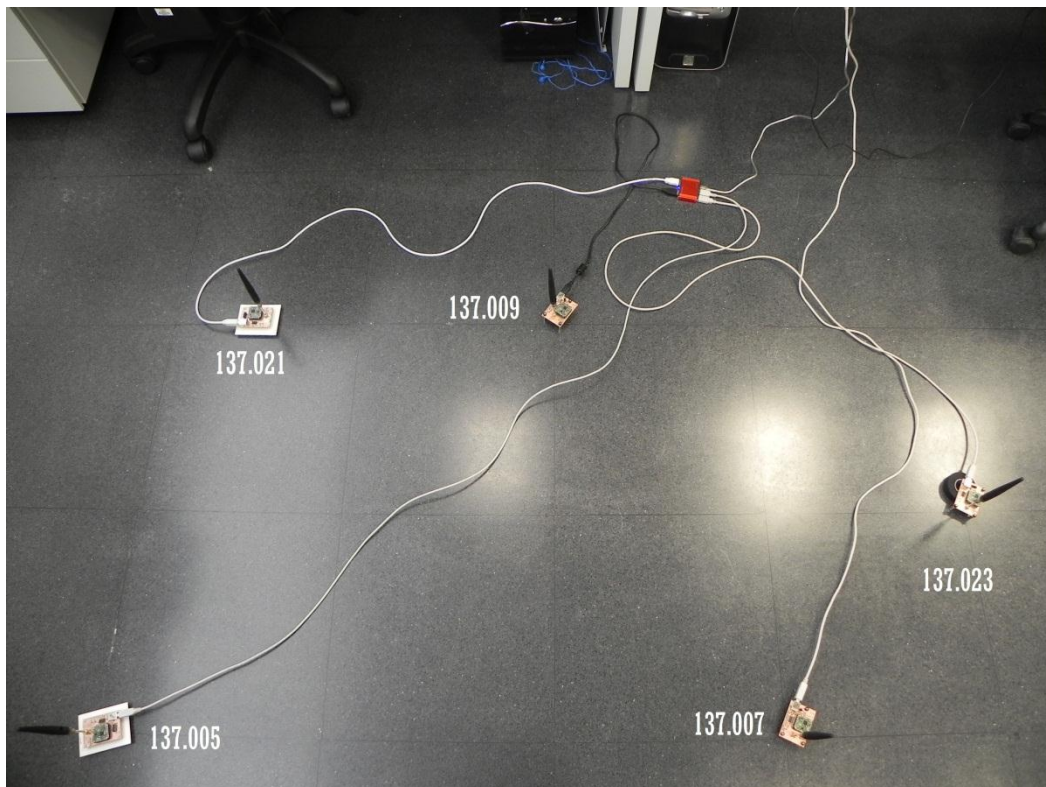


Figura 5-1: Prueba final 1 HCTLab

Seguidamente, se ejecuta el programa de posicionamiento en los cinco nodos fijos y se deja funcionando cierto tiempo hasta que se advierte que todos ellos han entrado en relax y se ha conseguido la mejor aproximación posible. La siguiente gráfica y tabla muestran los mejores resultados obtenidos, donde, en la gráfica, los círculos representan la posición real de cada uno de los nodos y el asterisco muestra la posición calculada.

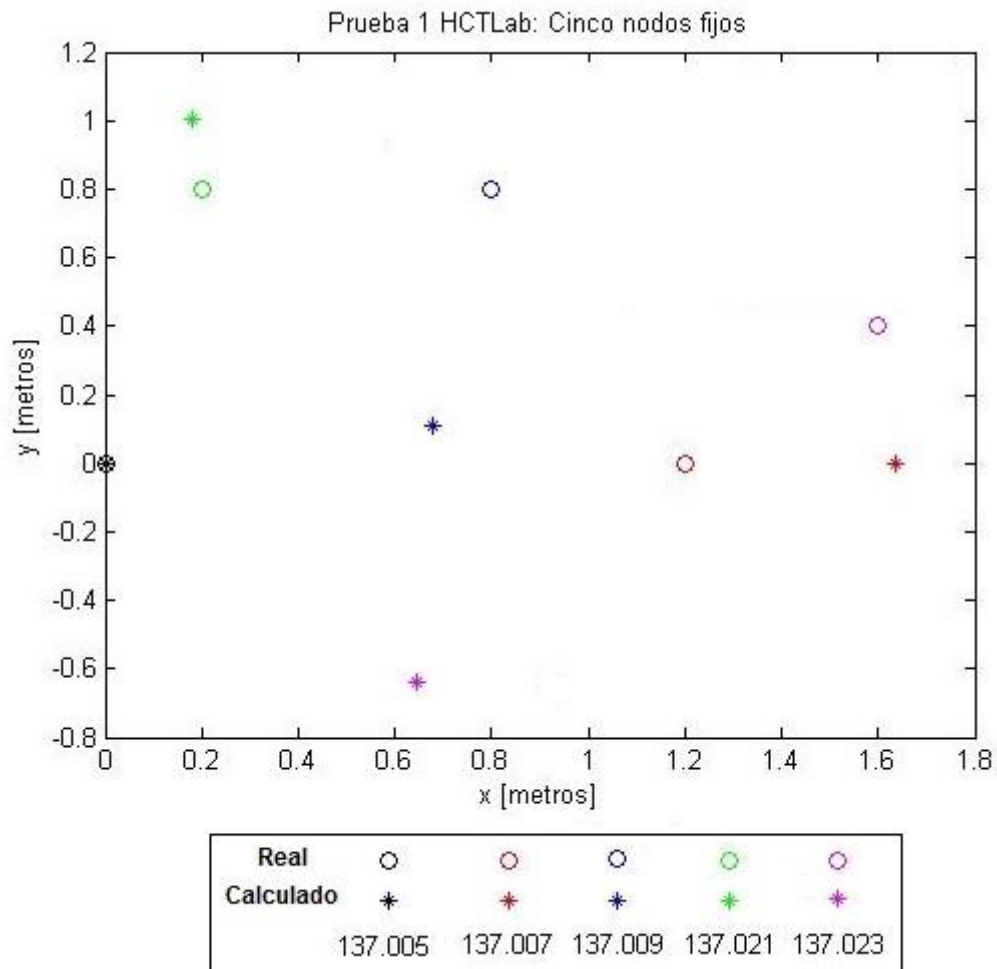


Figura 5-2: Resultados prueba 1 HCTLab

Nodo [IP]	Posición real [metros]		Posición calculada [metros]		Error [metros]
	x	y	x	y	
137.007	1,2	0	1,63	0	0,43
137.023	1,6	0,4	0,65	-0,65	1,41
137.009	0,8	0,8	0,68	0,1	0,7
137.005	0	0	0	0	0
137.021	0,2	0,8	0,18	1	0,2

Tabla 5-3: Resultados prueba 1 HCTLab

Los resultados obtenidos en este primer caso no son muy favorables. La posición calculada del nodo 137.005 siempre será exacta y el error siempre será 0 ya que es el nodo elegido como referencia y el situado en el origen de coordenadas. El error global obtenido es de 68 cm (este error ha sido calculado sin ponderar el error de 0 metros del módulo referencia 137.005 y se hará así en el resto de casos), un error muy elevado teniendo en cuenta el entorno elegido en el que los módulos están en un espacio de aproximadamente 1 metro cuadrado.

La siguiente prueba se ha realizado en el mismo entorno, en el espacio entre las mesas del HCTLab pero variando la posición de los nodos con el objetivo de averiguar si el error en el posicionamiento sigue siendo elevado. Se ha utilizado la misma relación entre RSSI y distancia que en el caso anterior. La siguiente fotografía muestra la colocación real de los módulos en el espacio.

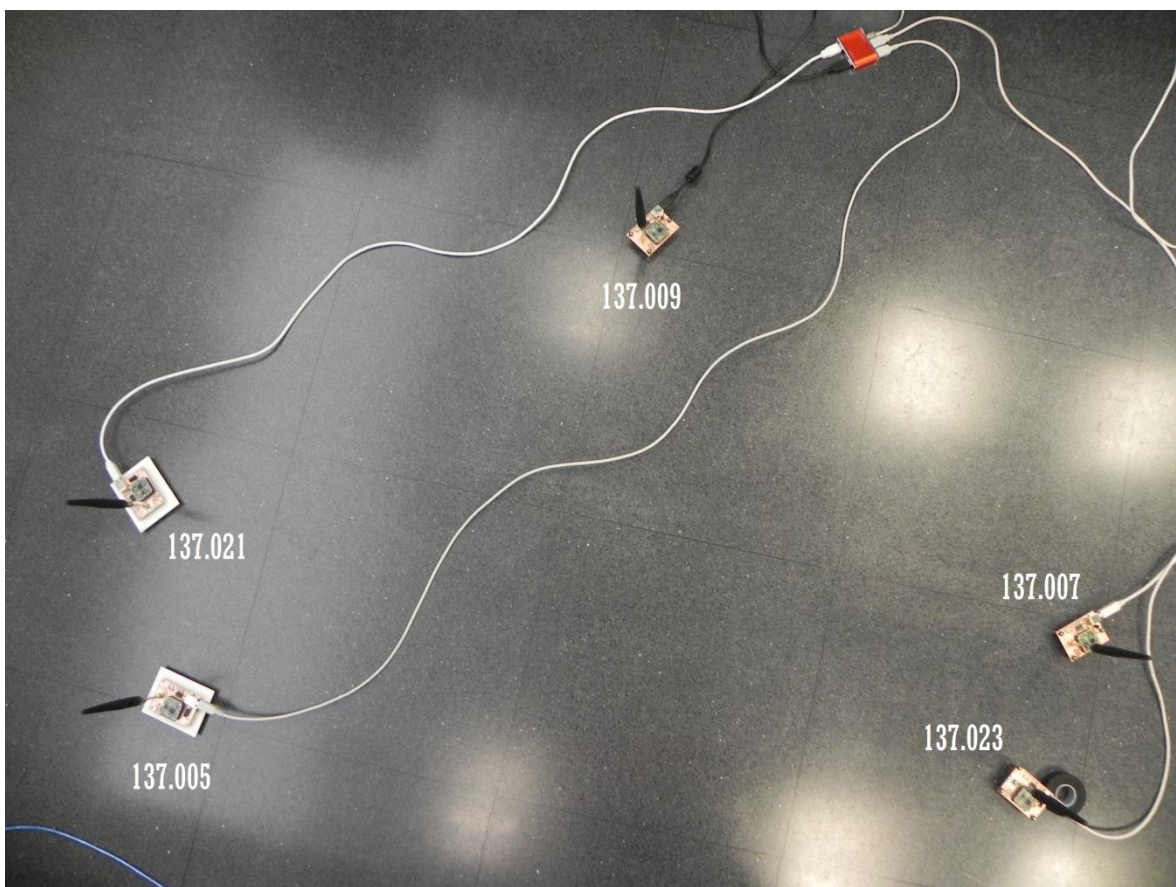


Figura 5-3: Prueba final 2 HCTLab

La siguiente gráfica y tabla muestran los resultados de esta segunda prueba. Se puede comprobar como el resultado obtenido en este caso es bastante mejor que en el caso anterior. El error total del posicionamiento de los agentes es de 27 cm, menos de la mitad del error del caso anterior habiéndose realizado las pruebas en el mismo entorno. Aun así, el error obtenido en este caso es elevado según el tipo de aplicación que se le quiera dar al sistema.

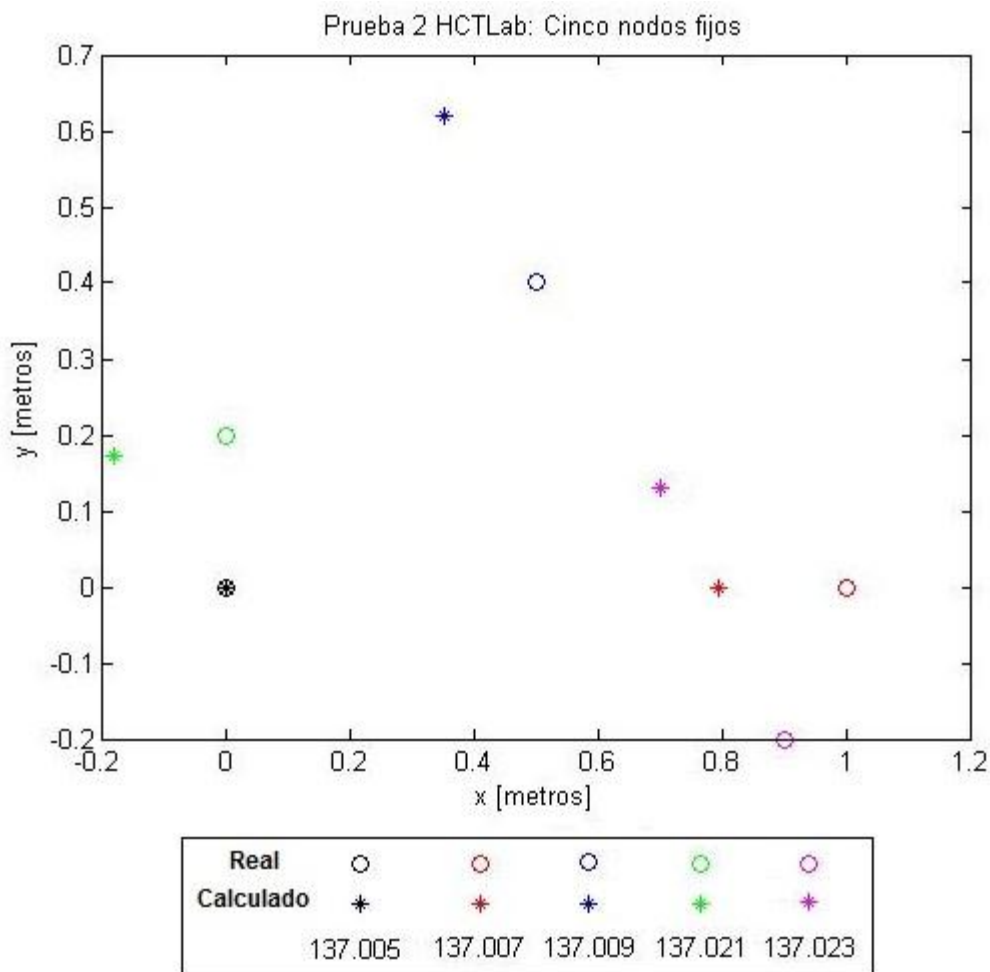


Figura 5-4: Resultados prueba 2 HCTLab

Nodo [IP]	Posición real [metros]		Posición calculada [metros]		Error [metros]
	x	y	x	y	
137.007	1,0	0	0,79	0	0,21
137.023	0,9	-0,2	0,7	0,13	0,38
137.009	0,5	0,4	0,35	0,62	0,29
137.005	0	0	0	0	0
137.021	0	0,2	-0,18	0,17	0,18

Tabla 5-4: Resultados prueba 2 HCTLab

Analizando los resultados de estas dos primeras pruebas se han extraído las siguientes conclusiones. En entornos con mucho error, muy caóticos y muy poco determinísticos el sistema no funciona correctamente en todos los casos ya que la potencia recibida varía mucho según la posición del módulo en el entorno y no sigue una relación lineal debido al multitrayecto y la reflexión que sufre la señal de radiofrecuencia. Si, por ejemplo, uno de los nodos fijos se sitúa por casualidad en una posición en la que desafortunadamente la señal de radiofrecuencia sufre una gran variación debido por

ejemplo al efecto de una pata metálica de una mesa situada junto al módulo, éste nunca podrá ser posicionado correctamente ya que siempre recibirá y mandará una potencia cuya distancia calculada con la relación RSSI-distancia pertinente no se corresponde con la distancia real. Ya que el nodo está siempre fijo, siempre se encontrará en la misma posición emitiendo su señal y recibiendo las del resto con el mismo error. Si todos los nodos del sistema fueran móviles, los errores en el posicionamiento se podrían corregir al cambiar de posición el nodo y se obtendrían mejores resultados.

5.3 Pruebas con cuatro nodos fijos y un nodo móvil

A continuación, se exponen las últimas dos pruebas realizadas en las que actúa el sistema al completo: cuatro nodos fijos y un nodo móvil.

Al robot móvil se le carga en IGEPv2 el programa de posicionamiento con la trayectoria predefinida que vaya a describir y se configura el sistema operativo (Linux) de IGEPv2 para que al arrancar ejecute inmediatamente dicho programa. Esto permite encender el robot de manera autónoma con una batería y que empiece a ejecutar el programa de posicionamiento inmediatamente. El programa que se ejecuta, al igual que en el caso de los nodos móviles, ha sido compilado en modo MATLAB y guarda las trazas del programa en un archivo (*salida.dat*) que posteriormente se extraen de IGEPv2 y se analizan junto con las trazas del resto de nodos fijos.

El sistema necesita de cierto tiempo antes de que cada agente entre en relax y por consiguiente, se obtengan los mejores resultados, condicionando el movimiento del nodo móvil. Es decir, para conseguir un posicionamiento óptimo, en la trayectoria del robot móvil ha de haber ciertos periodos de tiempo en los que el robot esté en posición estática para permitir que el sistema encuentre la posición de cada uno de los agentes. Por lo tanto, el posicionamiento en estas pruebas será un posicionamiento estático, en el que se encuentra la posición de los nodos fijos y el robot móvil en determinados instantes de tiempo. En el tiempo que transcurre entre cada uno de los instantes de posicionamiento, el robot móvil se desplaza de una posición a la siguiente para calcular la nueva posición.

En estas dos pruebas se utilizará la relación RSSI-distancia obtenida en espacio libre:

$$P_{rx}[dBm] = \begin{cases} -48.494 - 24.892 \cdot \log_{10}(d) & d \leq 1 \\ -43.904 - 30.487 \cdot \log_{10}(d) & d > 1 \end{cases}$$

, ya que los escenarios escogidos para realizar las pruebas (pasillo central planta baja edificio C EPS y explanada despejada del recinto ferial de Alcobendas), son entornos, a priori, con pocos errores, y se intentará comprobar si en este tipo de entornos el sistema de posicionamiento es reproducible usando el mismo modelo de propagación.

En estas pruebas, como el robot móvil tiene situada la antena a cierta altura del suelo (≈ 11.5 cm), se ha elevado la altura de los nodos fijos la misma distancia que el nodo móvil colocándoles unas patas metálicas. Esto se hace, ya que las antenas emiten y reciben con la misma potencia cuando las señales de RF proceden del plano horizontal (Figura 3-13) y es necesario que todos los módulos tengan la misma altura para conseguir un mejor posicionamiento. Además, si las antenas tuvieran diferentes alturas, la distancia de

recorrería la señal de radiofrecuencia sería mayor que si viajara únicamente en el plano horizontal, lo que introduciría pérdidas en la señal causadas por la propagación y la distancia estimada sería diferente de la real, teniendo en cuenta que el posicionamiento que se está realizando es en 2-dimensiones (4.2). Esta elevación de las antenas de todos los nodos del sistema mejora también, a priori, el comportamiento de la señal de radiofrecuencia ya que se reduce el efecto de la señal de RF que rebota en el suelo, al estar más lejano éste de las antenas, y por tanto se reduce el efecto del multitrayecto.

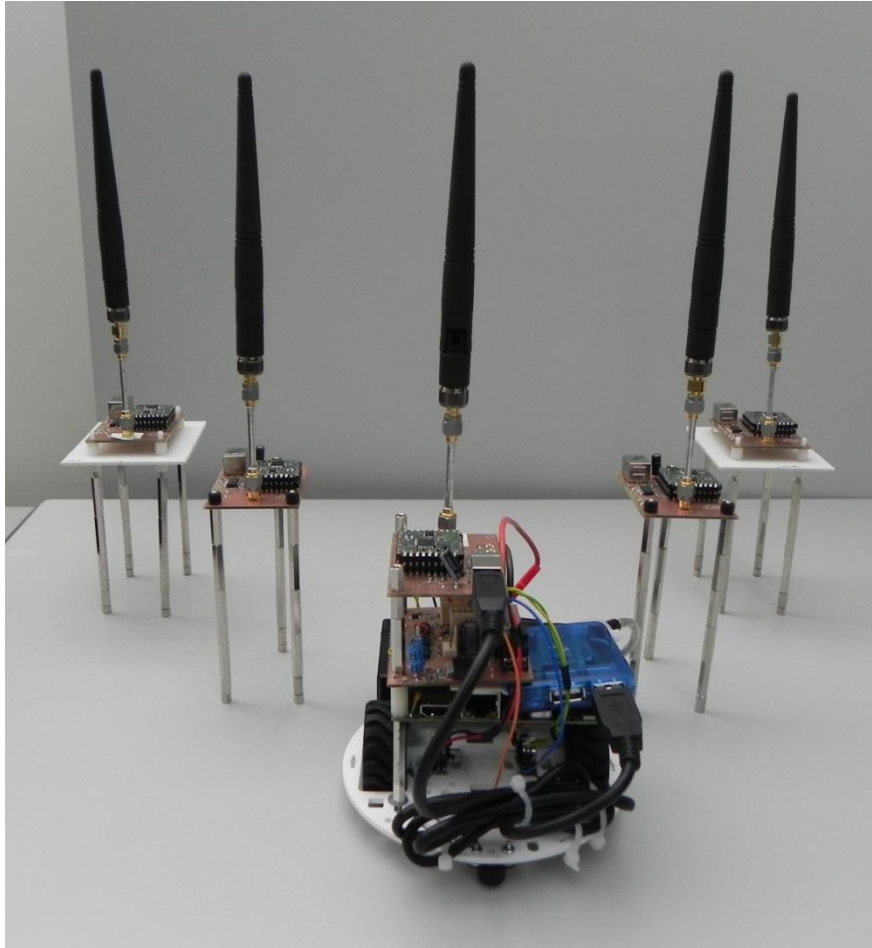


Figura 5-5: Elevación antenas nodos

- **Pasillo central planta baja edificio C EPS**

Esta prueba se ha realizado en el pasillo central de la planta baja del edificio C de la EPS, un entorno interior pero con bastante amplitud.

La Figura 5-6 muestra la posición de los nodos fijos y la trayectoria que ha seguido el nodo móvil. Además, se ha marcado las diferentes posiciones estáticas en las que el robot permanece parada para permitir el correcto posicionamiento. La IP del robot móvil es la 137.023.

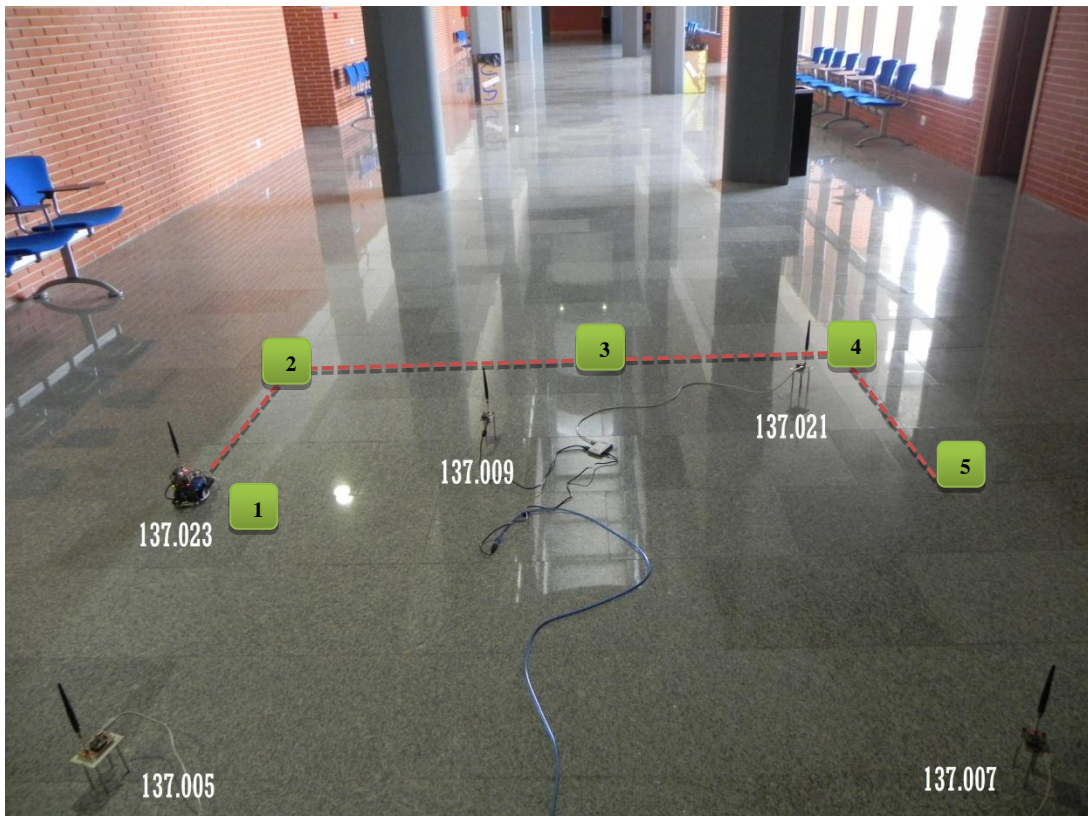


Figura 5-6: Prueba final 1: posición nodos y trayectoria nodo móvil

La siguiente gráfica y tabla muestran los resultados del posicionamiento del sistema en la situación marcada como 1 en la fotografía anterior. Los resultados provienen del instante de tiempo en el que los nodos del sistema están en estado de relax y se ha encontrado una posición para cada uno de ellos lo más aceptable posible. En este caso, la gráfica recoge los resultados de cada uno de los nodos para el mismo instante de tiempo. Se puede observar como el posicionamiento en todos ellos es muy similar ya que han entrado en estado de relax. La tabla muestra los datos del posicionamiento realizado por el nodo 137.005 que, en este caso, es el más acertado. En este caso el error absoluto de todos los nodos, exceptuando el nodo origen 137.005, es de unos 34.5 cm.

Nodo [IP]	Posición real [metros]		Posición calculada [metros]		Error [metros]
	x	y	x	y	
137.005	0	0	0	0	0
137.021	2,1	2	1,95	1,96	0,15
137.007	2,1	0	2,03	0	0,06
137.009	0,75	1,6	1,07	0,99	0,69
137.023	-0,3	1,2	0,1	0,95	0,47

Tabla 5-5: Prueba edificio C EPS. Posición 1

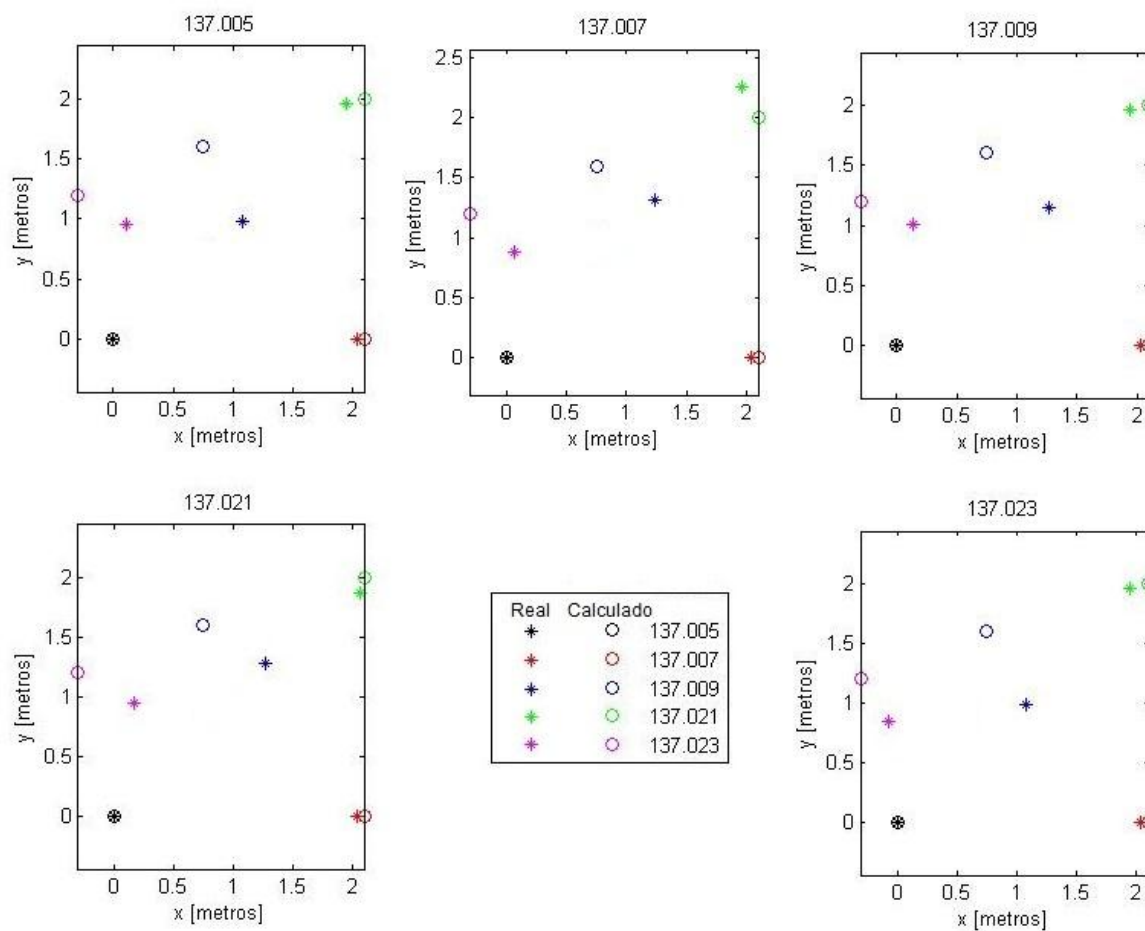


Figura 5-7: Prueba edificio C EPS. Posición 1

La siguiente gráfica y tabla muestran los resultados del posicionamiento en la posición 2 del sistema tras avanzar el nodo móvil 1.2 metros. Los datos de la tabla proceden de los datos extraídos del nodo móvil 137.023. En este segundo caso el error de posicionamiento es de aproximadamente 56 cm, algo más que en el caso anterior.

Nodo [IP]	Posición real [metros]		Posición calculada [metros]		Error [metros]
	x	y	x	y	
137.023	-0,3	2,4	0	1,56	0,89
137.005	0	0	0	0	0
137.021	2,1	2	1,94	1,76	0,28
137.007	2,1	0	2,4	0	0,3
137.009	0,75	1,6	0,	1,18	0,77

Tabla 5-6: Prueba edificio C EPS. Posición 2

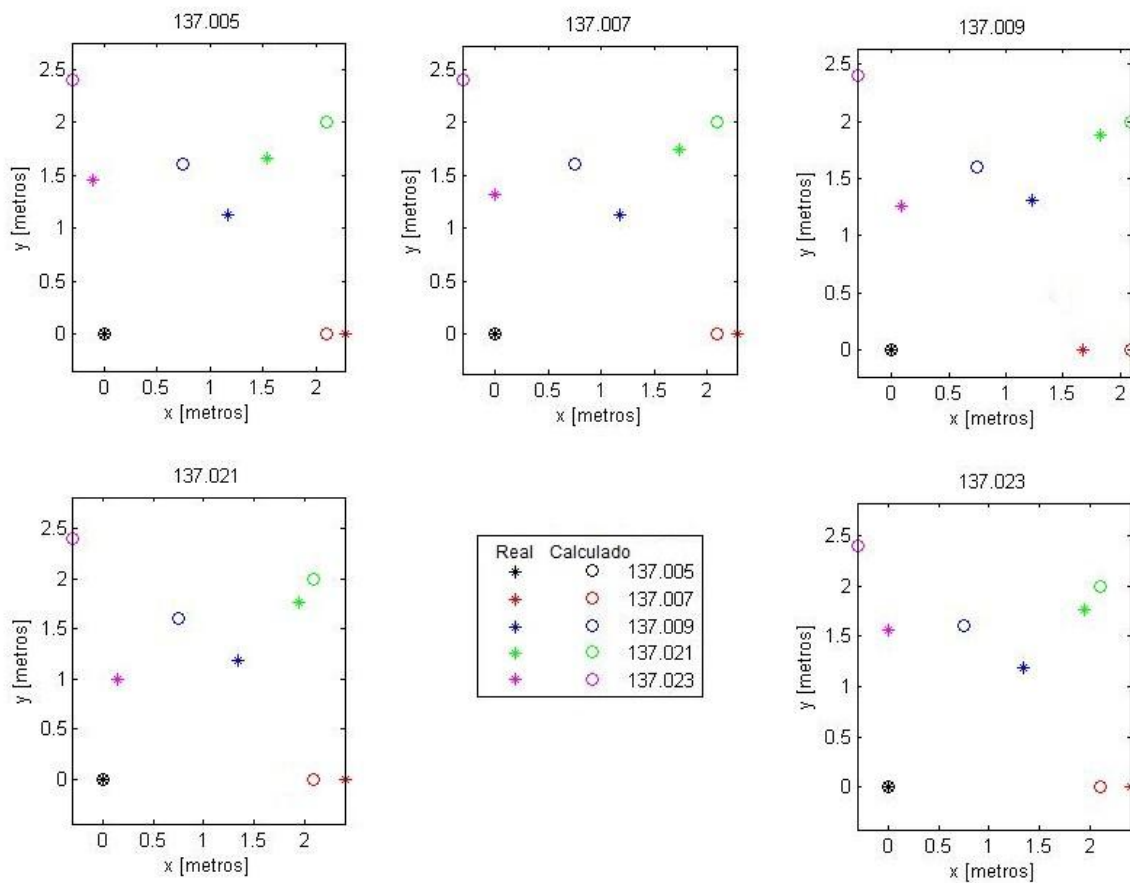


Figura 5-8: Prueba edificio C EPS. Posición 2

A continuación, se muestran la gráfica y tabla del posicionamiento realizado en las posición 3. Los datos de la tabla provienen del nodo fijo 137.009 que es el que mejor aproximación hace. El error absoluto en este caso es de unos 50 cm.

Nodo [IP]	Posición real [metros]		Posición calculada [metros]		Error [metros]
	x	y	x	y	
137.009	0,75	1,6	0,66	1,3	0,31
137.005	0	0	0	0	0
137.021	2,1	2	2,1	1,75	0,24
137.007	2,1	0	1,3	0	0,77
137.023	1,2	2,4	1,16	1,74	0,66

Tabla 5-7: Edificio C EPS. Posición 3

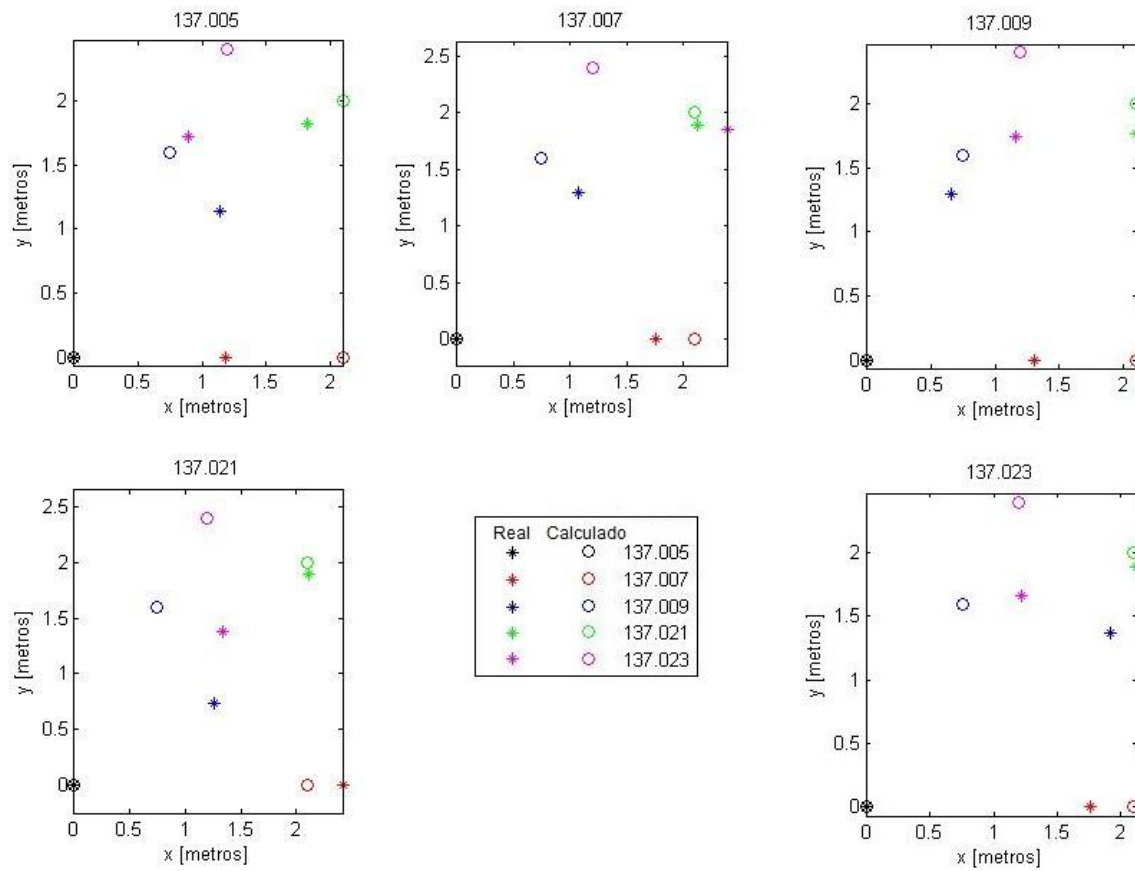


Figura 5-9: Prueba edificio C EPS. Posición 3

Los siguientes resultados corresponden al posicionamiento en la posición número 4. Los datos de la tabla corresponden con los del nodo 137.005. En este caso, el error medio total es de unos 40 cm.

Nodo [IP]	Posición real [metros]		Posición calculada [metros]		Error [metros]
	x	y	x	y	
137.005	0	0	0	0	0
137.021	2,1	2,	2,12	1,89	0,11
137.007	2,1	0	1,76	0	0,34
137.009	0,75	1,6	0,66	1,23	0,38
137.023	2,4	2,4	1,98	1,71	0,81

Tabla 5-8: Prueba edificio C EPS. Posición 4

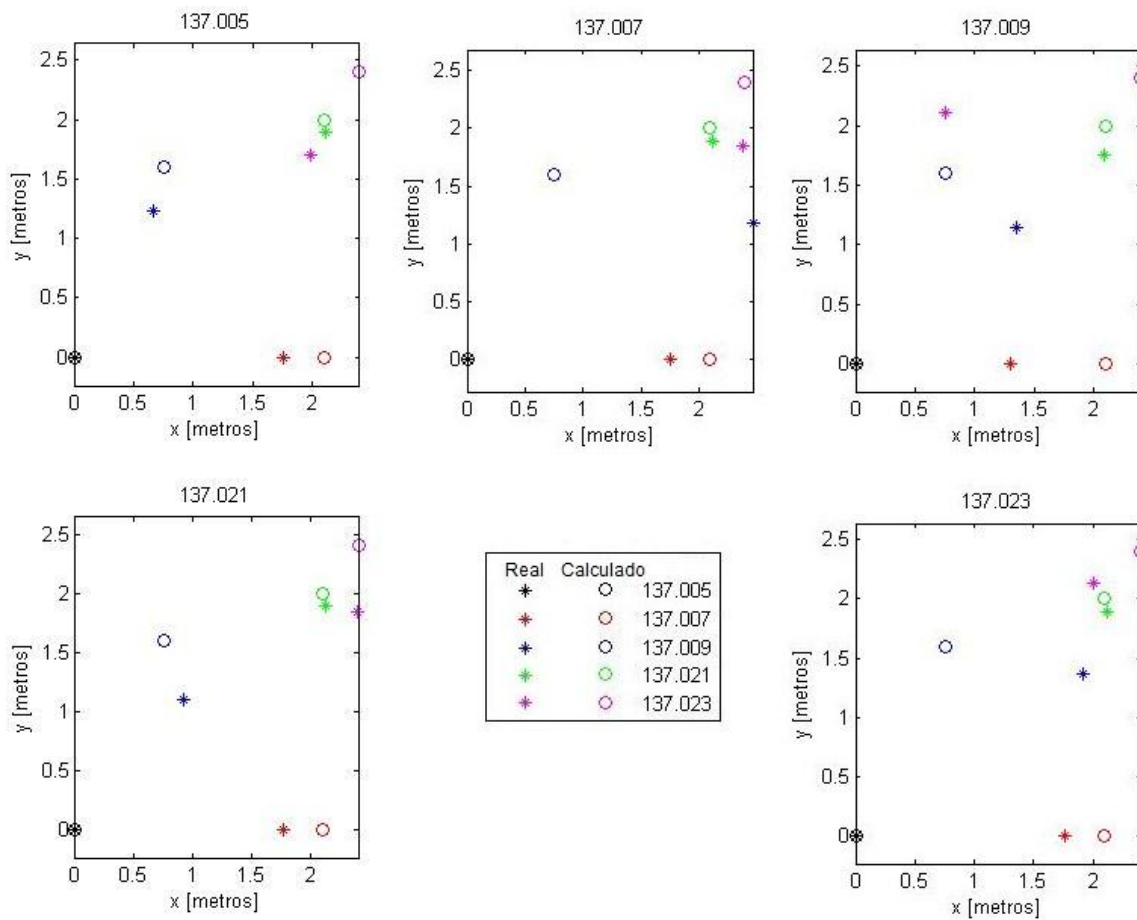


Figura 5-10: Prueba edificio C EPS. Posición 4

La última posición del trayecto del nodo móvil se representa en la siguiente figura. Por su parte, la siguiente tabla muestra los resultados de dicha situación donde los datos han sido extraídos del nodo móvil 137.023. El error global del posicionamiento en este caso es de 27 cm.

Nodo [IP]	Posición real [metros]		Posición calculada [metros]		Error [metros]
	x	y	x	y	x
137.023	2,4	1,2	2,08	1	0,3
137.005	0	0	0	0	0
137.021	2,1	2	1,9	1,65	0,4
137.007	2,1	0	2,19	0	0,1
137.009	0,75	1,6	1,75	1,89	1,3

Tabla 5-9: Prueba edificio C EPS. Posición final n° 5

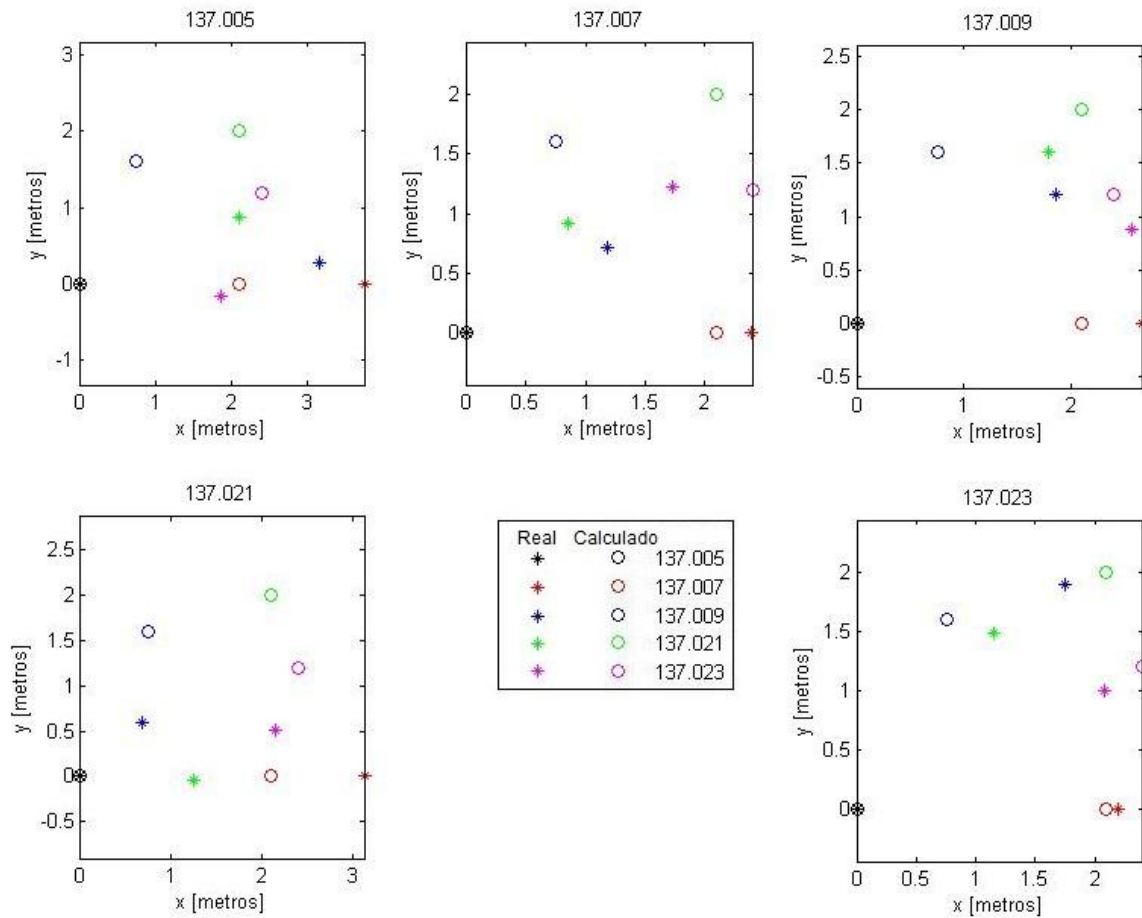


Figura 5-11: Pruebas edificio C EPS. Posición final n° 5

El error total en esta prueba ha sido de uno 41 cm. Teniendo en cuenta que en este caso los módulos estaban dispersos en un espacio de unos 4 metros cuadrados y si el sistema se quiere usar en aplicaciones en las que no se requiera de un precisión en el posicionamiento muy alta, el error que se obtiene es admisible.

- **Espacio abierto: explanada recinto ferial Alcobendas**

El último escenario escogido para la realización de las pruebas ha sido la explanada del recinto ferial de Alcobendas, el mismo escenario donde se realizaron las medidas para la obtención de la relación RSSI-distancia para espacio libre, la cuál se usará en esta prueba.

Esta prueba también se ha llevado a cabo con cuatro nodos fijos y el robot móvil en movimiento. La siguiente fotografía muestra el recorrido que describe el robot. Tal y como se ha comentado anteriormente, se expondrán los resultados para posiciones fijas del robot ya que el algoritmo precisa de cierto tiempo hasta posicionar de la manera más precisa posible todos los agentes del sistema.

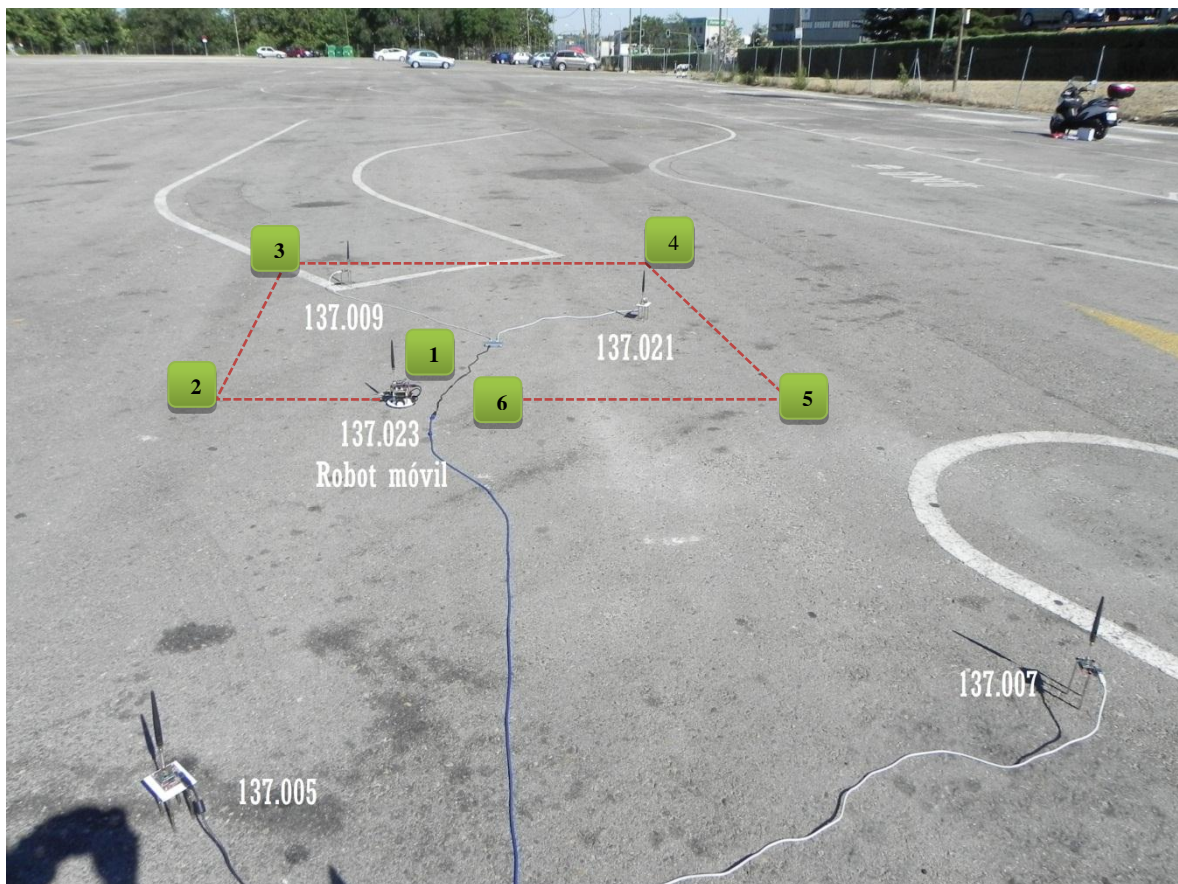


Figura 5-12: Posición nodos y recorrido robot. Espacio libre

La siguiente tabla y gráfica muestra el resultado del posicionamiento para la posición inicial. En este caso, el mejor posicionamiento lo ha dado el nodo 137.007 cuyos datos reflejan la tabla. El error que ha cometido dicho nodo es de 50 cm.

Nodo [IP]	Posición real [metros]		Posición calculada [metros]		Error [metros]
	x	y	x	y	
137.007	2,2	0	2,19	0	0,01
137.005	0	0	0	0	0
137.021	1,65	3,3	1,85	3,42	0,24
137.009	0	4,4	0,2	3,97	0,47
137.023	0,50	2,35	1,59	1,98	1,15

Tabla 5-10: Resultados espacio libre. Posición inicial

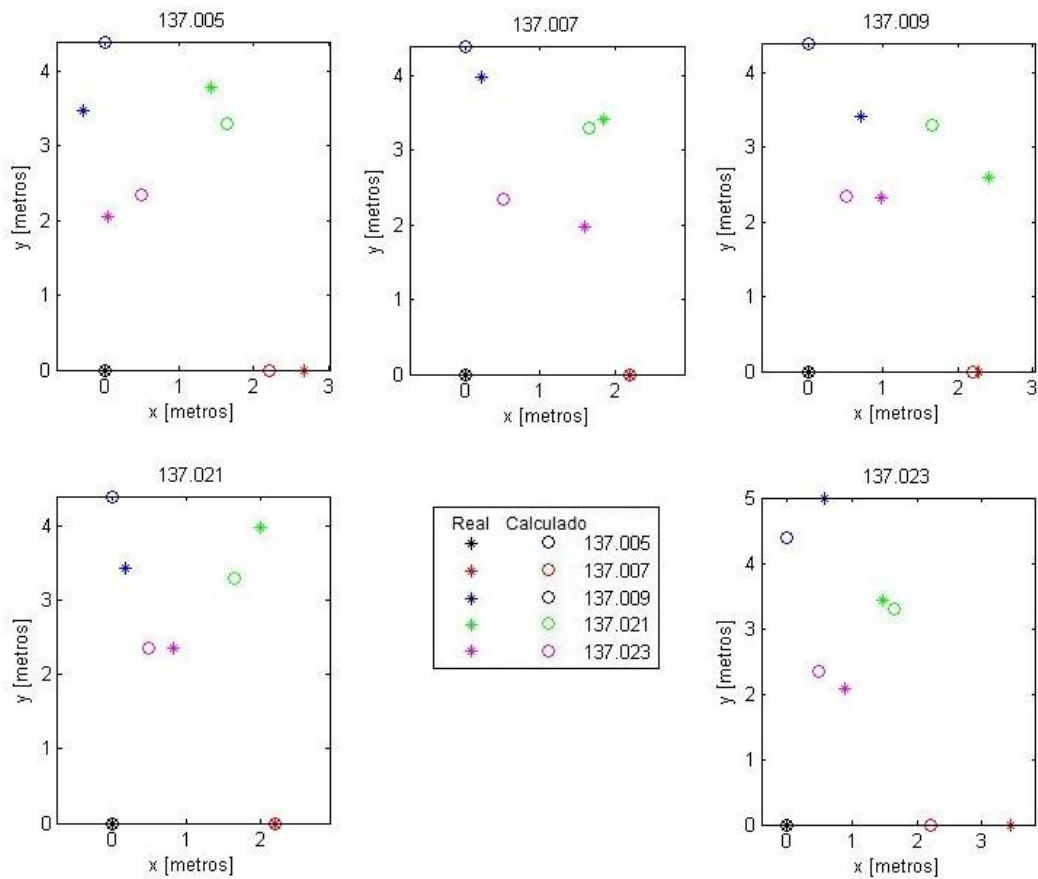


Figura 5-13: Resultados espacio libre. Posición inicial

La siguiente tabla y gráfica muestran los resultados del posicionamiento en la posición 2. En este caso, los datos de la tabla proceden del nodo 137.005 y tienen un error total de 64 cm.

Nodo [IP]	Posición real [metros]		Posición calculada [metros]		Error [metros]
	x	y	x	y	
137.005	0	0	0	0	0
137.021	1,65	3,3	1,91	4,01	0,76
137.007	2,2	0	2,66	0	0,46
137.009	0	4,4	-1,01	3,84	1,15
137.023	-0,5	2,35	-0,72	2,27	0,24

Tabla 5-11: Resultados espacio libre. Posición 2

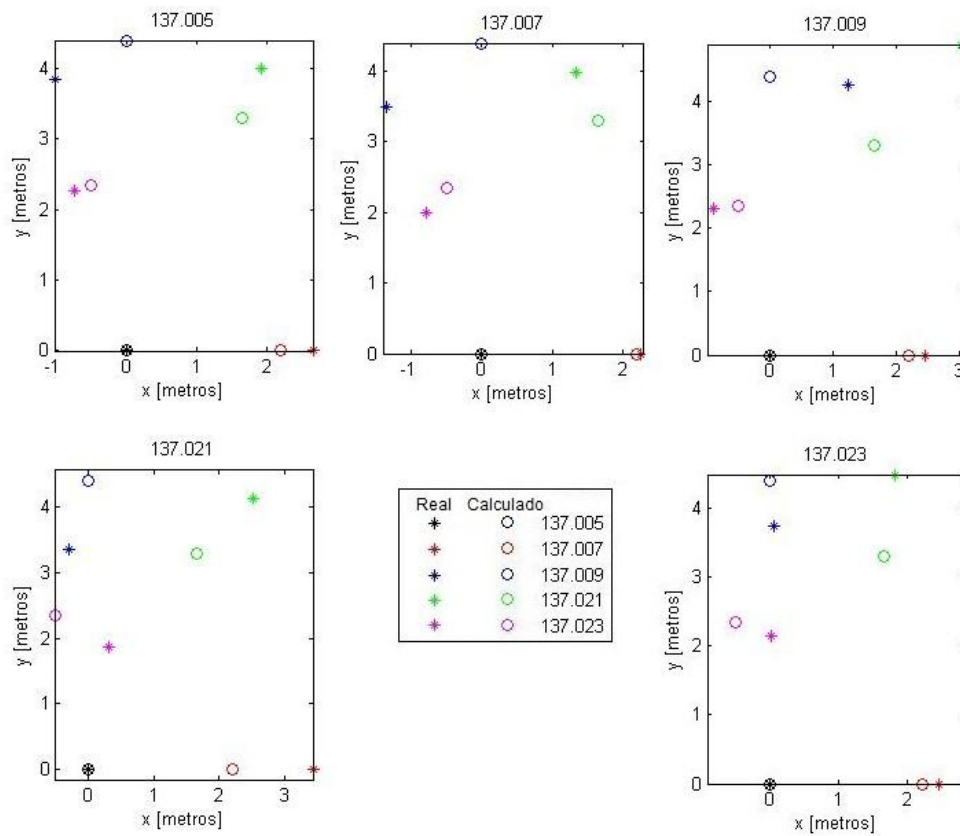


Figura 5-14: Resultados espacio libre. Posición 2

La siguiente tabla y gráfica muestran los resultados del posicionamiento en la posición 3. En este caso, los datos de la tabla proceden del nodo 137.005 y tienen un error total de 50 cm.

Nodo [IP]	Posición real [metros]		Posición calculada [metros]		Error [metros]
	x	y	x	y	
137.005	0	0	0	0	0
137.021	1,65	3,3	2,28	3,9	0,87
137.007	2,2	0	2,66	0	0,46
137.009	0	4,6	-0,02	4,3	0,3
137.023	-0,5	4,6	-0,17	4,34	0,42

Tabla 5-12: Resultados espacio libre. Posición 3

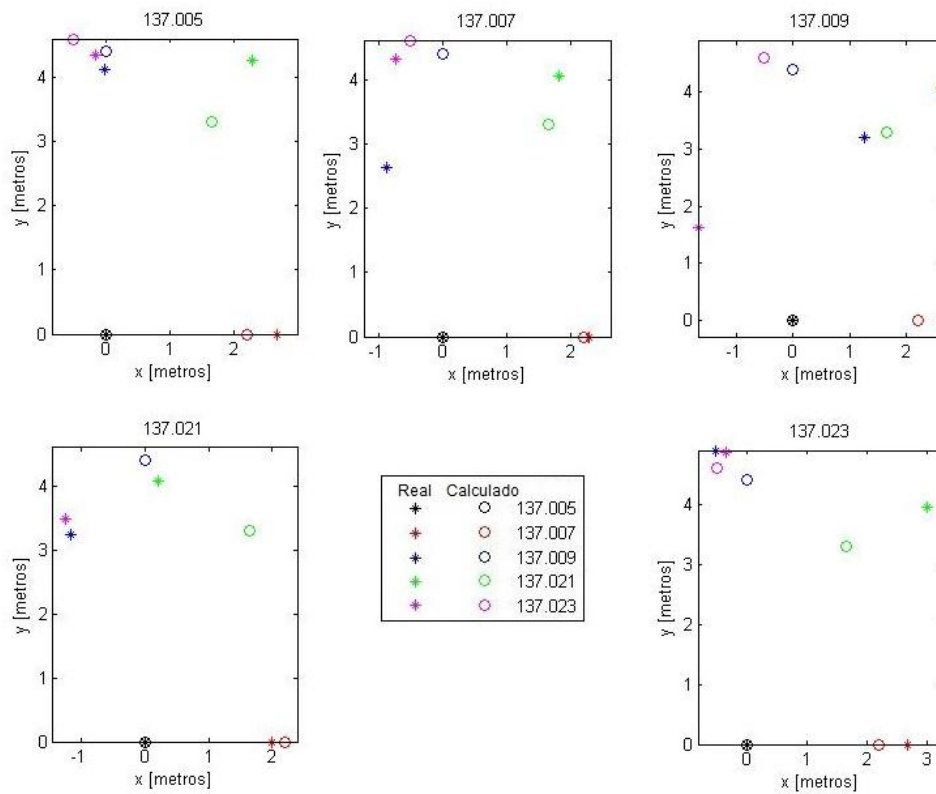


Figura 5-15: Resultados espacio libre. Posición 3

La siguiente tabla y gráfica muestran los resultados del posicionamiento en la posición 4. En este caso, los datos de la tabla proceden del nodo 137.005 y tienen un error total de 47 cm.

Nodo [IP]	Posición real [metros]		Posición calculada [metros]		Error [metros]
	x	y	x	y	
137.005	0	0	0	0	0
137.021	1,65	3,3	2,44	3,9	0,99
137.007	2,2	0	2,2	0	0
137.009	0	4,6	0,01	4,3	0,3
137.023	2,2	4,6	2,57	4,1	0,62

Tabla 5-13: Resultados espacio libre. Posición 4

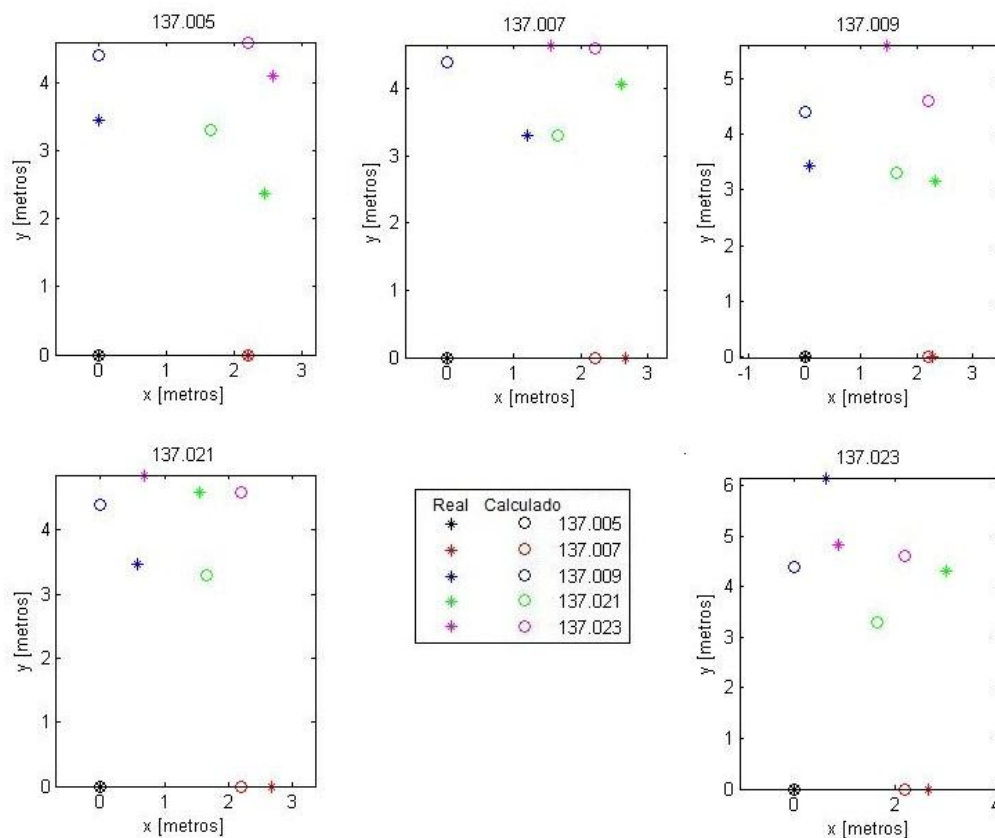


Figura 5-16: Resultados espacio libre. Posición 4

La siguiente tabla y gráfica muestran los resultados del posicionamiento en la posición 5. En este caso, los datos de la tabla proceden del nodo 137.005 y tienen un error total de 33 cm.

Nodo [IP]	Posición real [metros]		Posición calculada [metros]		Error [metros]
	x	y	x	y	
137.005	0	0	0	0	0
137.021	1,65	3,3	1,61	3,9	0,6
137.007	2,2	0	2,29	0	0,09
137.009	0	4,6	0,1	4,3	0,31
137.023	2,2	2,2	1,91	2,33	0,32

Tabla 5-14: Resultados espacio libre. Posición 5

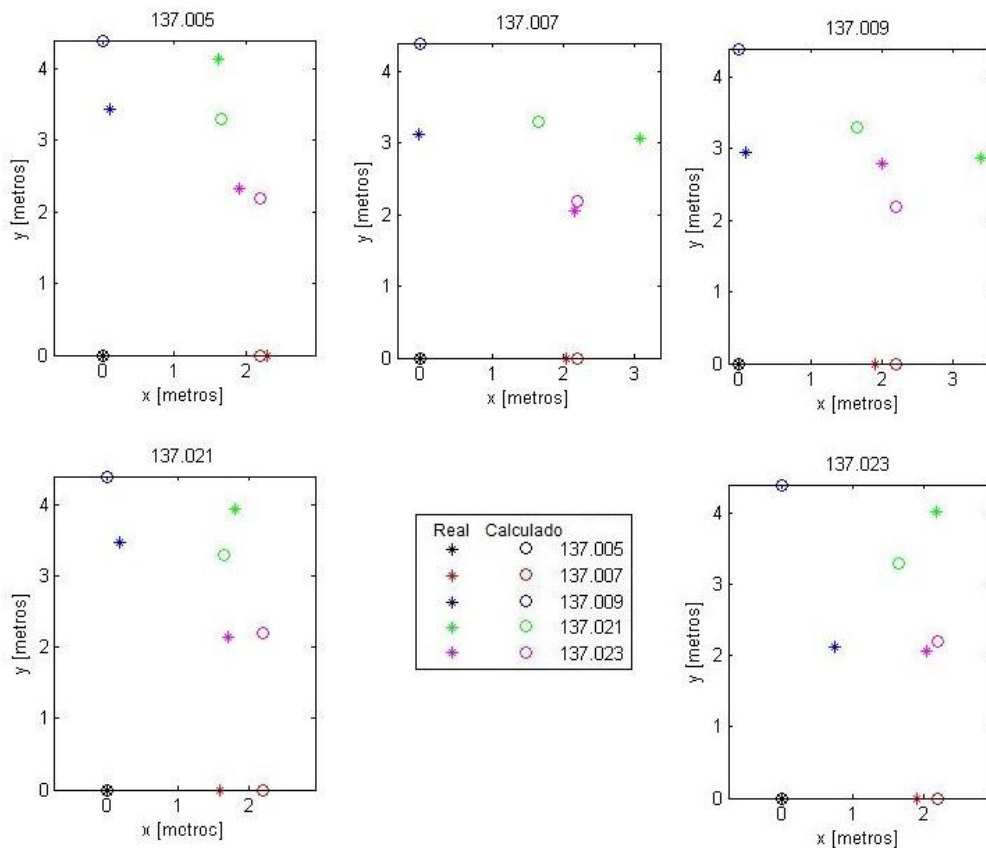


Figura 5-17: Resultados espacio libre. Posición 5

Por último, la siguiente tabla y gráfica muestran los resultados del posicionamiento en la posición 6, la posición final del nodo móvil. En este caso, los datos de la tabla proceden del nodo 137.005 y tienen un error total de 50 cm.

Nodo [IP]	Posición real [metros]		Posición calculada [metros]		Error [metros]
	x	y	x	y	
137.005	0	0	0	0	0
137.021	1,65	3,3	1,5	3,9	0,62
137.007	2,2	0	2,45	0	0,25
137.009	0	4,6	-0,5	4,3	0,58
137.023	1,1	2,2	0,61	1,83	0,61

Tabla 5-15: Resultados espacio libre. Posición 6

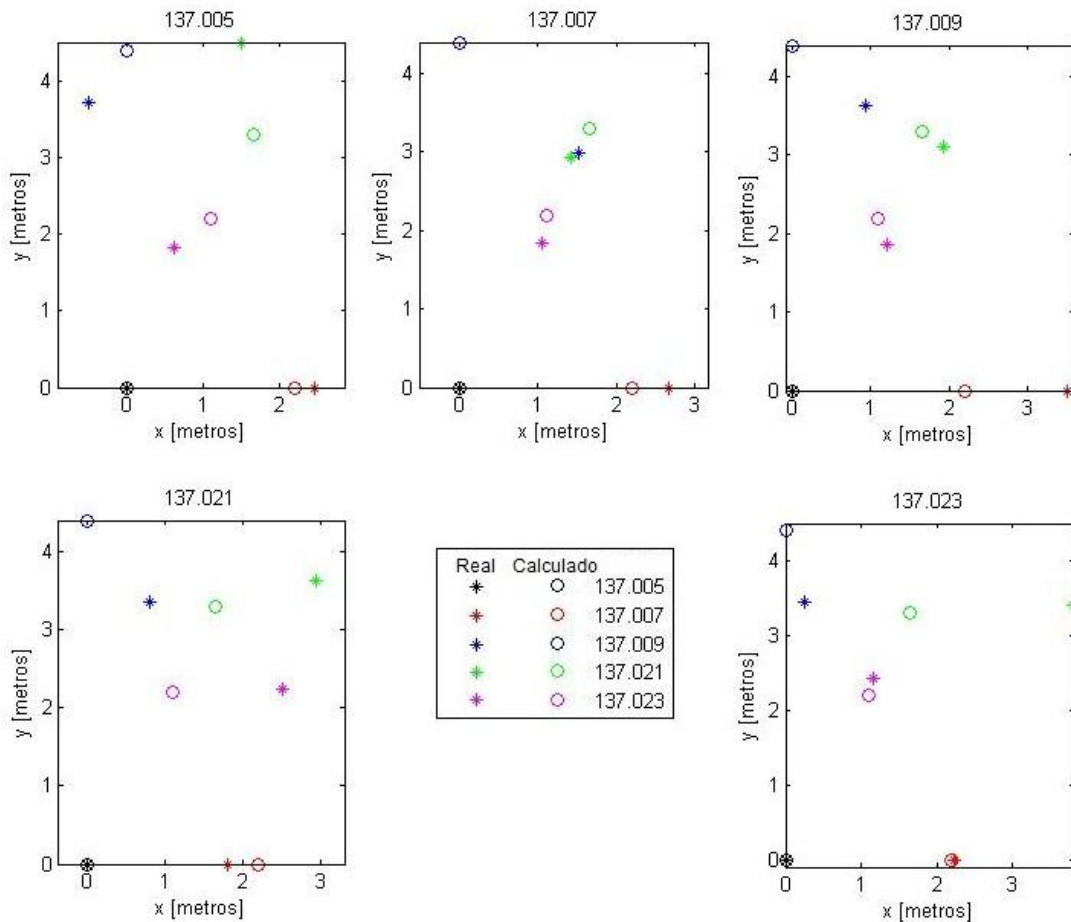


Figura 5-18: Resultados espacio libre. Posición 6

El error total en el posicionamiento que se ha obtenido en esta prueba es de 50 cm. Teniendo en cuenta que en este caso los agentes están repartidos en un área de unos 15 metros cuadrados, el error total obtenido es totalmente admisible.

La siguiente figura muestra un resumen con los mejores resultados obtenidos en el posicionamiento del nodo móvil. De los nodos fijos en esta imagen sólo se representa su posición real.

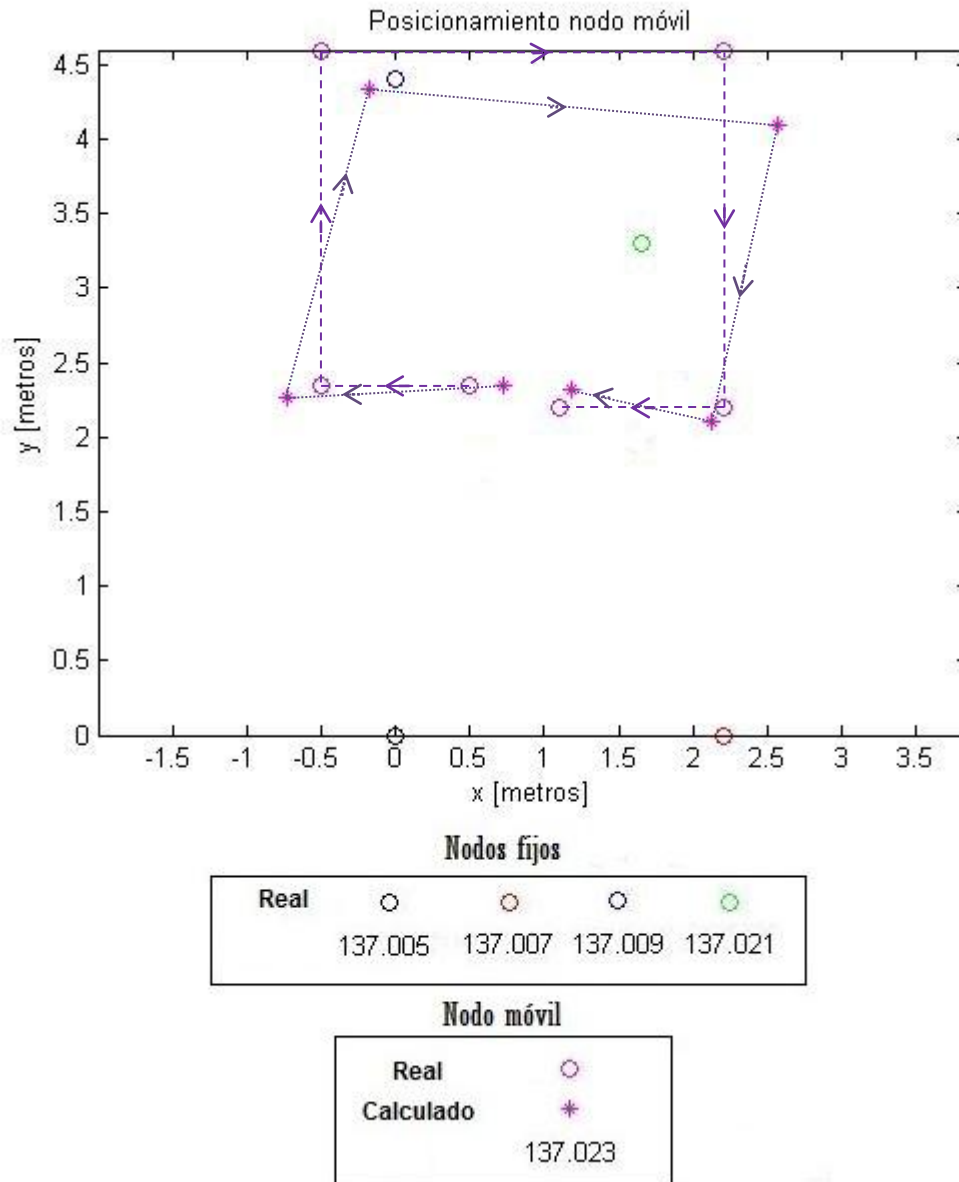


Figura 5-19: Resumen prueba espacio libre

6 Conclusiones y trabajo futuro

6.1 Conclusiones

En el presente proyecto se ha desarrollado una red inalámbrica de sensores con cuatro nodos fijos y un nodo móvil para el posicionamiento de los mismos por medio de la medida del nivel de la señal de radiofrecuencia y se han realizado varias pruebas para comprobar su funcionamiento.

En el análisis previo realizado del comportamiento de la señal de radiofrecuencia con los módulos de radiofrecuencia específicos que se han usado, se ha observado como el comportamiento de dicha señal es muy poco determinístico en su relación a la distancia, ya que según el entorno, la posición de los nodos en éste, la posición relativa entre los nodos emisor y receptor, se obtiene una potencia de señal recibida (RSSI) muy diferente en cada caso, provocando una gran dificultad en el cálculo de distancias y por lo tanto, del posicionamiento relativo de los nodos. Este comportamiento tan erróneo de la señal de RF viene motivado, por un lado, por las propiedades específicas de la señal como pueden ser el multitrayecto o la reflexión y, por otro lado, por los módulos de RF utilizados, los cuáles no han sido diseñados con el objetivo de ser usados en aplicaciones de posicionamiento y de medida de potencia recibida con alta precisión. Dado este análisis previo, los resultados obtenidos en las pruebas finales han sido satisfactorios.

Estos resultados señalan que el sistema desarrollado no es reproducible en entornos reducidos con muchos obstáculos que provocan errores, exactamente escenarios con obstáculos metálicos producen los peores efectos. En este tipo de entornos, sería recomendable o conocer previamente la posición de los nodos fijos para que el posicionamiento sólo tenga errores procedentes de un nodo móvil o utilizar sólo nodos móviles, lo que permitiría corregir errores en la medida del RSSI, por lo tanto de la distancia y por lo tanto del posicionamiento.

En entornos interiores más amplios o en espacio libre el sistema de posicionamiento produce unos errores entorno a los 50 cm, por lo que si el espacio de actuación del sistema es de varios metros cuadrados y la aplicación de uso del mismo no requiere de una precisión de posicionamiento menor, el sistema es muy bueno, aunque aún es muy mejorable. Se ha comprobado que en este tipo de entornos el sistema es reproducible sin necesidad incluso de ajustar el modelo de propagación según el entorno.

6.2 Trabajo futuro

La red de sensores de radiofrecuencia diseñada para el posicionamiento es mejorable en varios aspectos y se han encontrado varias líneas de investigación que podrían mejorar el sistema.

En primer lugar, sería interesante rediseñar la red de sensores utilizando otro modelo de módulo radiofrecuencia con unas prestaciones más cercanas a las necesidades del sistema, esto es: mayor precisión en la medida de potencia de señal de radiofrecuencia y la posibilidad de enviar mensajes *broadcast* que provocaran la contestación automática del resto de nodos activos en el sistema. Con esta funcionalidad no sería necesario conocer previamente el número de agentes que actuarían ni sus IPs, además sería posible introducir un nuevo agente en cualquier momento si fuera necesario.

Con un nuevo módulo, el programa de posicionamiento podría reprogramarse para que calculase con mayor rapidez la posición de todos los nodos del sistema y así los agentes entrasen antes en estado de relax más rápidamente y por lo tanto se obtuviese un posicionamiento más veloz. Esto se conseguiría obteniendo mayor cantidad de mensajes con la potencia recibida.

Se podría probar el sistema conociendo previamente la posición de los nodos fijos y que éstos únicamente tuvieran que calcular la posición del nodo móvil. Sería interesante comparar cuanto se mejora el posicionamiento en este caso con el estudiado en el presente proyecto.

También sería muy útil dotar a todos los nodos de movilidad y probar el sistema en distintos entornos para comprobar si mejora su funcionamiento. A priori, un nodo puede estar situado en una posición en la que la señal que recibe y que manda esté muy afectada por el entorno (obstáculos metálicos, multitrayecto, reflexión...) y su posición se calcule erróneamente, pero si este nodo fuera capaz de cambiar su posición se podrían corregir este tipo de situaciones (en ocasiones el movimiento mejoraría el posicionamiento y en otras lo empeoraría pero en cualquier caso podría mejorar).

Por último, para obtener una mayor precisión, sería interesante diseñar agentes multisensoriales. Por ejemplo, agentes que tuviesen un módulo TX/RX de radiofrecuencia (como en el caso estudiado) y un segundo módulo TX/RX de ultrasonidos. Se podría calcular la distancia al resto de módulos usando la señal de radiofrecuencia y complementar la medida usando la señal de ultrasonidos (midiendo el tiempo que tarda en viajar la señal entre ambos agentes) que arroja una mayor precisión pero que es necesario de visión directa entre ambos nodos.

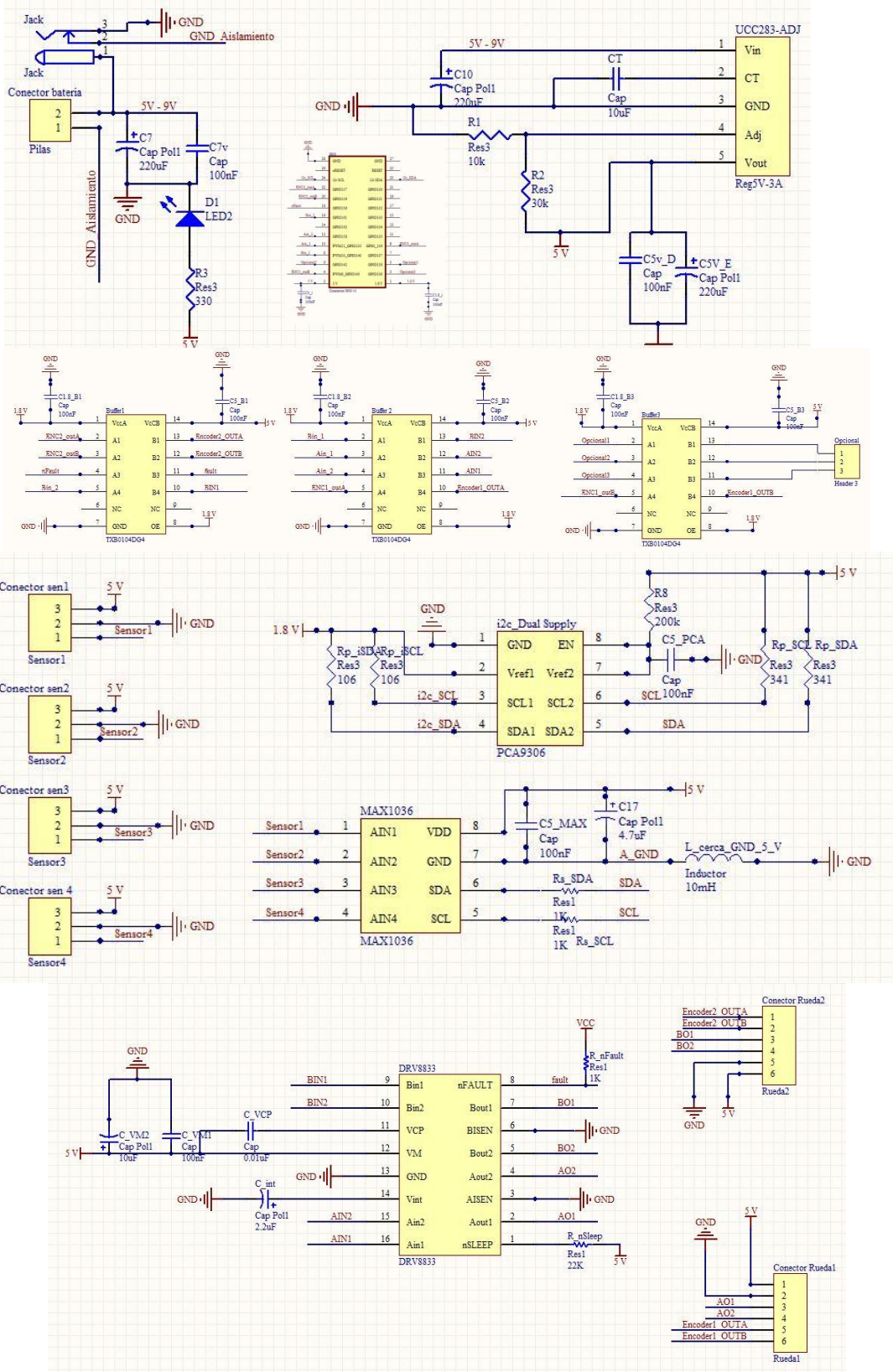
Referencias

- [1] Tamio Arai, Enrico Pagello and Lynne E Parker, "Editorial: Advances in Multi-Robot Systems", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 18, No. 5, pp. 655-661, October 2002.
- [2] Soon-Jo Chung and Jean-Jacques Slotine, "Cooperative Robot Control and Concurrent Synchronization of Lagrangian Systems", IEEE Transactions on robotic, Vol. 25, No. 3, pp. 686-700, June 2009.
- [3] Kaveh Pahlavan, Xinrong Li and Juha-Pekka Mäkelä, "Indoor Geolocation Science and Technology" IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 2, pp. 112-118, Feb. 2002.
- [4] J. Hightower and G. Boriello, "Location systems for ubiquitous computing" IEEE Computer, pp. 57-66, Aug. 2001.
- [5] M. Hazas, J. Scott and J. Krumm, "Location-Aware Computing Comes of Age", IEEE Computer, p. 95-97, Feb. 2004.
- [6] Y. Wang, X. Jia, H.K. Lee and G.Y. Li, "An indoors wireless positioning system based on wireless local area network infrastructure" The 6th International Symposium on Satellite Navigation Technology Including Mobile Positioning & Location Services, July 2003.
- [7] J. Hightower, C. Vakili, C. Borriello and R. Want, "Design and calibration of the SpotON ad-hoc location sensing system", UW CSE 00-02-02, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle.
- [8] Widyawan, M. Klepal, D. Pesch, "Influence of Predicted and Measured Fingerprint on the Accuracy of RSSI-based Indoor Location Systems", Positioning, Navigation and Communication, 2007, pp. 145-151, March 2007
- [9] Kalman R.E., "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", Transaction of the ASME-Journal of Basic Engineering, pp. 35-45, March 1960.
- [10] Henry L. Bertoni, Walter Honcharenko and Leandro Rocha Maciel "UHF Propagation Prediction for Wireless Personal Communications" Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 9, 1333- 1359, September 1994.
- [11] H. Soganci, S. Gexici and H.V. Poor, "Accurate positioning in ultra-wideband systems" IEEE Wireless Communications, vol. 18, no. 2, pp. 19-27, April 2011.
- [12] Philipp Vorst, Juergen Sommer, Christian Hoene, Patrick Schneider, "Indoor Positioning via Three Different RF Technologies", RFID Systems and Technologies (RFID SysTech), 2008 4th European Workshop on, pp. 1-10, June 2008.
- [13] C. Soria, R. Carelli, R. Kelly and Juan M. Ibarra Zannatha, "Control de robots cooperativos por medio de visión artificial".
- [14] Y. Uny Cao, Alex S. Fukunaga and Andrew B. Kahng, "Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions", Autonomous Robots, No. 4, pp. 1-23, 1997.
- [15] E. Menegatti, A. Zanella, S. Zilli, F. Zorzi, E. Pagello, "Range-only SLAM with a Mobile Robot and a Wireless Sensor Network". 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe International Conference Center. Kobe, Japan, May 12-17, 2009.
- [16] <http://www.ti.com/product/omap3530>
- [17] <http://www.igep.es>
- [18] <http://www.dmd.es/wm11.htm>
- [19] <http://www.pctestinstruments.com/>
- [20] <http://www.ti.com/>
- [21] <http://www.altium.com>

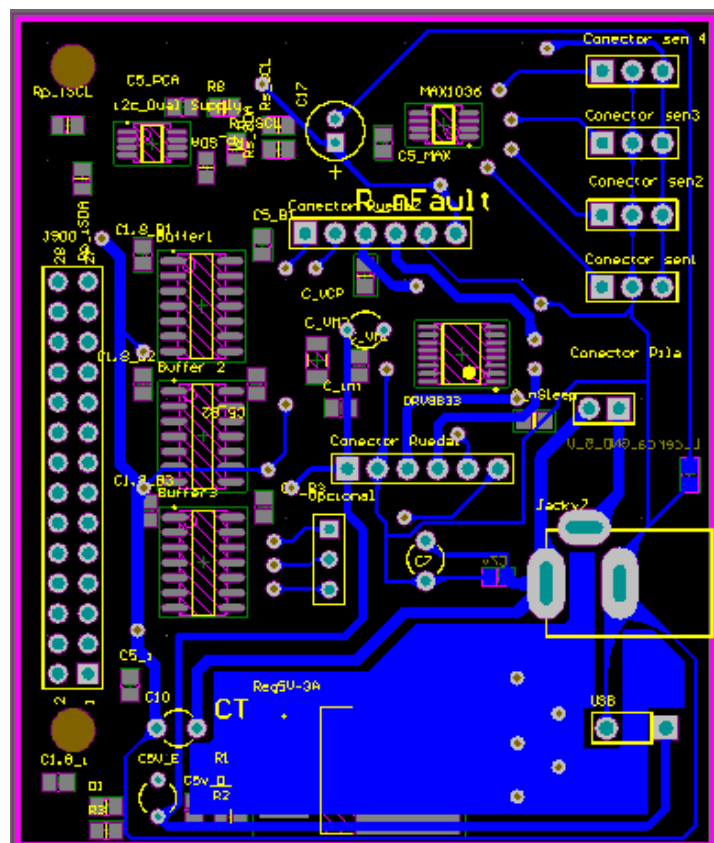
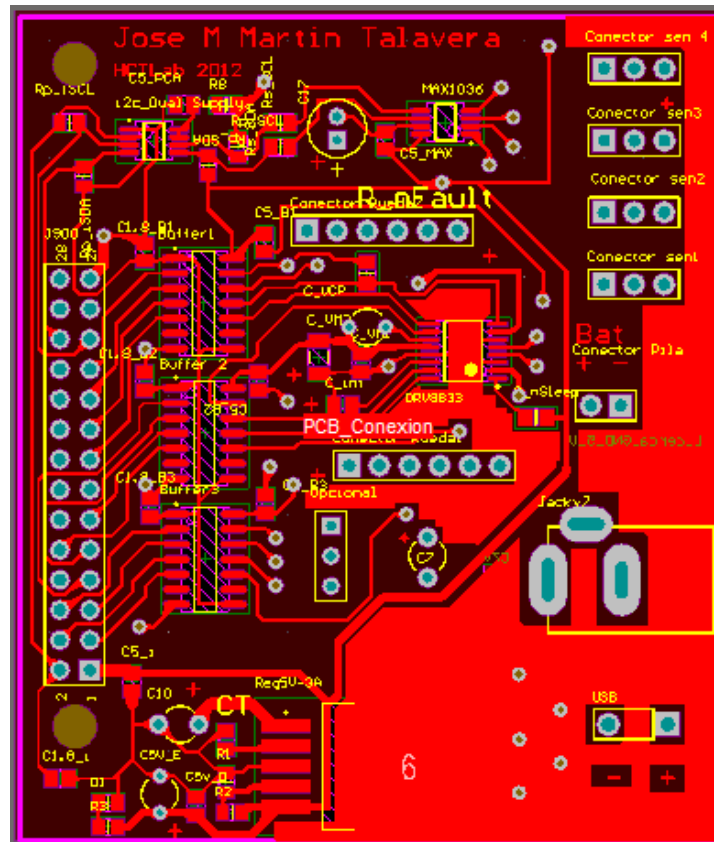
- [22] <http://www.sharpsma.com/optoelectronics/sensors/distance-measuring-sensors/GP2Y0A21YK0F>
- [23] <http://www.pololu.com/catalog/product/1218>

Anexos

A Esquemático placa auxiliar



B Layout placa auxiliar



PRESUPUESTO

1) Ejecución Material

- Compra de ordenador personal (Software incluido)..... 2.000 €
 - Alquiler de impresora láser durante 6 meses 50 €
 - Material de oficina 150 €
 - Material de fabricación robot
 - IGEPv2..... 188 €
 - Estructura, motores, encoders y ruedas 120 €
 - Placa auxiliar..... 400 €
 - Módulos RF
 - WM11 x5 195 €
 - Antena x5 18 €
 - Resto componentes..... 50 €
 - Alquiler máquina fresadora durante un mes 4.800 €
- Total ejecución material 7.971 €

2) Gastos generales

- 16 % sobre Ejecución Material 1.275,36 €

3) Beneficio Industrial

- 6 % sobre Ejecución Material 478,26 €

4) Honorarios Proyecto

- 1100 horas a 16 € / hora..... 17.600 €

5) Material fungible

- Gastos de impresión..... 290 €
- Encuadernación..... 5 €

6) Subtotal del presupuesto

- Subtotal Presupuesto..... 27.619,62 €

7) I.V.A. aplicable

- 21% Subtotal Presupuesto 5.800,12 €

8) Total presupuesto

- Total Presupuesto..... 33.419,75 €

Madrid, Octubre de 2012

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: José María Martín Talavera
Ingeniero Superior de Telecomunicación

PLIEGO DE CONDICIONES

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un sistema de posicionamiento por radiofrecuencia basado en robots colaborativos. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.
2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.
3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.
4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.
5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.
6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.
7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.
8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.
10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.
11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.
12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.
13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.
14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.
15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.
16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.
17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.
18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.
19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.
20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

Condiciones particulares

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.
2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.
3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.
4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.
5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.
6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.
7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.
8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.