

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**ESTUDIO DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES
PARA APLICACIÓN EN ROBÓTICA
COOPERATIVA**

Ingeniería de Telecomunicación

Álvaro Foguet Carrasco
Julio 2016

ESTUDIO DE SISTEMAS DE COMUNICACIONES PARA APLICACIÓN EN ROBÓTICA COOPERATIVA

AUTOR: Álvaro Foguet Carrasco
TUTOR: Guillermo González de Rivera Peces



Hardware and Control Technology Laboratory
Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones
Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
Julio 2016

Resumen

Resumen

En este proyecto se estudian, implementan y evalúan varios sistemas de comunicación para poder aplicarlos prioritariamente en robots cooperativos. Para llevarlo a cabo se ha analizado y comparado el estado del arte de diversos sistemas de comunicación enfocados siempre al enlace entre robots. A su vez se ha realizado un estudio tanto de los diversos protocolos usados, como de los módulos y dispositivos existentes, donde están implementado esos protocolos, que hacen posible esa transmisión de información, y por tanto, esa comunicación. Este estudio además ha ido acompañado de una parte experimental sobre diferentes equipos.

Como punto de partida del proyecto se ha realizado un estudio de los diferentes sistemas que han ido marcando el estado del arte, haciendo especial hincapié en aquellos que se emplean mas en el ámbito de la robótica cooperativa. Dicho estudio tambien abarca la evolución de cada una de las tecnologías, desde su primera implementación, hasta el día de hoy.

Una vez entendido el estado del arte desde el punto de vista teórico, el siguiente paso ha sido elaborar una tabla global parametrizada para comparar todos los sistemas entre sí. De esta manera, se puede tener una visión general y conjunta de dichos sistemas y poder escoger el que más se adapte a las necesidades para su posterior implementación. Seguida e independientemente de la comparativa anterior, se han diseñado todos y cada uno de los sistemas propuestos inicialmente dando módulos y dispositivos concretos, evaluando sus características y definiendo las conexiones de sus pines. Finalmente, dependiendo de factores que se explicarán en el proyecto, se han desarrollado y configurado los módulos y dispositivos correspondientes al mismo tiempo que se han estudiado los softwares utilizados para su configuración.

Para la parte experimental se han llevado a cabo tres etapas. Durante la primera etapa el objetivo es evaluar la distancia máxima de alcance de los sistemas de comunicación escogidos comparándolos con sus hojas de especificaciones. En la segunda etapa se estudiará la potencia de recepción *RSSI* de los dispositivos remotos y su posible o no pérdida de paquetes. En la última etapa se pretende obtener el rendimiento del sistema así como su velocidad de transmisión de datos práctica para así, evaluar en el sistema en conjunto. Finalmente, se presentan las conclusiones extraídas a lo largo de este proyecto, así como las posibles líneas de trabajo futuro.

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, a través del proyecto 'Construcción y Test del Sistema Posicionador de Fibras de DESI' de referencia AYA2014-60641-C2-2-P.

Palabras Clave

Sistemas de comunicación, robóts, robótica cooperativa, Bluetooth, ZigBee, Comandos AT.

Abstract

In this thesis, several communication systems are studied, implemented and evaluated to apply them to cooperative robots. In order to carry out this, various state-of-the-art communication systems have been analysed and compared; focusing always on the link between robots. At the same time, it was conducted a research about the diverse protocols in which they act as well as the existent modules and devices where these protocols are implemented. They enable this transmission of information and, thus, that communication.

As a starting point, the project begins by the study of the different systems which have been setting the state of art; highlighting those more applicable to the field of cooperative robotics. Such a study does also cover the development of each of the technologies, from their first implementation to date.

Once understood the state of art from the theoretical point of view, what followed was the comparison of all of them. In this way, a joint global view of those systems is obtained in order to, in terms of certain factors, be able to choose and implement three different communications systems. Consecutively and independently from the previous comparison, the proposed systems have been designed one by one giving concrete modules and devices, evaluating their characteristics and defining the connections of their pins. Finally, depending on the factors which will be explained in the thesis, the relevant modules and devices have been developed and configured at the same time that the used software products have been studied to their configuration.

The experimental part has been conducted in three stages. During the first phase, the aim is to evaluate the scope of the chosen communications systems, comparing them to their specification sheets. The second stage focuses on the received signal strength *RSSI* of the remote devices and their possible packet loss. In the last phase, the system throughput is aimed to be obtained as well as its data transmission speed to evaluate the system as a whole. Last but not least, concussions from all over the thesis are presented just as the possible future line of work.

Acknowledgements: This work was funded by the Ministry of Economy and Competitiveness, through the project 'Construcción y Test del Sistema Posicionador de Fibras de DESI' with reference AYA2014-60641-C2-2-P.

Key Words

Communication Systems, robots, cooperative robotics, Bluetooth, ZigBee, AT Commands

Agradecimientos

En este momento, toca poner punto y final a otra etapa de mi vida. Una etapa de aprendizaje, conocimiento. Una etapa tanto de momentos de sufrimiento como de alegría. Una etapa de amistad. Escoger estudiar Telecomunicaciones, no es nada fácil. Por eso, en estos años, muchas han sido las personas que, de una manera u otra, han hecho posible que esté escribiendo estas líneas.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor Guillermo Gonzalez de Rivera Peces por darme la posibilidad de realizar este proyecto y por ayudarme en los momentos más difíciles. También agradecer a todo el equipo de HCTLab por su buena acogida y el buen ambiente de trabajo que ha habido a lo largo del proyecto

Al mismo tiempo, darles las gracias a mis compañeros, en especial a Fran, Victor, Borja, Alexis, Dani y Tolo, por haber tenido la suerte de conocerles, por todos los viajes y momentos juntos, pero sobre todo, por la buena 'familia' que formamos juntos. Así como a mis amigos del barrio y de Cifu. Saber que puedes contar con todos ellos en cualquier situación, es algo increíble.

Durante estos años de carrera, he tenido la suerte de disfrutar la experiencia del Erasmus. Gracias a todas y cada una de las personas que conocí durante ese año en Roma, de los que me llevo grandes amigos, así como 3 *fratello*s más. San Quintino, 14 siempre será nuestra casa.

Due anni dopo l'Erasmus, la vita mi ha portato di nuovo a Roma. Voleva ringraziare tutte le persone di Everis Roma con qui ho avuto il piacere di lavorare. Senza dubbio, loro mi hanno aiutato a crescere professionalmente come persona. Sono molte le persone che nel trascorso dei mesi, sono diventati amici, e che porterò sempre con me. Ma in particolare voglio ringraziare ad una persona che se non fosse stato per lui, tutto sarebbe stato diverso. Grazie mille Damià.

Por último, pero no menos importante, ya que no habría llegado hasta aquí sin ellos: mi familia. A mi madre, gracias por no cansarse nunca de contagiarme su sonrisa día a día. A mi hermana, gracias por esa comunicación que solamente ella y yo entendemos. Y a mi padre, gracias porque sencillamente gracias a él soy quien soy.

A todos muchas gracias.

Álvaro Foguet Carrasco
Julio 2016

Índice general

Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	XII
1. Introducción.	1
1.1. Motivación del proyecto.	1
1.2. Objetivos y enfoque.	2
1.3. Metodología y plan de trabajo.	3
1.4. Organización de la memoria.	4
1.5. Contribuciones.	4
2. Estado del arte.	5
2.1. Introducción a la robótica cooperativa	5
2.2. Sistemas Ultrasonido	6
2.3. Sistemas Infrarrojos	7
2.3.1. Sistemas FSO	9
2.4. Sistemas Radio	11
2.4.1. Sistema Bluetooth	11
2.4.2. Sistema Wi-Fi	14
2.4.3. Sistema Zigbee	16
2.5. Sistemas Telefonía Movil	19
2.5.1. Sistema GSM	19
2.5.2. Sistema GPRS	20
2.5.3. Sistemas 3G y 4G	21
3. Diseño	23
3.1. Necesidades de Aplicación en Robots Cooperativos	23
3.1.1. Comparativa entre sistemas de IR, FSO y Ultrasonidos	23
3.1.2. Comparativa entre sistemas Bluetooth, Wi-Fi y ZigBee	25
3.1.3. Comparativa entre sistemas GSM, GPRS y 3/4G	26

3.1.4.	Comparativa global entre los distintos sistemas estudiados	27
3.2.	Diseños Propuestos	28
3.2.1.	Diseño Sistemas Ultrasonidos	28
3.2.2.	Diseño Sistemas Infrarrojos	31
3.2.3.	Diseño Sistemas Bluetooth	34
3.2.4.	Diseño Sistemas Wi-Fi	36
3.2.5.	Diseño Sistemas ZigBee	36
3.2.6.	Diseño Sistemas GSM y GPRS	38
3.2.7.	Diseño Sistemas 3G y 4G	39
4.	Desarrollo e Implementación	41
4.1.	Implementación Sistema Bluetooth	41
4.1.1.	Configuración de los módulos	43
4.1.2.	Comandos AT	45
4.1.3.	Comunicación punto a punto	45
4.1.4.	Comunicación punto a multipunto	47
4.2.	Implementación Sistema ZigBee	50
4.2.1.	Configuración de los módulos	51
4.2.2.	Enlace Punto a Punto	53
4.2.3.	Enlace Punto a Multipunto	55
4.2.4.	Enlace Broadcast	57
4.3.	Implementación Sistema Wi-Fi	59
5.	Experimentos realizados y resultados.	63
5.1.	Pruebas Zigbee.	63
5.2.	Pruebas Bluetooth.	69
6.	Conclusiones y trabajo futuro	71
6.1.	Conclusiones.	71
6.2.	Trabajo Futuro.	72
	Glosario de acrónimos	73
	Bibliografía	75
	A. Comandos AT	79
	B. Presupuesto	87

Índice de figuras

1.1.	<i>Diagrama del plan de trabajo seguido.</i>	3
2.1.	<i>Ejemplo de un sistema de colaboración entre robots.</i>	6
2.2.	<i>Esquema simple del funcionamiento de un sistema por ultrasonidos.</i>	6
2.3.	<i>Esquema del espectro electromagnético mostrando las longitudes de onda.</i>	8
2.4.	<i>Diagrama de la relación Voltaje-Distancia referido al estudio [1].</i>	8
2.5.	<i>Clasificación de los sistemas infrarrojos atendiendo a direccionalidad y campo de visión.</i>	9
2.6.	<i>Ejemplo de funcionamiento de sistema mediante Fibra Óptica.</i>	10
2.7.	<i>Ejemplo de funcionamiento de sistema mediante FSO.</i>	10
2.8.	<i>Comparativa general comunicaciones inalámbricas [2].</i>	11
2.9.	<i>Logotipo corporativo de Bluetooth.</i>	11
2.10.	<i>Arquitectura de los robots del experimento [3].</i>	14
2.11.	<i>Logotipo corporativo de Wi-Fi.</i>	14
2.12.	<i>Infraestructura de una red Wi-Fi</i>	15
2.13.	<i>Logotipo corporativo de ZigBee.</i>	17
2.14.	<i>Topologías de una red ZigBee.</i>	18
2.15.	<i>Red de robots cooperativos mediante comunicación Zigbee referida al estudio [4].</i>	19
2.16.	<i>Arquitectura del robot realizado en el estudio [5].</i>	21
2.17.	<i>Diseño de la red implementada en el estudio [6].</i>	22
3.1.	<i>Diagrama de tiempo de sensores ultrasónicos con emisor y receptor juntos.</i>	28
3.2.	<i>Diagrama de tiempo de sensores ultrasónicos con emisor y receptor separados.</i>	29
3.3.	<i>Parte delantera SRF04 y mapa de conexiones traseras.</i>	30
3.4.	<i>Rango efectivo en grados del sensor SRF04.</i>	30
3.5.	<i>Sensor de ultrasonidos modelo SRF08.</i>	31
3.6.	<i>Sensor de ultrasonidos modelo SRF10.</i>	31
3.7.	<i>Cadena de pulsos para el envío del comando 10110101.</i>	32
3.8.	<i>Casos de detección: (a) robot detectando obstáculos, (b) robot detectando otros robots.</i>	32

3.9. Emisor LED IR modelo TSAL6100 (Vishay Semiconductors).	33
3.10. Emisor LED IR modelo SE3455 (Honeywell).	33
3.11. Emisor LED IR modelo OP280K (Optek-Technology).	33
3.12. Receptor IR modelo TSOP4838 (Vishay Semiconductors).	34
3.13. Receptor IR modelo TSOP77438WTT (Vishay Semiconductors).	34
3.14. Módulo Bluetooth CC2540 (Texas Instrument).	35
3.15. Módulo Bluetooth HC-05).	35
3.16. Conexión Pines módulo BTBee.	35
3.17. Módulo WiFi ESP8266 (Adafruit).	36
3.18. Conexión pines ESP8266.	36
3.19. Xbee con Wire Antena.	37
3.20. Xbee con Chip Antena.	38
3.21. Xbee con RPMA Conector Antena.	38
3.22. Módulo GSM TC65 (Siemens).	39
3.23. Módulo GPRS GPRS8000-S (Embest Technology).	39
3.24. Módulo 3G (Simcom).	40
3.25. Módulo 4G LTE910 (NimbeLink).	40
4.1. Ejemplo distribución Bluetooth como Master/Slave	41
4.2. Frente y trasera del módulo Bluetooth HC-05 utilizado en el proyecto.	42
4.3. Conexiones entre el módulo Bluetooth HC-05 y el adaptador USB-TTL PL2303.	43
4.4. Ventana principal del software CoolTerm	44
4.5. Opciones de configuración del software CoolTerm	44
4.6. Pantalla CoolTerm con varios comandos AT ejecutados.	46
4.7. Pantalla CoolTerm con cambios de estado	46
4.8. Pantalla CoolTerm búsqueda de dispositivos y dispositivos conectados.	47
4.9. Comunicación entre módulo HC-05 y tablet.	48
4.10. Pantalla de comunicación en el terminal tablet.	48
4.11. Comunicación entre módulo HC-05 y smartphone.	49
4.12. Pantalla de comunicación en el terminal smartphone.	49
4.13. Módulos Xbee Seres 1 utilizados en el proyecto	50
4.14. Esquemático del controlador Xbee USB.	51
4.15. Información relativa al módulo Xbee conectado	52
4.16. Parte trasera módulo Xbee	53
4.17. Diseño de configuración punto a punto.	53

4.18. Ventana Modem Configuration para la configuración de dos módulos Xbee en una comunicación punto a punto	54
4.19. Ventana Terminal de visualización para la configuración de dos módulos Xbee en una comunicación punto a punto	55
4.20. Ejemplo de configuración punto a multipunto.	55
4.21. Ventana Modem Configuration para la configuración de tres módulos Xbee en una comunicación punto multipunto.	56
4.22. Ventana Terminal de visualización para la configuración de tres módulos Xbee en una comunicación punto a multipunto	57
4.23. Ejemplo de configuración Broadcast.	57
4.24. Ventana Modem Configuration para la configuración de tres módulos Xbee en una comunicación broadcast	58
4.25. Ventana Terminal de visualización para la configuración de tres módulos Xbee en una comunicación Broadcast	59
4.26. Mapa de conexiones entre ESP8266 y conversor USB	59
4.27. Redes Wi-Fi descubiertas por el módulo ESP8266.	61
4.28. Ejemplo de comunicación desde el módulo ESP8266 hacia la tablet.	62
4.29. Ejemplo de comunicación desde la tablet hasta el módulo ESP8266.	62
5.1. Ejemplo de la interfaz del software X-CTU.	63
5.2. Valores medidos de RSSI frente a la distancia a determinados valores de potencia de transmisión	64
5.3. RSSI y distancia en interior horizontal para XbeePRO con wire antena y Xbee con PCB antena.	65
5.4. RSSI y distancia en exteriores para XbeePRO con wire antena y Xbee con PCB antena.	65
5.5. Comparación de RSSI y distancia en entornos interiores y exteriores para (a)Xbee con PCB antena y (b)XbeePRO con wire antena.	66
5.6. RSSI y distancia en interior vertical para XbeePRO con wire antena y Xbee con PCB antena.	67
5.7. Comparaciones entre los planos vertical y horizontal de los módulos (a) Xbee s1 y (b)XbeePRO.	67
5.8. Rendimiento del Zigbee a diferentes valores de baudrate y tamaño paquetes	68
5.9. Alcance máximo y RSSI de los módulos Bluetooth HC-05	69
5.10. Comparación de RSSI y distancia en entornos interiores y exteriores para módulos Bluetooth HC-05	70
5.11. Comparación de RSSI y distancia en en plano horizontal y vertical para módulos Bluetooth HC-05	70

Índice de tablas

2.1. Clasificación de los dispositivos Bluetooth en función su alcance.	12
2.2. <i>Principales bandas de frecuencia GSM.</i>	20
3.1. Comparativa entre sistemas IR, FSO, US	25
3.2. Comparativa entre sistemas Bluetooth, Wi-Fi y ZigBee	26
3.3. Comparativa entre sistemas GSM, GPRS y 3/4G.	27
3.4. My caption	27
3.5. Comparativa entre módulos Xbee	37
4.1. <i>Configuración de dos módulos Xbee para una comunicación punto a punto.</i>	54
4.2. <i>Configuración de tres módulos Xbee para una comunicación punto a multipunto.</i> .	56
4.3. <i>Configuración de tres módulos Xbee para una comunicación Broadcast.</i>	58

1

Introducción.

Durante las últimas décadas, la tecnología ha dado un paso de gigante en su crecimiento. Y con ella, el campo de la robótica. El hecho de pensar hace unos años en la posibilidad de plantas industriales automatizadas hoy ya no es una utopía, donde a pequeña escala, lo podemos ver a diario en centros comerciales.

Obviamente lo que hace que el crecimiento de la robótica sea exponencial, es en gran parte a la aparición de la robótica cooperativa. En otras palabras, a veces, para enfrentarse a ciertos problemas, la actuación de un único robot no es suficiente y hace necesario la presencia de varios robots trabajando de forma coordinada. El objetivo de la robótica cooperativa es diseñar sistemas compuestos de varios robots capaces de resolver problemas conjuntamente y para que esto suceda, tiene que existir una comunicación perfecta entre todos y cada uno de ellos.

La fusión e intercambio de información entre los diferentes robots favorece en primer lugar, la optimización y ahorro de recursos y en segundo lugar facilita el trabajo global del problema a resolver ya que por ejemplo, mientras uno de ellos puede estar recopilando datos del terreno, otro puede irse desplazando por él y otro a su vez, ir moviendo obstáculos.

Por tanto, se estudiarán diferentes sistemas de comunicación para obtener un sistema completo aunque esté formado por diferentes robots, con los modos de comunicación que permitan una optimización en la distribución de tareas.

1.1. Motivación del proyecto.

Aunque actualmente se esté produciendo un gran desarrollo en el entorno de la robótica, bien es cierto que todavía existen algunos problemas difíciles de resolver para un único robot. Los sistemas formados por más de un robot, los denominados multi-robots, están orientados a la resolución de dichos problemas en los que la participación de un solo robot, o bien no es suficiente, o bien resulta muy costosa en términos de planificación, diseño y tiempo.

El objetivo de este trabajo no es otro que analizar los diferentes mecanismos de comunicación en sistemas colaborativos para posteriormente, poder desarrollar algún prototipo con las características optimizadas. Se realizará por tanto un estudio exhaustivo de cada una de las comunicaciones posibles, incluyendo infrarrojas, ópticas, radio (Bluetooth, WIFI, Zigbee) entre otras, y se determinará en base a unos factores específicos y para unos casos concretos, cual de todas ellas será la que mejor se ajuste para la resolución del problema.

Por estos motivos, este proyecto se enmarca en el área del estudio de **sistemas de comunicaciones para la aplicación en robótica cooperativa**.

1.2. Objetivos y enfoque.

Aunque actualmente se esté produciendo un gran desarrollo en el entorno de la robótica, bien es cierto que todavía existen algunos problemas difíciles de resolver para un único robot. Los sistemas formados por más de un robot, los denominados multi-robots, están orientados a la resolución de dichos problemas en los que la participación de un solo robot, o bien no es suficiente, o bien resulta muy costosa en términos de planificación, diseño y tiempo.

El objetivo de este trabajo no es otro que analizar diferentes mecanismos de comunicación en sistemas colaborativos para posteriormente, poder desarrollar algún prototipo con las características optimizadas. Se realizará por tanto un estudio exhaustivo de cada una de las comunicaciones posibles, incluyendo infrarrojas, ópticas, radio (Bluetooth, WIFI, Zigbee) entre otras, y se determinará en base a unos factores específicos y para unos casos concretos, cual de todas ellas será la que mejor se ajuste para la resolución del problema.

- Estudio del estado del arte de distintos sistemas que han producido buenos resultados en la última década con respecto a la robótica cooperativa.
- Comprensión y comparativa de los distintos sistemas.
- Obtención de la mejor configuración e implementación de los sistemas de comunicación mas adecuados para un determinado proyecto.
- Evaluación de los resultados obtenidos en los experimentos al aplicar los diferentes sistemas de comunicaciones.
- Entender en profundidad el desafío que la conlleva la colaboración entre robots en la actualidad, por lo que se pretende reconocer las limitaciones y posibles mejoras para poder continuar la investigación iniciada en este proyecto.

1.3. Metodología y plan de trabajo.

Para el correcto desarrollo y consecución de los objetivos marcados en el presente Proyecto Fin de Carrera, se ha seguido un plan de trabajo organizado en el tiempo como muestra la Figura 1.1 y detallado a continuación.

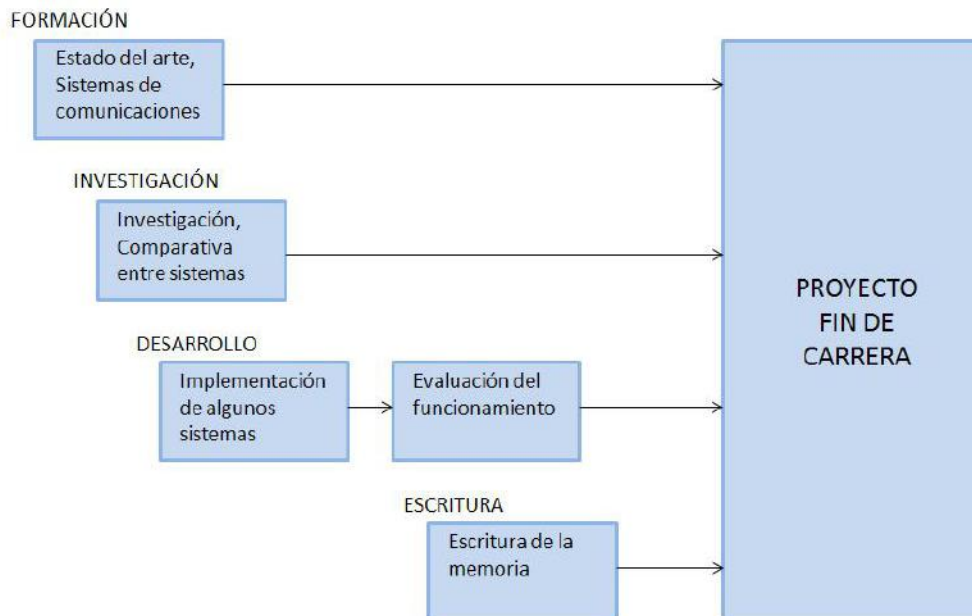


Figura 1.1: Diagrama del plan de trabajo seguido.

- **Estudio del estado del arte.** Todo inicio fundamental de un proyecto pasa por una etapa de formación en la que se obtienen los conocimientos necesarios para su desarrollo. Para este proyecto en concreto, se ha realizado en primer lugar un estudio de los diferentes sistemas de comunicación entre robots posibles seguido del estado del arte en robótica cooperativa utilizando libros y publicaciones del estado del arte para sistemas basados en *cooperación entre robots*.
- **Estudio y análisis de los sistemas de comunicación** En la segunda fase del proyecto, el alumno se ha familiarizado con los diferentes sistemas de comunicaciones, para posteriormente analizarlos en profundidad evaluando las ventajas y desventajas para su uso en determinadas situaciones.
- **Desarrollo e implementación** Seguidamente, en base a diversos factores se ha determinado unos sistemas de comunicaciones concretos para la realización de los experimentos oportunos y poder así comparar los resultados obtenidos de dicha evaluación.
- **Evaluación de resultados y elaboración de la memoria.** Se ha realizado un análisis de los resultados obtenidos en las pruebas llevadas a cabo así como una comparativa entre las diferentes sistemas utilizados. Estos análisis, junto con la revisión del estado del arte y un estudio completo del proyecto llevado a cabo, servirán para elaborar la memoria que pone punto y final al proyecto fin de carrera.

1.4. Organización de la memoria.

El presente trabajo se estructura en cinco capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción.** Este capítulo presenta la motivación para el desarrollo de este proyecto, así como, los objetivos a cumplir durante la ejecución del proyecto, la estructura de este documento y las contribuciones del mismo.
- **Capítulo 2: Estado del arte en sistemas de comunicación para aplicación en robótica cooperativa.** En este capítulo se presenta el estado del arte actual en el ámbito de la robótica cooperativa. En primer lugar se describe una pequeña introducción de la necesidad de aparición de la colaboración entre robots. sistemas de reconocimiento de firma manuscrita dinámica. Y posteriormente se explica detalladamente cada uno de los sistemas de comunicación existentes, su uso, funcionamiento y campos de aplicación.
- **Capítulo 3: Diseño.** En este capítulo, por un lado, se describen y analizan las ventajas e inconvenientes de los sistemas de comunicación anteriores elaborando una tabla global comparativa. Por otro lado se estudian y describen algunos módulos y dispositivos de los distintos sistemas de comunicaciones. Se hace hincapié en como deben alimentarse, que pines deben conectarse..para una futura y correcta comunicación.
- **Capítulo 4: Desarrollo e Implementación.** En este capítulo, una vez diseñado los módulos y escogidos varios de ellos, se procede a su configuración e implantación real.
- **Capítulo 5: Experimentos realizados y resultados.** En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a lo largo de la evaluación de los sistemas analizados detallando la secuencia de los experimentos realizados.
- **Capítulo 6: Conclusiones y trabajo futuro.** En este capítulo se presenta las conclusiones extraídas del proyecto realizado, así como las futuras líneas a seguir en este ámbito.

Al final del presente documento se añaden una serie de apéndices con información adicional para completar la información del proyecto.

1.5. Contribuciones.

El presente proyecto fin de carrera ha contribuido con el grupo de laboratorio HCTLab (Hardware and Control Technology Laboratory) en los siguientes aspectos:

- Estudio del estado del arte de los sistemas de comunicación en robots.
- Análisis y estudio de los softwares utilizados.
- Evaluación experimental de sistemas de radiofrecuencia.

2

Estado del arte.

En este capítulo se presenta en primer lugar, una pequeña introducción a los robots cooperativos, aplicaciones y ventajas de dicha cooperatividad. Y a continuación, se detallan los distintos tipos de sistemas de comunicación para poder aplicarlo en dichos robots. Esta última sección, se ha dividido en tres grupos: el primero de ellos son sistemas que se centran en la comunicación a través de láseres, la luz o el sonido en el espacio libre. El segundo grupo, son los sistemas de radiofrecuencia, es decir, aquellos que utilizan las ondas de radio para transmitirse. Y por último, el tercer grupo es el formado por sistemas de posicionamiento y telefonía.

2.1. Introducción a la robótica cooperativa

Los robots se están convirtiendo en una herramienta muy útil en la sociedad actual. Cada vez son más los campos de trabajo donde actúan, y cada vez mayor, la cercanía al ser humano: aplicaciones militares, sistemas de seguridad, vigilancia, industria e incluso en salas de operaciones de hospitales [7]. Pero en ocasiones, el trabajo del que se ocupa un robot, es demasiado complejo y excede de sus limitaciones. Es entonces donde surge la idea de robots cooperativos.

La creación de redes de robots que trabajan para un fin común, ha permitido avanzar en muchos aspectos. Por ejemplo, donde antes solo teníamos un robot para rastrear un terreno, ahora son varios los que realizan esa acción conjuntamente, permitiendo así, entre otras cosas, una mejor optimización del tiempo ya que se rastrearía el mismo terreno en bastante menos tiempo.

Por todo ello, la comunicación entre los diferentes robots es muy importante, Dependiendo del campo de aplicación, en unos casos se necesitará un sistema comunicación más rápido, en otros, uno con un radio de alcance mayor... Aún así, lo idóneo será buscar una de entre todas ellas, lo más fiable, robusta y eficaz posible. Existen diversos sistemas de comunicación posibles que se analizarán a continuación.

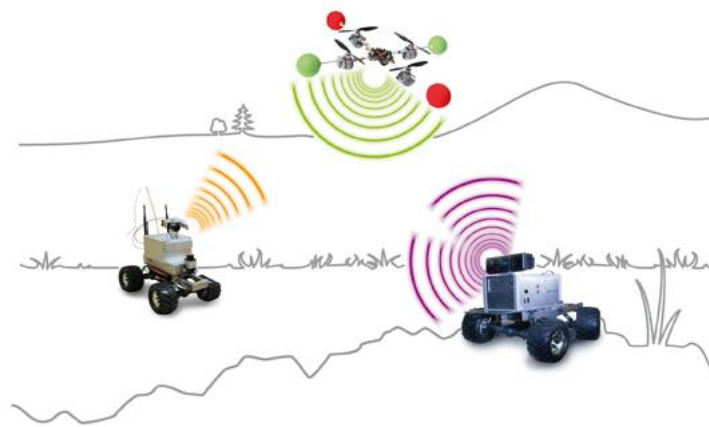


Figura 2.1: Ejemplo de un sistema de colaboración entre robots.

2.2. Sistemas Ultrasonido

Los sistemas de ultrasonido están formados por sensores ultrasónicos. Los ultrasonidos son ondas acústicas cuya frecuencia está por encima del límite perceptible por el oído humano (~ 20 KHz).

El funcionamiento de un sensor básico de ultrasonidos es el siguiente. El transmisor envía una radiación ultrasónica, la cual, cuando se encuentra un objeto cualquier, rebota impulsada hacia el receptor. Posteriormente, se mide el tiempo que tarda en recibirse el eco de dicho impulso y mediante una ecuación, se averigua a qué distancia se encuentra dicho objeto del sensor. En los sensores de ultrasonidos de bajo coste se utiliza el mismo transductor como emisor y receptor.

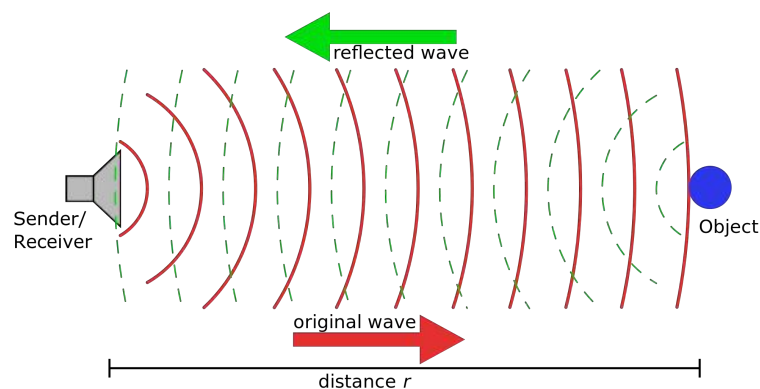


Figura 2.2: Esquema simple del funcionamiento de un sistema por ultrasonidos.

Tras la emisión del ultrasonido se espera un determinado tiempo a que las vibraciones en el sensor desaparezcan y a que esté preparado para recibir el eco producido por el obstáculo. A pesar de su dependencia de condiciones atmosféricas (temperatura, humedad, suciedad...) esta opción se ha utilizado en algunos proyectos [8] ya que las aplicaciones de este tipo de sistemas son varias:

Entorno: Los sensores ultrasónicos se suelen utilizar en sistemas de reconocimiento del entorno y medición de distancias. En este caso se utilizan varios sensores y se diseña una estrategia de control en función de las mediciones de los mismos. Los sensores se colocan de una manera determinada en la superficie exterior del robot y el resultado de las medidas se utiliza para establecer la estrategia de movimiento del mismo.

Sistema de prevención de colisiones para vehículos de la industria de la construcción (grúas, camiones, topadoras, tractores, montacargas, etc). Es muy común durante el trabajo en obra que estos vehículos colisionen de manera fortuita debido a la gran cantidad de maniobras que deben realizar. La instalación de este tipo de sensores en estos vehículos previene de costes de reparación adicionales.

SONAR (SOund NAvigation and Ranging) Los sonar, son técnicas principalmente desarrolladas para navegación, que consiste en la propagación de sonidos bajo el agua. Se usó con fines militares en la Segunda Guerra Mundial. Hoy en día ya no se utiliza con estos fines ya que la llegada del impulso, avisa al objetivo de la presencia de un emisor antes de que el emisor escuche el rebote o eco.

Como se ha podido comprobar, las aplicaciones de los sistemas de ultrasonido son múltiples, pero sobre todas ellas, se destaca una: detección de obstáculos en robots con navegación autónoma, es decir, en aquellos robots que se mueven encontrando el camino a seguir y sorteando obstáculos. En los robots de pequeño tamaño, es suficiente con un solo detector, ya que su cono de detección de unos 30 grados es suficiente para cubrir el frontal del robot. En las plataformas de mayor tamaño, es necesario varias unidades para cubrir de una forma segura todo el perímetro. Para un robot de unos 30 cm es necesario un mínimo de 2 unidades, para cubrir solo el frontal. Si queremos cubrir todo el perímetro de avance, es necesario de 3 a 5 unidades para el mismo tamaño. Una posibilidad es la de montar el sensor en un servo y mover este 180 grados a la vez que se efectúan diversas mediciones a modo de radar.

2.3. Sistemas Infrarrojos

La luz infrarroja se caracteriza por ser una radiación electromagnética con una longitud de onda superior a la de la luz visible. Hablamos de entre los 700nm y 1mm en el caso de luz infrarroja frente a los 400 a 700 nm en luz visible.

Los infrarrojos pueden distinguirse, de acuerdo a dicha longitud de onda, del siguiente modo:

IR-A (cercano): 700 nm - 1400 nm.

IR-B (medio): 1400 nm - 3000 nm.

IR-C (lejano): 3000 nm - 1 μ m.

El principal uso de los infrarrojos como sistema de comunicación, está orientado en aplicaciones como control a distancia, rendimiento térmico y detección de obstáculos entre otras. En [9] se ha utilizado IR como sistema de comunicación. En este caso, se han implementado 6 transmisores TSKS5400 a lo largo del perímetro del robot. ya que el tiene un ángulo de emisión del diodo es de 30°. Se ha comprobado posteriormente su funcionamiento detectando sea obstáculos u otros robots. Los sensores infrarrojos, ofrecen un coste menor y una respuesta más rápida que los sensores de ultrasonido vistos en el apartado anterior. Aunque tienen un comportamiento no lineal, algunos sensores basados en el desplazamiento de fase, pueden llegar a una resolución de hasta 10 metros [10], pero en general son bastante más caros.

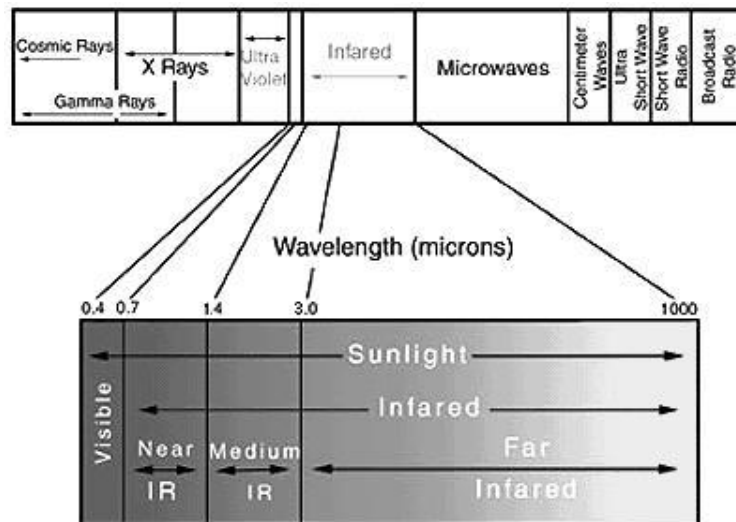


Figura 2.3: Esquema del espectro electromagnético mostrando las longitudes de onda.

Aun así, como se ha comprobado en varios experimentos [1], dicho sistema, funciona realmente bien para distancias cortas, no dando buenos resultados para distancias un poco más lejanas debido a que se recomienda que tanto receptor como emisor se encuentren en el mismo campo visual.

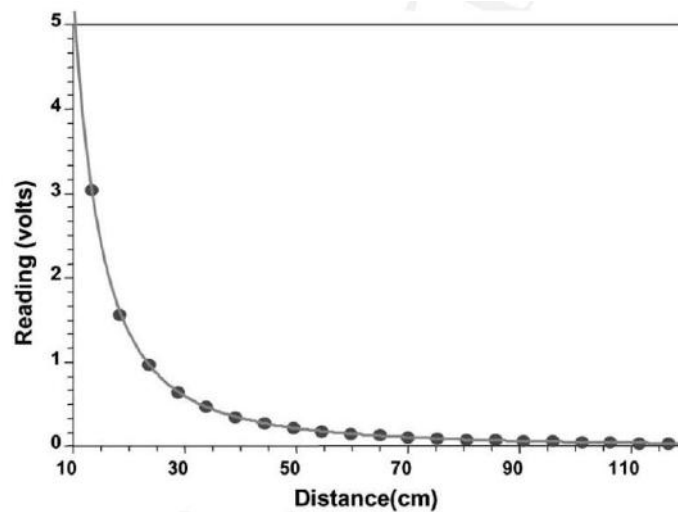


Figura 2.4: Diagrama de la relación Voltaje-Distancia referido al estudio [1].

A su vez, los enlaces IR pueden ser configurados de diferentes formas. Sin embargo, se suelen clasificar principalmente en dos grupos, atendiendo al **grado de direccionalidad** del transmisor y receptor y a la existencia o no de una **línea de visión**. En cuanto al primer criterio, podemos encontrar enlaces dirigidos y enlaces no dirigidos:

- Los **enlaces dirigidos** emplean transmisores y receptores altamente direccionales, los cuales deben apuntar uno al otro o hacia un área común (generalmente en el techo) para establecer el enlace. Lo normal es que se usen para comunicaciones punto a punto.

- Por otro lado, en los **enlaces no dirigidos** se emplean transmisores y receptores de gran amplitud, disminuyendo así la necesidad de tal apuntamiento y logrando una mayor cobertura. En este caso, se utilizan para comunicaciones punto-multipunto.

En los enlaces dirigidos se consigue una mayor eficiencia de la potencia debido a que los haces se dirigen a un rango acotado de direcciones y al mismo tiempo, se minimizan las pérdidas de propagación. Además, es posible establecer enlaces híbridos, en los cuales, se combinan transmisores y receptores con diferente grado de direccionalidad.

El segundo de los criterios de clasificación está relacionado con la existencia o no de una **línea de visión** entre el transmisor y el receptor.

- En los enlaces de línea de visión, la luz emitida por el transmisor llega directamente al receptor mientras que en los enlaces sin línea de visión, la luz que sale del transmisor llega igualmente al receptor pero, generalmente después de haber sido reflejada en una o varias superficies.
- En un enlace de línea de visión, se utiliza con mayor eficiencia la potencia de las señales y se minimiza la distorsión por multitrayectorias. Y con un enlace sin línea de visión, se tiene una mayor facilidad de uso, una mayor movilidad y una mayor robustez. Además una característica importante es que el sistema sigue operando aun cuando existan obstrucciones causadas por personas u objetos que se interpongan entre el transmisor y el receptor.

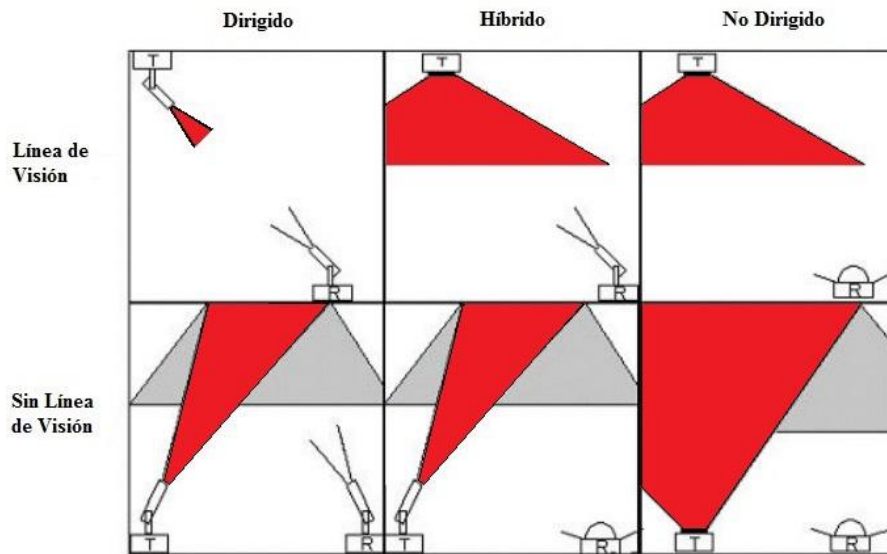


Figura 2.5: Clasificación de los sistemas infrarrojos atendiendo a direccionalidad y campo de visión.

2.3.1. Sistemas FSO

La tecnología Free Space Optics, FSO se basa en la transmisión de señales ópticas en el espacio libre, es decir, se encarga de transmitir información por el espacio libre utilizando señales ópticas similares a las que viajan a través de las fibras ópticas.

Esta transmisión inalámbrica se produce con un diodo emisor de luz o un láser como fuente de transmisión. Los sistemas operan tomando una señal estándar de datos, convirtiéndola a formato digital y enviándola a través del espacio libre. Las señales de información, llegan al transmisor en formato eléctrico, donde, para trasladarlas al dominio óptico, se modulan, en lo que se denomina modulación en potencia (una modulación en amplitud, AM que se varía la potencia de la señal óptica).

Con la invención del láser en la década de los 60, las comunicaciones ópticas por el espacio libre sufrieron un punto de inflexión y desde entonces, el campo de aplicaciones ha sido bastante diverso. Desde comunicaciones LAN-to-LAN en Campus o pequeñas ciudades [11] hasta instalación de redes temporales (para algún evento específico)...

La velocidad de estos enlaces se encuentra entre los 100 Mbps y los 2.5 Gbps. Experimentalmente incluso, se han llegado a lograr velocidades de transmisión de hasta 160 Gbps [12]. En definitiva, un enlace que utiliza las FSO tiene prestaciones similares que un enlace convencional de fibra óptica, salvo por el canal de transmisión que se utiliza, que es el aire.

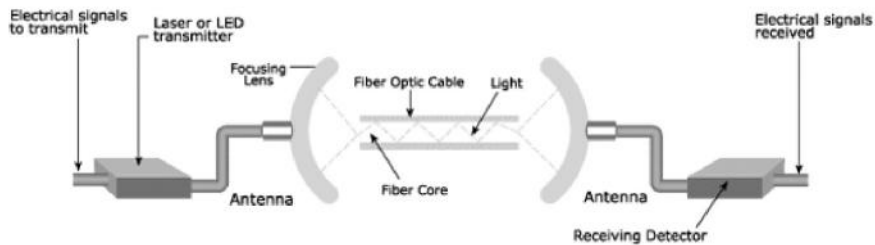


Figura 2.6: Ejemplo de funcionamiento de sistema mediante Fibra Óptica.

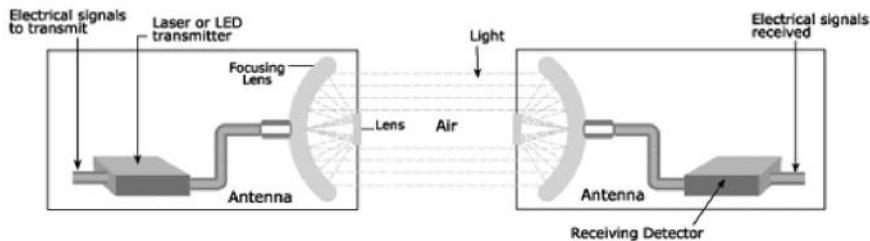


Figura 2.7: Ejemplo de funcionamiento de sistema mediante FSO.

Por lo tanto, no es de extrañar que se utilizan con frecuencia en el ámbito de la robótica. Comunicaciones entre robots aéreos y terrestres como en [13] o aún mas complejas como en [14] donde esta vez la comunicación se realiza entre dos UAV (vehículo aéreo no tripulado). En este último caso, se han instalado cabezas rotatorias en los UAVs abarcando así los 360°. Y se ha propuesto dos algoritmos distintos para hacer rotar las cabezas de manera que no se pierda nunca la comunicación entre los UAVs, sabiendo que estos están en continuo movimiento.

Otro aspecto llamativo, es la cantidad de aportaciones que hay de comunicaciones FSO bajo el agua. Experimentos realizados en [15] y [16] demuestran que a pesar de las atenuaciones que pueden sufrir los enlaces debido al agua (tipo, color, claridad) se consiguen crear redes entre robots acuáticos con resultados bastante positivos.

2.4. Sistemas Radio

En esta sección, se analizarán los principales sistemas de comunicación por radiofrecuencia: Bluetooth, Wi-Fi y Zigbee. La comunicación por radiofrecuencia se basa en la transmisión de datos mediante las ondas de radio del espectro electromagnético (banda que va desde los 3Hz hasta los 300GHz). Como posteriormente se verá, desde un punto de vista aplicativo, Bluetooth está orientado a la comunicación entre dispositivos móviles (ratones, teclados...), Wi-Fi está directamente enfocado a comunicaciones de larga distancia mientras que ZigBee está diseñado en su mayor medida para control de red y control doméstico. En la figura 2.8 se puede ver una comparación entre los diversos sistemas de comunicación que más detalladamente se explicarán a continuación.

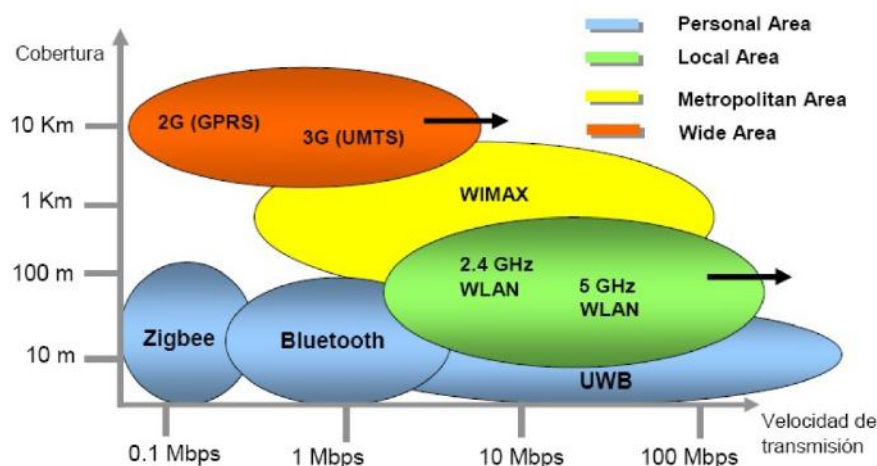


Figura 2.8: Comparativa general comunicaciones inalámbricas [2].

2.4.1. Sistema Bluetooth

El sistema de radio Bluetooth es uno de los sistemas de comunicación más utilizados para robots móviles autónomos. Con la creación de Bluetooth (al igual que otras tecnologías nuevas inalámbricas) se pretende reemplazar la tecnología por cable, en este caso gracias a su poco consumo. Esta tecnología con frecuencia aparece en transmisión de datos entre teléfonos móviles, dispositivos electrónicos...Es por ello que se plantea también como una alternativa para la comunicación entre robots.



Figura 2.9: Logotipo corporativo de Bluetooth.

Bluetooth ofrece aún más características para la mejora de la comunicación. Además, la principal ventaja es que, debido a que se está utilizando un sistema de comunicación radio, los dispositivos bluetooth, a diferencia de los IR, no necesitan estar entre ellos en el mismo campo visual (aunque esto no deja de ser aconsejable).

Bluetooth es un sistema de comunicación de redes inalámbricas que, operando en la banda ISM de 2.4Ghz, posibilita la transmisión de voz y datos a través de un enlace por radiofrecuencia (es decir, utiliza las ondas de radio para transmitir, en este caso concreto, con 2.4Ghz de amplitud de onda). Este sistema de comunicaciones es típico de las redes WPAN (Wireless Personal Area Network) y se basan en el estándar internacional IEEE 802.15.1. Los sistemas Bluetooth se clasifican [17] en tres clases dependiendo de su potencia de alcance máximo como se aprecia en la tabla 2.4.1:

Dispositivo	Potencia Máxima	Alcance
Clase 1	100 mW (20 dBm)	100 m
Clase 2	2.5 mW (4 dbm)	10-15 m
Clase 3	1 mW (0 dBm)	1 m

Tabla 2.1: Clasificación de los dispositivos Bluetooth en función su alcance.

Cabe destacar que la clase 2 se encuentra en la mayoría de dispositivos móviles actuales mientras que la clase 1 principalmente es para uso industrial. Sin embargo, el alcance efectivo, puede variar en función de las condiciones de propagación, cobertura, variaciones de la antena y estado de la batería. Otro dato interesante es la posibilidad de aumentar el radio de alcance, (que se discutirá más adelante).

Por otro lado, los sistemas Bluetooth pueden distinguirse también en función de su capacidad de canal. Así, su evolución ha sido la siguiente:

- **Bluetooth v1.0 y v1.0B.** En 1999 se lanzaron las primeras versiones de Bluetooth. Hoy en día ya están prácticamente obsoletas debido a que dieron bastantes fallos de comunicación entre dispositivos de diferentes compañías. Aunque el gran fallo era que cada vez que se quería enviar datos, en cada transmisión se enviaban también la dirección privada propia del dispositivo, lo que hacía perder el anonimato.
- **Bluetooth v1.1.** En esta nueva versión, se corrigieron los errores de las versiones precedentes. Aspectos a destacar son la utilización del estándar IEEE 802.15.1-2002 y la incorporación de un indicador de fuerza de señal recibida, RSSI.
- **Bluetooth v1.2.** La conexión en esta versión es mucho más rápida (Ancho de banda de **1 Mbit/s**). Introduce la técnica de detección de otros dispositivos Bluetooth en un radio de alcance.
- **Bluetooth v2.0 + EDR.** Compatible con la versión anterior, la principal diferencia radica en la introducción de una velocidad de datos mejorada (EDR) para acelerar precisamente esa transferencia de datos. La tasa nominal de EDR es de 3 Mbit/s, aunque en la práctica sea de **2,1 Mbit/s**.
- **Bluetooth v2.1 + EDR.** Las principales características de esta versión son, por un lado, la mejora del funcionamiento de emparejamiento entre dispositivos Bluetooth y por el otro, una mayor seguridad de los propios datos añadiendo *Secure Simple Pairing (SSP)* [18], que permite un mejor filtrado de nuestros datos y una seguridad superior a la de la versión anterior.

- **Bluetooth v3.0 + HS.** Soporta velocidades de transferencia de datos de hasta **24 Mbit/s** aunque no con el propio enlace Bluetooth. La principal novedad es la incorporación del estándar 802.11 para el envío y recepción de grandes paquetes de datos a una alta velocidad (*High Speed*), que por lo general, está relacionado con WiFi.
- **Bluetooth v4.0.** Lanzado en 2010 y conocido también como Bluetooth Low Energy, se caracteriza precisamente por eso, por consumir muy poca energía. Se empieza a integrar en dispositivos inalámbricos como relojes digitales.
- **Bluetooth v4.1.** Esta versión, se corrigen las interferencias con 4G que pudiera haber, y se introduce la conexión simultánea en la que un mismo dispositivo se puede usar de emisor y receptor de datos al mismo tiempo. Esta versión apenas cambia el hardware así que es perfectamente compatible con la versión anterior.
- **Bluetooth v4.2.** Lanzada hace solo un par de años, a finales de 2013, es la versión de Bluetooth más actual implementada a día de hoy. La novedad que incorpora es la posibilidad de conectarse a Internet sin necesidad de Wi-Fi. Introduce, además, un nuevo cifrado FIPS para asegurar la información. Es la versión que incorporan ya se incorporan en los últimos Smartphones tales como el nuevo iPhone 6s o el Samsung Galaxy S7.
- **Bluetooth v5.0.** Hace solamente un mes, Bluetooth SIG, anunció que la versión 5.0 del estándar Bluetooth llegará pronto. Se prevé a finales de año principios del 2017. Entre sus características, afirman que tendrá el doble de velocidad y que aumentará su alcance cuatro veces más del actual.

Si se observa, se puede ver una gran evolución de Bluetooth a lo largo de estos años. Esta evolución, obviamente se ha visto reflejada también en sus campos de aplicación. Bluetooth empezó a introducirse como sistema de comunicación entre en enlace de dispositivos móviles. Tener un manos libres para poder realizar llamadas a principios de los 90, era lo mas novedoso del momento. Fue ahí donde mas auge tuvo Bluetooth.

A partir de ese momento, su evolución fue exponencial. Tanto que se introdujo en el ámbito de la robótica. Se pensó como alternativa a sistemas infrarrojos ya que un objeto entre medias de receptor y emisor, no haría caer el enlace. Los primeros *Tool Kit* para una comunicación Bluetooth fueron los fabricados por Ericson. En [19] y [20] se utiliza esta plataforma para una comunicación entre PC y robot. Además en ambos proyectos, se ha creado una interfaz gráfica para poder visualizar lo mismo que el robot, incluso mediante diversos botones, poder modificar ciertos parámetros como la dirección o el grado de los sensores.

En cuanto a robótica cooperativa, Bluetooth también está muy presente. Y se debe en gran parte a que puede formar comunicaciones multipunto con un máximo de 7 nodos mas (8 en total). Por ejemplo, en [3] se establece una comunicación entre dos robots móviles incorporando un microcontrolador y un módulo Bluetooth en cada uno de ellos. En este caso, es un PC quien le da una orden de movimiento a uno de los robots que, una vez realizada, se la envía al segundo robot para repetirla.

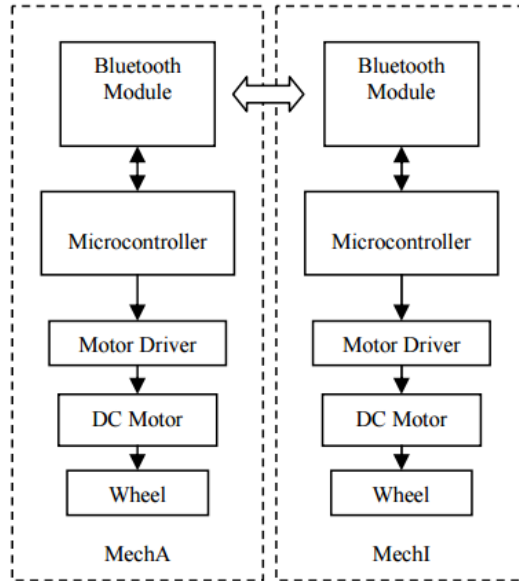


Figura 2.10: *Arquitectura de los robots del experimento [3].*

Por otro lado, en [21], se presenta robots de rescate donde la novedad es la integración de las comunicaciones Bluetooth y Wi-Fi de manera simultanea en el mismo robot. Para ello, se utiliza Arduino donde se integran los dos módulos. Es este caso los dos tipos de comunicaciones se compaginan. Por un lado se sube una aplicación (que contiene diferentes botones para controlar el robot) a Internet donde mediante Wi-Fi es posible visualizarla y posteriormente, mediante Bluetooth pulsando los botones de la aplicación, se transmiten las órdenes a los módulos Bluetooth de los distintos robots.

2.4.2. Sistema Wi-Fi

Por su parte, Wi-Fi es otro sistema de comunicación inalámbrico diseñado sobre todo para redes de área local WLAN (Wireless Local Area Network), el cual, igual que con Bluetooth, permite a diferentes dispositivos electrónicos el intercambio de datos usando ondas de radio. Además, esta tecnología permite conexiones muy rápidas y seguras debido a diversos mecanismos de seguridad. Otra ventaja de su uso es el alcance, cuya distancia máxima de cobertura que puede alcanzar, está entre los 90 y 100 metros [22].



Figura 2.11: *Logotipo corporativo de Wi-Fi.*

Se puede decir que la **infraestructura** de una red Wi-Fi se compone de tres elementos esenciales: estaciones, puntos de acceso y medio inalámbrico. El objetivo siempre será la transmisión de datos entre las distintas estaciones de la propia red y de otras redes conectadas a la esa misma. Las **estaciones** son los dispositivos electrónicos que los usuarios utilizan para conectarse a la red, y han de tener una interfaz de red compatible con el **estándar IEEE 802.11** [23]. El **medio**, es en este caso, el espacio libre por el que se transmiten las ondas electromagnéticas que llevan la información. Los **puntos de acceso** actúan como enlace entre el medio y el sistema de distribución que nos comunicará con la red.

La norma 802.11, que pertenece al grupo de estándares IEEE 802, explica el uso de las dos últimas capas del modelo OSI: la capa física y la capa de enlace de datos. Dentro de la primera, se han ido estableciendo varias especificaciones [24] en función del tipo de modulación empleada o la frecuencia de transmisión. Entre todas ellas, se pueden destacar las siguientes:

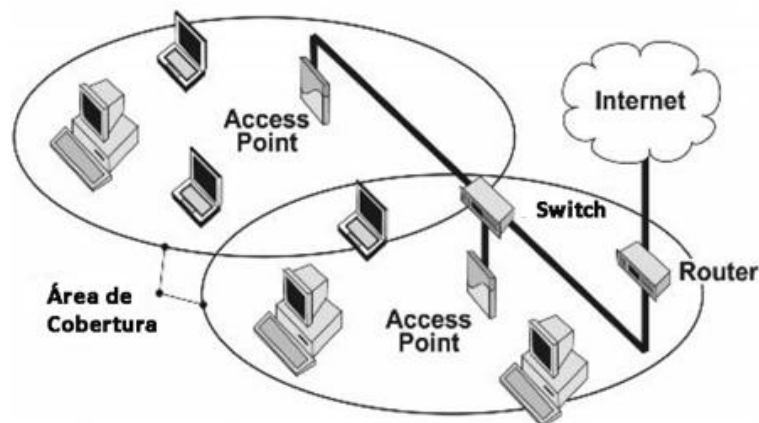


Figura 2.12: *Infraestructura de una red Wi-Fi*

- **802.11 legacy.** Es la primera versión original de Wi-Fi que se publicó en 1997. Con velocidades de 1 y 2 Mbps, las señales se transmitían vía infrarrojos.
- **802.11a.** Un par de años mas tardes se aprobó este nuevo estándar. El 802.11a trabaja en la banda de frecuencias de 5 GHz y aunque sus velocidades teóricas puedan llegar a 54 Mbps, tiene velocidades reales en torno a los 20 Mbps. Es capaz de soportar 64 usuarios por cada punto de acceso con 64 portadoras OFDM.
- **802.11b.** El estándar 802.11b sin embargo, trabaja en la banda de 2.4 GHz con velocidades de 11 Mbps, que en la realidad están en torno a los 6 7 Mbps. Utilizando modulaciones de espectro ensanchado de tipo DSSS, es el tipo de tecnología Wi-Fi **mas extendida**.
- **802.11g.** La incompatibilidad de los sistemas anteriores lleva en 2003 a la creación de este estándar, que al igual que el 802.11b trabaja en la banda de 2.4 GHz aunque alcanzando velocidades de 54 Mbps (22 Mbps reales). Utiliza tecnología OFDM, pero también es capaz de implementar la tecnología DSSS del estándar 802.11b. Es compatible con el estándar 802.11b, pero no con el 802.11a. Sin embargo, el uso combinado de los estándares 802.11b y 802.11g en dos dispositivos distintos, provoca que la velocidad de transmisión se reduzca a la del de menor tasa binaria.
- **802.11n.** Cinco años mas tarde, en Septiembre de 2009 se creó este nuevo estándar. La principal diferencia radica en que puede trabajar en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz

simultáneamente, por lo que es compatible con cualquier dispositivo basado en versiones precedentes de Wi-Fi. Aumenta el límite teórico a 600 Mbps aunque el estable ronda los 80-100 Mbps. Incorpora además la tecnología MIMO (Multiple input Multiple output) permitiendo utilizar varios canales a la vez para el envío y recepción de datos.

- **802.11ac.** Es una mejora del estándar anterior lanzada al mercado en Enero de 2014. Mejora la tasa de transferencia teórica de 1.3Gbps y reales de hasta los 433 Mbps. Opera en la banda de 5Ghz evitando así interferencias con otras redes Wi-Fi y además introduce el denominado *Beamforming* capaz de focalizar la señal de radio, reconociendo elementos que puedan bajar el rendimiento (muros, paredes..) y evitándolos en la manera de lo posible. Actualmente es el estándar que incorporan la mayoría de los nuevos smartphones de las grandes compañías.
- **802.11ad.** Es el estándar más reciente. Al ser multibanda, es capaz de llegar a una velocidad de 800 Mbps en 2.4 GHz, 1.7 Gbps en 5 GHz y de 4.5Gbps en 60 GHz. Fue aprobado a finales de 2014, pero no ha sido hasta este año, en Enero de 2016 ha sido introducido al mercado. El primer router del mundo con 802.11ad lo ha lanzado **TP-Link** con *Talon AD7200*. Por su parte, la marca **Acer** ha hecho lo mismo con los portátiles, siendo *TravelMate P648* el primero del mundo. En cuanto a los smartphones, la firma israelí **Sirin Labs** ha desarrollado *Solarin*, el primer smartphone con ese estándar, siendo además, el smartphone más caro del mundo.
- **802.11ah y 802.11ax.** Son los próximos estándares que lanzará WIFI Alliance. Lo que se sabe por el momento es que 802.11ah podrá operar en la banda de 900Mhz y que 802.11ax pretende llegar a velocidades de 10Gbps. Aunque aún se tendrá que esperar pues hasta 2016 y 2019 respectivamente no se prevén su lanzamiento.

La gran diferencia de Wi-Fi respecto a los otros sistemas de comunicación radio, es su capacidad de canal. Por ello, por ejemplo, en [25] se realiza un robot móvil detector de obstáculos con cámara de vídeo. Se realiza la implementación de un módulo Wi-Fi en la placa Arduino del robot con el objetivo de que, mediante el sistema de comunicación Wi-Fi, se transmitan las imágenes de lo que la cámara del robot ve en directo.

Wi-Fi también ha sido utilizado en numerosos experimentos para la localización de robots. En [26] se ha diseñado una red inalámbrica para la localización de varios robots. El procedimiento para su localización es un poco complejo [27], pero considerando que la potencia de señal recibida (RSSI) de los robots varía dependiendo del lugar en el que esté, usando métodos de probabilidad, se puede llegar a estimar su posición.

2.4.3. Sistema Zigbee

ZigBee es un protocolo de comunicación inalámbrico basado en el nivel físico PHY, y en el control de acceso al medio MAC definidos todos ellos en el standard IEEE 802.15.4. Este estándar se realizó para el desarrollo de redes de área personal con baja tasa de transferencias (LR-WPAN, *Low Rate-Wireless Personal Area Network*), mayoritariamente en redes de sensores donde esa baja tasa de envío de datos no es un problema ya que lo que persigue es una comunicación fiable. Por lo tanto, en principio el ámbito donde se prevé que esta tecnología cobre más fuerza sea en el campo de domótica [28] [29]. El protocolo ZigBee se caracteriza además por su bajo coste, bajo consumo y facilidad y sencillez de instalación.



Figura 2.13: Logotipo corporativo de ZigBee.

De acuerdo con su funcionalidad, todos los dispositivos ZigBee pueden ser clasificados según:

- **Dispositivos de funcionalidad Completa (FFD):** Los dispositivos FFD, llamados también *nodos activos*, debido a su capacidad de computar, implementa un modulo general de comunicación que le permite establecer intercambio ya sea con RFD o con otro FFD. Además, los FFD, pueden operar como coordinador, router o incluso como dispositivo final de interfaz con el usuario.
- **Dispositivos de funcionalidad Reducida (RFD):** o *nodos pasivos*, sin embargo no pueden comunicarse con ellos mismos, solo con un FFD. Básicamente, estos dispositivos actuarán como sensores de la red.

Además, las redes ZigBee [30] pueden estar formadas por tres tipos de elementos que, dependiendo del rol que desempeñen en la misma, se pueden dividir en:

- **Coordinador Zigbee, ZC:** Es el dispositivo más complejo de la red. Solo hay un Coordinador en cada red Zigbee y su función principal es la de iniciar la formación de la red y controlarla asignando parámetros como las direcciones de red. Una vez creada, la función del Coordinador será la misma que la de los Routers, encaminar los mensajes a los distintos dispositivos. Son dispositivos de funcionalidad completa, FFD.
- **Router Zigbee, ZR:** Es un componente opcional de la red cuya función principal es la de interconectar dispositivos separados, enrutando sus mensajes para que lleguen al nodo destino. Además, se suelen emplear para expandir la cobertura de la red y crear nuevas rutas de comunicación. Son también dispositivos de funcionalidad completa, FFD.
- **Dispositivo final Zigbee, ZER:** Son nodos que solamente se limitan a comunicarse con su nodo padre ya sea este router o coordinador. Estos dispositivos de funcionalidad reducida, RFD, no participan en tareas de transmisión de información hacia otros dispositivos.

En el caso de la tecnología ZigBee, a diferencia de la Bluetooth por ejemplo, es posible implementar redes de control y automatización con 3 tipos de topologías distintas (ver figura 2.14):

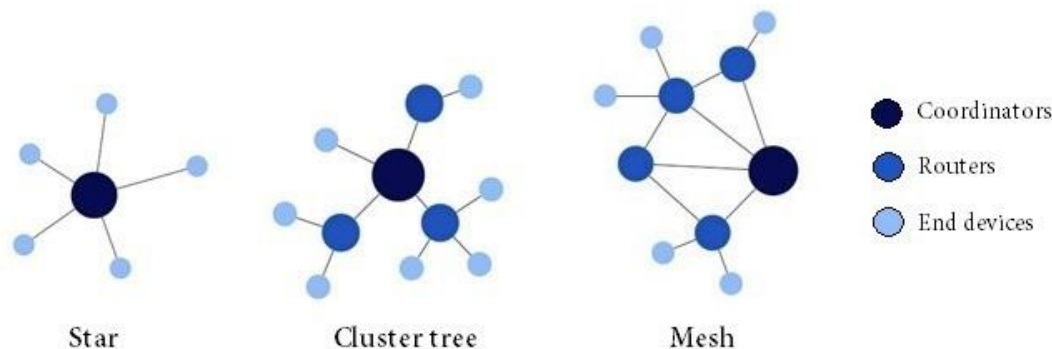


Figura 2.14: Topologías de una red ZigBee.

- **Red Mesh (Malla).** Formadas por un coordinador, routers y dispositivos finales, las redes en forma de malla establecen una comunicación con cualquier otro dispositivo mediante routers, los cuales actúan como repetidores. Una ventaja de esta topología de red es que no depende de un camino único, por lo que si en un momento dado, un nodo se cae, la comunicación no se interrumpe ya que dispone de otros caminos alternativos al primario. Como inconvenientes, la complejidad y computación de la red a la hora de elegir el camino más adecuado.
- **Red Cluster Tree (Árbol).** Es una estructura propiamente jerárquica. Está formada por un coordinador y varios dispositivos routers de los que a su vez, pueden estar unidos otros dispositivos 'hijos'. Estos últimos por su parte, pueden ser dispositivos finales o actuar como router de más hijos. Al igual que la estructura de red, esta topología favorece a la expansión de la red.
- **Red Star (Estrella).** Es también conocida como la comunicación punto-multipunto. Está formada por un coordinador central al que están conectados varios dispositivos finales. El inconveniente de este tipo de redes es el alcance máximo, pues dependerá del alcance del nodo coordinador.

Como se ha comentado anteriormente, la creación del protocolo ZigBee va más enfocada a domótica (como se puede observar en la mayoría de los documentos de ZigBee Alliance). Sin embargo, ZigBee resuelve algo que ni Bluetooth ni Wi-Fi lo habían conseguido: crear redes grandes a bajo coste. Así es como se empezó a integrar ZigBee como opción en redes de robots cooperativos.

En [31] se explica como se ha desarrollado una red de robots mediante comunicación inalámbrica ZigBee. En este caso, la comunicación se hace por un microchip MG2455 de la compañía Radio Pulse. En este caso, la comunicación puede alcanzar los 300 metros y además se pueden elegir tres velocidades distintas de operación. Se han hecho pruebas punto a punto donde uno de los robots ayudaba al otro acercando y alejándole objetos.

También se puede encontrar como este sistema de comunicación se extiende para más de dos robots. En [4] se ha diseñado un equipo de robots, en concreto cuatro (como se puede ver en la figura 2.15) y se han evaluado todos los aspectos de ZigBee sobre ellos. Mediante algoritmos, se ha calculado la distancia entre los mismos además de su posicionamiento por trilateración (como funcionaría un GPS).



Figura 2.15: Red de robots cooperativos mediante comunicación Zigbee referida al estudio [4].

2.5. Sistemas Telefonía Movil

No cabe duda, de que uno de los aspectos fundamentales en el avance de la robótica ha sido el nacimiento de Internet. Y más aún cuando se ha implementado Internet en teléfonos móviles. Sobretudo lo que ha supuesto ha sido grandes ventajas en términos de alcance, velocidad, accesibilidad y comodidad.

Por ejemplo, en escenarios de aplicación como el control remoto, ha sido posible desarrollar proyectos de alarmas o sistemas de seguridad, todo ellos controlados a distancia. En esta sección lo que se explicará a continuación, será la evolución de estos sistemas de comunicación, cómo es su integración en robóts, los usos actuales de los mismos y las aplicaciones en ambientes de robótica cooperativa existentes.

2.5.1. Sistema GSM

GSM es la abreviatura de 'Sistema Global para las Comunicaciones Móviles' (en inglés, Global System for Mobile Communications) y constituye un estándar mundial para teléfonos móviles. El principal objetivo de GSM fue la unificación telefónica de forma que una persona pudiera recibir y realizar llamadas desde el mismo dispositivo móvil en cualquier parte del mundo.

En Europa, el sistema GSM utiliza la banda de frecuencia de 900 MHz. En total hay 13 bandas más definidas, aunque son solo otras 3 las bandas de frecuencia mayoritarias siendo 850, 1800 y 1900 MHz como se puede ver en la tabla 2.2. Es por ese motivo todos los teléfonos móviles del mercado tienen la característica de ser *cuatribanda*.

Banda	Nombre	Canales	Uplink (Mhz)	Downlink (MHz)	Principal Uso
GSM 850	GSM 850	128 - 251	824,0 - 849,0	869,0 - 894,0	EE.UU, Asia y Sudamérica
	P-GSM 900	0 - 124	890,0 - 915,0	935,0 - 960,0	Europa
GSM 900	E-GSM 900	974 - 1023	880,0 - 890,0	925,0 - 935,0	
	R-GSM 900	n/a	876,0 - 880,0	921,0 - 925,0	GSM para trenes
GSM 1800	GSM 1800	512 - 885	1710,0 - 1785,0	1805,0 - 1880,0	
GSM 1900	GSM 1900	512 - 810	1850,0 - 1910,0	1930,0 - 1990,0	Norteamérica

Tabla 2.2: *Principales bandas de frecuencia GSM.*

Se le conoce también como 2G (estándar de segunda generación), donde su principal diferencia respecto a su predecesor, 1G o primera generación de teléfonos móviles, es que tanto los canales de voz como las señales son totalmente digitales (la llamada es cifrada cuando se utiliza 2G). Además, GPRS (General Pocket Radio Service) se corresponde con la generación 2,5 y UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) es la tercera generación conocida como 3G, pero eso ya se verá posteriormente.

La aplicación de este sistema en robótica cooperativa se puede realizar de distintas formas. En [32] se explica la comunicación entre un terminal móvil de un usuario y un robot mediante la colocación a este último de un módulo GSM (TC65 de Siemens). El control remoto del módulo se hace mediante **Comandos AT**, un lenguaje de comunicación diseñado originariamente para módems y del que se hablará en profundidad en la sección 4.1.2. También se puede realizar una aplicación mediante Java ME como en [33].

Otros estudios realizados [34] demuestran la comunicación realizada esta vez mediante marcación por tonos DTMF en un Vehículo Terrestre no tripulado (UGV).

2.5.2. Sistema GPRS

Más tarde, nació la segunda generación de teléfonos móviles. El servicio general de paquetes vía radio, o General packet radio service (GPRS) es la evolución del Sistema Global de Comunicaciones Móviles (GSM). GPRS ofrece una transmisión de datos que va desde los 56Kbps hasta los 114 Kbps, mucho más rápida que la de una red GSM que iba en torno a los 9.6Kbps.

La aportación más novedosa de este nuevo sistema es que, GPRS extiende la arquitectura del estándar GSM, pasando de la conmutación de circuitos (donde el circuito está permanentemente reservado mientras dure la comunicación, aunque no se envíe información en un momento dado) a la conmutación de paquetes (método de comunicación en la cual los caminos por los que viaja la información los determinan cada paquete y por lo tanto, dichos los caminos pueden ser diferentes para cada paquete).

La tecnología GPRS permite además al usuario de un teléfono móvil, hacer una llamada telefónica al mismo tiempo que transmitir datos. Esto se debe para acceder a la red de datos, el estándar GPRS utiliza el protocolo IP, mientras que para transmitir voz, emplea la arquitectura de la red GSM. Al ser la velocidad de transmisión bastante mayor a la de GSM, se permite un rango más amplio de movilidad. Además, existen en la actualidad numerosas placas compatibles con la tecnología GPRS, por lo que, su uso para la aplicación en comunicación de robots, está más que justificada.

Por ejemplo, se ha realizado una combinación de transferencia de datos con GPRS y de

medidas de posicionamiento con GPS (Ver figura 2.16). Con unión de estos dos sistemas se ha logrado crear un robot [5] que realiza tareas de navegación y rastreo en la simultáneamente se envían y reciben datos (como las fotos de la cámara) y se sabe en cada momento la ubicación del robot.

Por otro lado, y como novedad en aplicaciones militares, también se ha utilizado la comunicación GPRS. En este caso [35] ha sido para monitorizar la velocidad y la dirección de un robot.

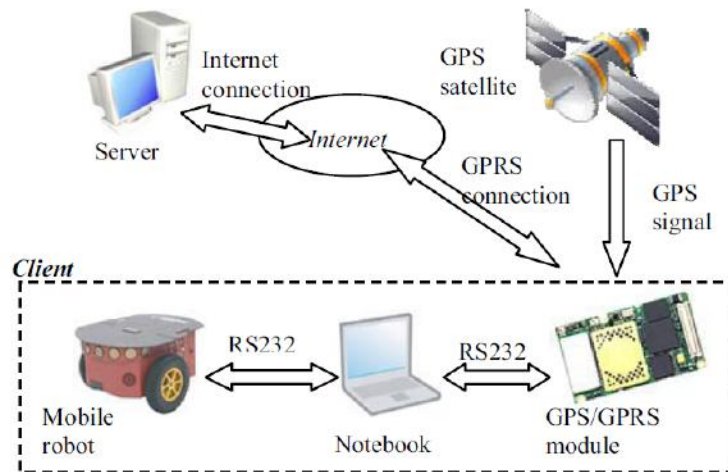


Figura 2.16: *Arquitectura del robot realizado en el estudio [5].*

2.5.3. Sistemas 3G y 4G

La tercera generación de telefonía, 3G es la evolución de GPRS pasando por EDGE (2.5G). Respecto a GPRS, 3G ofrece una mejora de las antenas, conexiones mas fiables, mayor calidad de la voz y sobre todo, una mayor velocidad de transferencia de datos que va desde los 384kbps, pudiendo alcanzar hasta 2Mbps [36]. Debido a esta mayor velocidad, aparecieron aplicaciones de comunicaciones vídeo en tiempo real. Por otro lado, aumenta la seguridad de la red y permite además autenticar a la que se está conectando, de manera que se asegura que no es una imitación.

Con el paso del tiempo y la necesidad de dar soporte al incremento del uso de datos, 3G lanzó una actualización de las redes y surgió la tecnología HSPA (High Speed Packet data Access) donde mejoraba claramente las tasas de transferencia llegando a límites teóricos de 14Mbps de bajada y 7Mbps de subida. Además, años después, se introdujo otra actualización, HSPA+ la cual permitía transportar más información en el mismo ancho de banda. Las tasas de bajada y subida son 22Mbps y 84Mbps respectivamente.

Por su parte, 4G, es el estándar de comunicaciones móviles mas moderno que hay en la actualidad. Esta basado completamente en el protocolo IP. Utiliza la tecnología LTE (Long Term Evolution) y como en 3G, su principal característica es proveer de velocidades de transferencia altas, en este caso, se pueden alcanzar alrededor de los 300Mbps (bajada) y los 86Mbps (subida). Es por tanto fácil imaginar, que con tal tasa de transferencia de datos, el abanico de posibilidades de aplicaciones en el mundo de la robótica es bastante amplio.

Por ejemplo, en [37] se ha creado una red de robots entre UAVs y UGVs (seis en total). En este caso, tanto los robots aéreos como terrestres, están provistos de cámaras con las que el

usuario puede ver en streaming todo aquello que los robots ven. Así, con los UGVs, se pueden realizar tareas de reconocimiento del terreno y con ayuda de los UAVs se puede una visión aérea global de la posición de cada uno de los robots terrestres.

También se han utilizado conjuntamente con otro sistema de comunicación. En [6], se ha diseñado un conjunto de robots mediante 3G para trabajar en áreas volcánicas. Debido a que en este tipo de zonas, la señal 3G puede ser bastante débil, se ha implantado módulos Wi-Fi en los robots de manera que, si un usuario pierde comunicación 3G con un robot (Ver figura 2.17), este robot se comunicará automáticamente por Wi-Fi con su robot mas cercano y este último a su vez con el usuario.

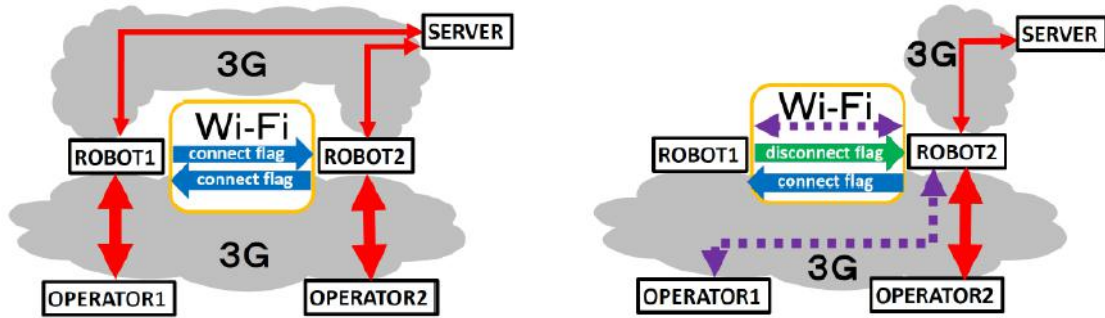


Figura 2.17: Diseño de la red implementada en el estudio [6].

3

Diseño

El presente capítulo, se divide en dos partes. En la primera parte se hace un análisis más exhaustivo de los distintos tipos de sistemas de comunicación presentados en el capítulo anterior. Por tanto, se explicarán las ventajas e inconvenientes de utilizar cada sistema, y posteriormente, en base a las necesidades del desarrollo, se elaborará una clasificación cuyo objetivo final será la elección de varios sistemas de comunicación distintos que serán los que más se ajusten a nuestras necesidades y se implementará en el capítulo sucesivo. En la segunda mitad, se describe el diseño de cada uno de los sistemas de comunicación anteriores, explicando teóricamente, cómo sería la implementación de los mismos en la práctica. A su vez, se proponen también un par de ejemplos de componentes y módulos reales para su futura y/o posible implementación real.

3.1. Necesidades de Aplicación en Robots Cooperativos

3.1.1. Comparativa entre sistemas de IR, FSO y Ultrasonidos

Como hemos visto en el capítulo anterior, los **sistemas infrarrojos** son una alternativa bastante atractiva para ambientes de interior. Las señales infrarrojas se caracterizan por su amplio ancho de banda que puede llegar a transmitir señales con velocidades desde **9.6Kbps** hasta los experimentales **16Mbps**. Otra característica importante es que como consecuencia de su alta frecuencia, en torno a los 10 elevado a 14 Hz, los infrarrojos presentan una fuerte **resistencia a interferencias** electromagnéticas radiadas por cualquier otro dispositivo.

Además, estamos ante un sistema con un **bajo consumo de potencia**, ya que este se encuentra en torno a los 10mA, (probablemente el consumo más bajo de todas las sistemas propuestos) y la utilización de componentes bastante económicos.

Por otro lado, como principal **desventaja** tenemos que, al no poder atravesar objetos, los sistemas infrarrojos pueden ser increpados por cualquier obstáculo, interrumpiendo así la comunicación. Además también son muy sensibles a interferencias externas, y los factores atmosféricos (niebla, lluvia, incluso luz solar), pueden llegar a introducir atenuación en la señal.

Otra característica es su limitación de alcance. A parte que es preferible tener una línea de visión entre emisor y receptor, los sistemas infrarrojos se sitúan en una cobertura máxima de 5 metros, y aunque hay algunos que pueden llegar a los 8 metros, lo normal es que la mayoría de los emisores infrarrojos se sitúen en torno a 1-2 metros de alcance.

En cuanto a los **sistemas FSO** se trata (recordamos Free Space Optical communication), la principal ventaja es la **sencillez de su instalación** (que no implementación). Además la infraestructura es relativamente barata, eso sí, se necesita que haya visión directa entre los transmisores y receptores. Otro aspecto positivo es que, al trabajar en el espectro óptico, a pesar de que los haces no puedan atravesar objetos opacos, si pueden hacerlo con cristales. Por lo que esto permite colocar los transmisores y receptores en el interior de los edificios, permitiendo así no tener atenuación de la señal por viento, entre otros factores.

En cuanto a la **seguridad**, los sistemas FSO presentan una serie de ventajas interesantes: Los haces láseres no pueden ser detectados mediante analizadores de espectro ni detectores de potencia RF. Además, la información a transmitir, como en el resto de comunicaciones digitales, es de forma cifrada lo que aumenta aun mas la seguridad de lo que transmitimos.

La principal **desventaja de las FSO**, al igual que en los sistemas infrarrojos convencionales, es su **alta vulnerabilidad** frente a los factores atmosféricos. Por ejemplo, la atenuación de la señal será muy grande en condiciones de niebla. Esto es un factor importante a tener en cuenta ya que no invalida el sistema de comunicación pero sí puede ser rechazado por otras alternativas. Por otro lado, para que el enlace funcione adecuadamente, tanto receptor como emisor tienen que estar perfectamente alineados, ya que cualquier mínimo movimiento, haría caer el enlace, por lo que se debe tener en cuenta el movimiento de los edificios, aunque hoy en día, los equipos ya vienen preparados para tolerar dichos movimientos. Otra característica que comparte con los sistemas infrarrojos.

Como normalmente la ubicación de este tipo de sistema, se encuentra en el tejado de los edificios, las desventajas crecen. Debemos tener en cuenta la obstrucción del enlace por varios factores, como por ejemplo, pájaros (algo inevitable) o interferencia con la luz solar. Esta última, al ser el Sol, también emisor de radiación en el espectro infrarrojo (donde trabajan las FSO) introduciría ruido al sistema, del que para evitarlo, se necesitaría introducir unos filtros que eliminasen toda potencia no deseada.

Una de las principales ventajas de los **sistemas por ultrasonidos** es la detección del objeto independientemente del color del que este sea. Además, y a diferencia de otros sensores de proximidad como X, también es capaz de detectar objetos transparentes como botellas de plástico o vasos de vidrio.

Por otro lado, su **consumo** de potencia es **bastante bajo**. En sensores como SRF08 o SRF10 [38], se ha podido comprobar como su consumo es en torno a los 15mA cuando está funcionando y solamente 3mA en estado de reposo. Otro aspecto a tener en cuenta es que estos sensores son relativamente insensibles a la suciedad y al polvo.

Como **contrapartida** de usar sensores por ultrasonidos es que no permite saber que se está detectando ya que solamente detecta los objetos, no su forma y tamaño. Tampoco puede detectar objetos inclinados, ya que el sonido se desvía, o materiales como telas, que absorben el sonido. Además, aunque el alcance sea mayor que los dispositivos infrarrojos, sigue siendo muy reducido (6metros) si bien modificando la ganancia, podría llegar a los 10m.

Otra desventaja podría ser el caso de usar este tipo de sensores en robots grandes, ya que no bastaría con un solo sensor ultrasónico para abarcar todo el perímetro del robot, y necesitaríamos de más de un sensor para ello. Y en cuanto al precio, estos sensores normalmente suelen ser más

	Infrarrojos	FSO	Ultrasonidos
Velocidad	9.6 kbps	100 Mbps	160 Mbps
Alcance	5 m	500 m	6 m
Consumo	9.5 mA		15 mA
Vulnerable	Objetos	Atmosféricas	Objetos
Interferencias			Sólicos

Tabla 3.1: Comparativa entre sistemas IR, FSO, US

caros que otros sensores de proximidad, como por ejemplo, los ópticos.

3.1.2. Comparativa entre sistemas Bluetooth, Wi-Fi y ZigBee

Para trabajar con robots que tienen que llevar a cabo operaciones durante horas, lo recomendable es que tanto los componentes que tengan, como el sistema empleado no consuma demasiados recursos. El **sistema Bluetooth** es el sistema adecuado para trabajar en entornos móviles, ya que, aunque su consumo sea mayor que el de sistemas como ultrasonidos o infrarrojos, sigue siendo bastante bajo, **40mA** [15]. Bluetooth además permite una comunicación bidireccional, por lo que con un solo módulo en cada robot, se podría establecer una comunicación entre ellos. Puede permitir también enviar feedbacks tales como fotos o imágenes.

Otro aspecto a tener en cuenta es la posibilidad de comunicación simultánea con múltiples robots. La tecnología Bluetooth, sobre todo en sus versiones más actuales, también permite al usuario comunicarse con más de un robot al mismo tiempo. Es más, los dispositivos Bluetooth pueden comunicarse con un máximo de **7 dispositivos a la vez**. Este aspecto puede ser muy positivo cuando el usuario quiere enviar un mismo comando a diferentes robots en vez de enviarlo a cada uno de ellos de manera individualmente. En cuanto a la disponibilidad, hoy en día, casi la mayoría de teléfonos móviles y ordenadores, vienen con un módulo Bluetooth incorporado. Por lo que solamente es necesario comprar otro módulo para el robot ya que el operador puede hacer uso de su teléfono móvil u ordenador para controlarlo. Este aspecto, no solo reduce el coste de comprar más módulos Bluetooth sino que hace la vida más fácil al operador al permitir comunicarse con el robot desde su teléfono móvil.

Si hablamos de sus **contras**, la principal desventaja de este sistema con respecto a otros sistemas similares es su **velocidad** de transmisión que es **relativamente baja** (1Mbps) en comparación con por ejemplo un módulo Wi-Fi convencional, que es diez veces mayor (cerca de los 11 Mbps). Esto es, sin duda, un aspecto que se podría mejorar en un futuro. Por otro lado, la seguridad de los sistemas Bluetooth no es tan buena como la de otros sistemas: se admite un código pin corto, solo se autentifica el dispositivo y no al usuario (por lo que no se protege de ataques de suplantación de identidad).

La principal **ventaja de usar Wi-Fi** frente a otro tipo de tecnología es su velocidad de transmisión. En cuanto a tecnologías inalámbricas de corto alcance, probablemente sea Wi-Fi la que mayor velocidad de transmisión tenga. Desde el primer protocolo 802.11b donde llegaba a alcanzar **11Mbps**, hasta los más actuales como 802.11n donde puede llegar a alcanzar velocidades teóricas de 540Mbps o el protocolo mejorado 802.11ac donde las velocidades teóricas alcanzan los 1.3Gbps.

Al igual que en la tecnología Bluetooth, Wi-Fi permite una comunicación bidireccional entre el usuario y el robot. Y como normalmente la transmisión y la recepción no se realizan simul-

táneamente sino que de forma alternativa, la comunicación será denominada como bidireccional semiduplex. Además, otra ventaja que comparte con Bluetooth es la de que la mayoría de los dispositivos móviles hoy en día, vengan con un módulo WiFi integrado. Por otro lado, el rango de alcance es mayor que en los demás tipos de sistemas. Y según el tipo de protocolo utilizado, la distancia será aun mayor pudiendo llegar a 1000 metros.

Si hablamos del consumo, claramente en Wi-Fi se tiene un consumo mucho mas elevado comparado con las demás tecnologías. Solamente con el módulo Wi-Fi activo en modo espera (sin transmitir) estaríamos rondando el consumo del Bluetooth en activo (13mA). Si se tiene en transferencia máxima, este dato podría llegar a los 250mA. Eso si, el coste de estos módulos es bastante mas elevado que el de Bluetooth o Zigbee entre otros.

Los **sistemas ZigBee** a diferencia de las tecnologías anteriores, tiene un consumo de **30 mA** transmitiendo y de $3 \mu\text{A}$ en reposo, que si lo comparamos con sus competidores, es bastante menor. Este menor consumo se debe a que el sistema ZigBee se queda la mayor parte del tiempo en reposo (dormido). Otro aspecto positivo es la seguridad ya que Zigbee utiliza un protocolo de encriptación para evitar intrusiones en la red. En cuanto al precio, los módulos Zigbee son los transmisores inalámbricos más baratos en cuanto a tecnología inalámbrica de corto alcance se habla. En comparación con la Bluetooth que solo podía conectarse con un máximo de 8 dispositivos, utilizando Zigbee y debido a su tipología en forma de malla, se puede llegar a coexistir un máximo de **65000 nodos**.

Como contrapartida está su velocidad de transmisión que, a diferencia de las tecnologías anteriores, es de solamente **256Kbps** teóricos. Además, al pertenecer Zigbee a redes de tipo WPAN (Personal Area Network) tiene **menor cobertura** que otro por ejemplo Wi-Fi que pertenece a redes de tipo WLAN (Local Area Network).

	Bluetooth	Wi-Fi	ZigBee
Velocidad	1 Mbps	11 Mbps	250 kbps
Alcance	10 m	100 m	90 m
Consumo	40 mA	250 mA	30 mA
Red	WPAN	WLAN	WPAN

Tabla 3.2: Comparativa entre sistemas Bluetooth, Wi-Fi y ZigBee

3.1.3. Comparativa entre sistemas GSM, GPRS y 3/4G

La principal característica de comparación de **GSM** es que, al ser **conmutación por circuitos**, el retardo es menor que en la conmutación de paquetes. Otra característica es su **alta eficiencia**. Cuando se establece un enlace entre 2 terminales, se crea un 'paso físico' entre ellos, de manera que ocupa un canal de comunicación que se mantiene reservado hasta que finalice la conexión. Por tanto, el ancho de banda requerido para la transmisión, siempre estará disponible.

Como **contrapartida** está el hecho de que, obviamente, es poco eficiente el dedicar ese ancho de banda ocupado aun cuando no se requiera. Por otro lado, aunque el retardo sigue siendo menor, existe un **retardo adicional** debido al tiempo de establecimiento y cierre de conexión.

Los **sistemas GPRS**, aprovechan mejor el ancho de banda disponible. En este caso, ya que no es necesario que un canal de comunicación sea utilizado exclusivamente para la transmisión de un punto a otro. Además, permite cambiar la velocidad pudiendo recibir datos a una velocidad y

transmitir a otra distinta (que suele ser mas baja). Al ser **conmutación de paquetes**, permite un mejor manejo de la congestión. Puede incluso seguir asimilando datos aun cuando todos los recursos estén ocupados, siendo capaz además de establecer prioridades.

Aunque precisamente por lo anteriormente dicho, tiene unas desventajas claras. La conmutación de paquetes conlleva un **retardo mayor que en conmutación de circuitos** (debido a las colas de espera en cada nodo). Y, a pesar de que pueda manejar bien la congestión, puede llegar un momento en el que acepte muchos mas paquetes de lo que permita su capacidad haciendo que dicha congestión sea tal, que se desborde.

La clara ventaja de los sistemas por 3G y 4G es su velocidad de transmision, ya que se está hablando de valores de 3Mbps para 3G y casi 1Gpbs para 4G. Otra de las ventajas es el alcance que estos sistemas te permiten, pudiendo comunicarse a cientos de kilometros.

Como contrapartida se tiene que las redes que conforman los sistemas 3G y 4G son 'relativamente nuevas' y en algunos lugares (en la mayoría pueblos de montaña), la cobertura es insuficiente para disfrutar de ellos.

	GSM	GPRS	3G	4G
Velocidad	9.6 kbps	114 kbps	3 Mbps	100 Mbps
Comunicacion	Conmutación Circuitos	Conmutación Paquetes	Híbrido entre ambas	Conmutación Paquetes

Tabla 3.3: Comparativa entre sistemas GSM, GPRS y 3/4G.

3.1.4. Comparativa global entre los distintos sistemas estudiados

	Instalación	Alcance	Velocidad transmisión	Consumo Transmisión	Consumo Reposo	Coste
IR	Baja	1-5 m	2.4 kbps-16 Mbps	30 mA	9 mA	Bajo
FSO	Alta	50-500 m	10 Mbps-1 Gbps	30 mA	-	Alto
US	Alta	1-10 m	160 Mbps	35 mA	3 mA	Medio
Bluetooth	Media	1-15 m	9.6 kbps-23 Mbps	40 mA	0.2 mA	Bajo
Wi-Fi	Media-Alta	20-100 m	11-100 Mbps	250 mA	13 mA	Medio-Alto
ZigBee	Baja	1-100 m	250 kbps	30 mA	3 uA	Medio
GSM/GPRS	Alta	-	9.6-114 Kbps	200 mA	1.5 mA	Medio-Alto
3G/4G	Alta	-	380 kbps-1 Gbps	1.5 A	-	Alto

Tabla 3.4: My caption

Para concluir y como resumen global, se presenta la tabla anterior 3.4. En ella se puede ver una visión general de todas los sistemas de comunicación estudiados en el presente proyecto. Varias conclusiones se pueden sacar de dicha tabla.

- Los sistemas con sensores de **infrarrojos** convencionales, son los que **menor alcance** presentan de todos. Por su lado, FSO y Wifi son los de mayor alcance.
- En cuanto a velocidad de transmisión, claramente el sistema de 4G es que el ofrece las mejores prestaciones. Wi-Fi también es una opción interesante a implementar ya que combina una buena velocidad de transmisión con un buen alcance.

- Por su parte, infrarrojos y ultrasonidos, son sin lugar a dudas los mejores sistemas y más óptimos para detección de obstáculos en corto alcance.
- Bluetooth y Zigbee son ideales para trabajar con numerosos robots (ya que ofrecen poco consumo) y tanto su implementación como su velocidad son buenos (aunque mejorables).

3.2. Diseños Propuestos

3.2.1. Diseño Sistemas Ultrasonidos

Como se ha explicado en el capítulo anterior, un sistema por ultrasonidos no es más que aquel sistema formado por sensores ultrasónicos, donde en este proyecto en concreto, está aplicado en robots para su futura cooperatividad.

Dichos sensores ultrasónicos pueden presentar dos configuraciones diferentes:

- **Emisor y receptor unidos.** En los sensores de ultrasonidos en los que emisor y receptor están unidos, las ondas ultrasónicas son generadas con solo una membrana. El procedimiento (figura 3.1) es que, justo después de emitirse el tren de impulsos, se 'bloquea' la membrana para así poder escuchar el rebote de las ondas. Esta configuración requiere un tiempo de bloqueo por lo que, para distancias muy cortas, no es aconsejable el uso de dichos sensores.

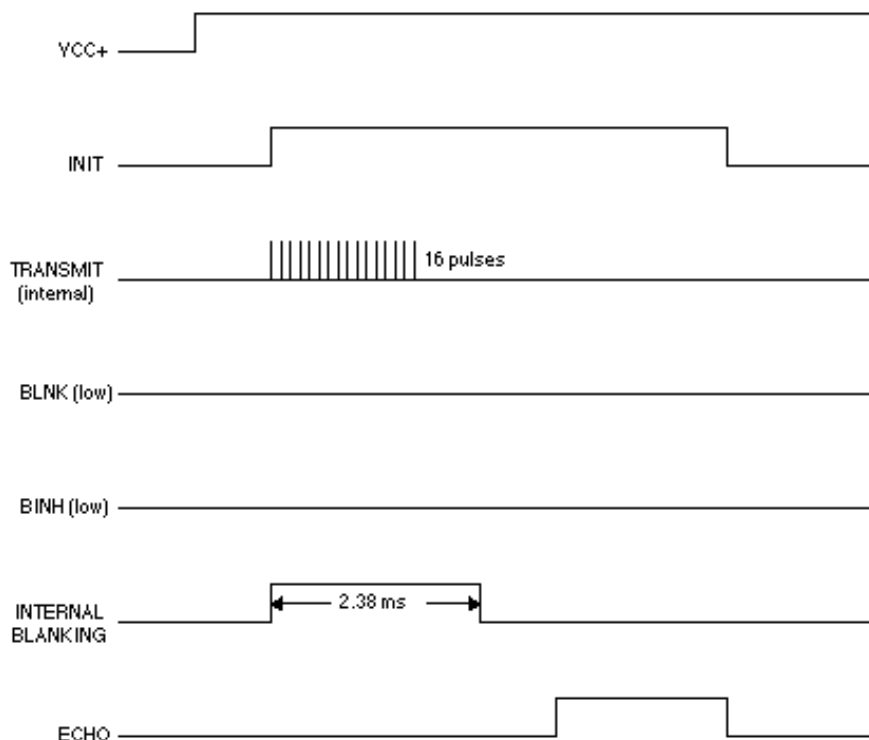


Figura 3.1: Diagrama de tiempo de sensores ultrasónicos con emisor y receptor juntos.

- **Emisor y receptor separados.** En este caso, una de las membranas es la encargada de emitir las ondas y la otra membrana, de escucharlas. En esta configuración (figura 3.2), la membrana receptora está diseñada a escuchar desde el mismo momento en que se acaba de emitir el tren de impulsos.

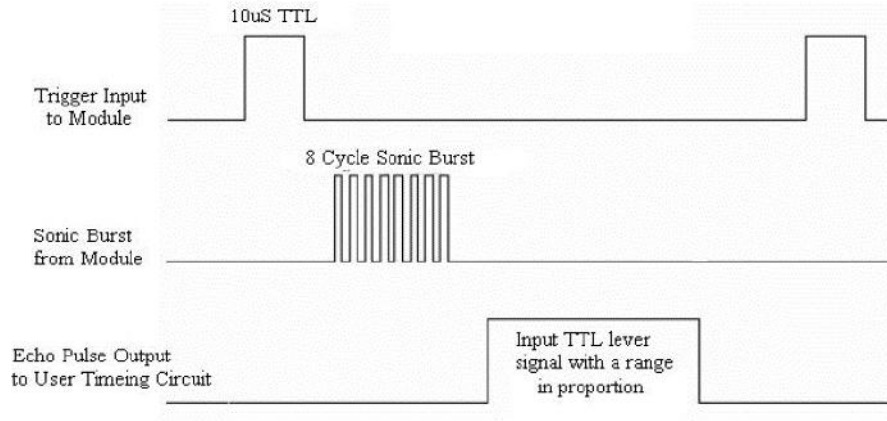


Figura 3.2: Diagrama de tiempo de sensores ultrasónicos con emisor y receptor separados.

Además, presentan también dos técnicas distintas de medición de distancias:

- **Cambio de fase.** El proceso es tan simple como mandar una onda periódica y recibir los ecos de forma continua. La distancia se calcula según el desfase entre las ondas.
- **Tiempo de vuelo.** En esta otra técnica, se emite un tren de impulsos y a su vez, se conecta un temporizador. Una vez se recibe el eco del tren emitido, el tiempo transcurrido es proporcional al doble de la distancia al obstáculo, ya que se tienen dos tiempos: el del impacto y el del eco.

El objetivo principal de la utilización de estos sensores es la de medir distancias. Con lo anteriormente descrito, se utilizarán dos transceptores de ultrasonidos, separando el emisor del receptor, y basándose en el tiempo que tarda la señal en salir del emisor, rebotar en el obstáculo y regresar reflejada hasta el receptor. Con la medición de dicho tiempo, se podrá calcular con precisión y exactitud la distancia entre el objeto y los transceptores. En [8] se hace un estudio aún mayor donde, en base a unos algoritmos, se determina la localización y orientación de varios robots en los planos 2D y 3D. En el mercado, se pueden encontrar varios sensores con estas especificaciones, de los que se destacan el SRF04 de Robot Electronics.

El sensor **SRF04** [38], es el más simple del mercado. Aparte de la alimentación, puede funcionar con solamente dos hilos donde, por uno de ellos se le envía el disparo (trigger) y por el otro se recibe el eco. El alcance efectivo de este sensor va desde los 3 centímetros hasta los 3 metros. Caracterizado además por su bajo consumo, el SRF04 puede colocarse fácilmente en cualquier microcontrolador. Además, como puede verse en la figura 3.4 tiene un cono de detección de **30 grados**, lo cual está bastante bien para robots de pequeño tamaño.

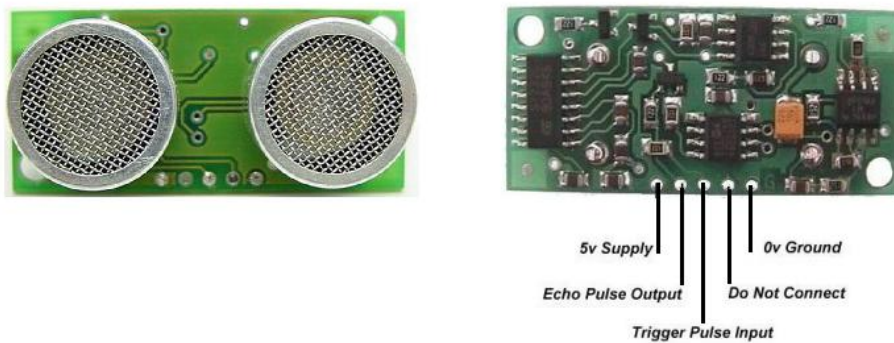


Figura 3.3: Parte delantera SRF04 y mapa de conexiones traseras.

Desde un punto de vista práctico, para proceder a su correcto funcionamiento, basta con mandar un señal de puesta en marcha en el pin 3 del sensor (trigger) y después leer la anchura del impulso proporcionado en el pin 2 (echo). El pulso de entrada de Trigger tiene que tener un ancho mínima de 10 μ S. Posteriormente, se lee el pulso de salida de Eco y se mide su longitud que, en condiciones normales, será proporcional al eco recibido. Si no se produjera ningún eco, debido a que no hubiera ningún obstáculo, el pulso de eco tendrá una longitud aproximada de 36 ms, dejando un retardo de 10ms desde una lectura a la otra para que el sistema se estabilice.

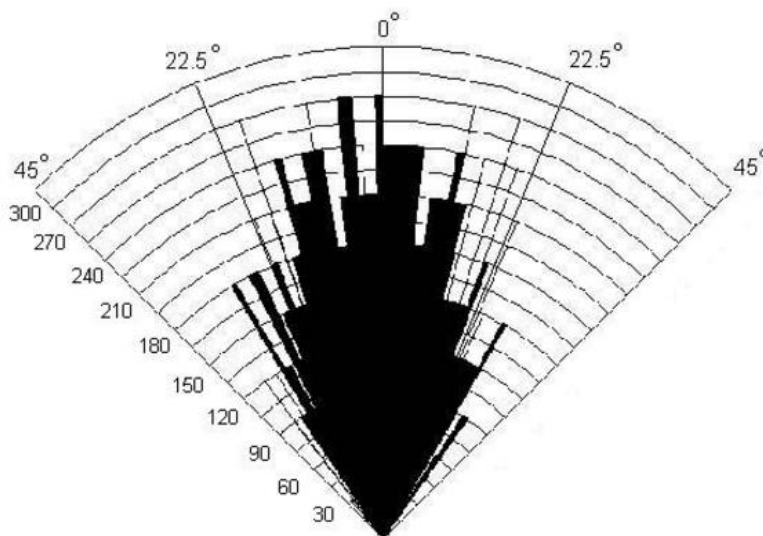


Figura 3.4: Rango efectivo en grados del sensor SRF04.

Otros sensores de ultrasonidos en el mercado son:

SRF08. Es prácticamente igual que el modelo anteriormente descrito solo que la diferencia principal es el alcance efectivo que se ha visto aumentado hasta 4-4.5 metros [39]. Otra diferencia con respecto a su predecesor es que se puede configurar de manera que un solo pin se pueda utilizar como trigger y echo, reduciendo así el número de pines en los microcontroladores. El sensor SRF08 también incluye un sensor de luz que permite conocer el nivel de luminosidad.



Figura 3.5: *Sensor de ultrasonidos modelo SRF08.*

SRF10. Las especificaciones son las mismas que en el modelo anterior [40]. La diferencia, sigue siendo la distancia de detección de obstáculos, ya que en este sensor aumenta aun mas llegando hasta los 6 metros. Con una alimentación única de 5V, solo requiere 15 mA, para funcionar y 3mA mientras esta en reposo, lo que representa una gran ventaja.



Figura 3.6: *Sensor de ultrasonidos modelo SRF10.*

3.2.2. Diseño Sistemas Infrarrojos

El funcionamiento de los sensores infrarrojos se basa en la emisión de secuencias de pulsos de luz infrarroja que transportan un código de varios bits que identifican la señal enviada. Posteriormente, para que el receptor se comporte adecuadamente y de el menor numero de errores posibles, el emisor que se use deberá tener la longitud de onda a la cual es mas sensible el sensor, por lo que se usará 940nm, que ademas, suele ser la mas común.

Aunque existen muchos protocolos de comunicación infrarroja, seguramente el mas utilizado sea el protocolo NEC ya que es el que usan casi todos los mandos universales. Este protocolo, en terminos generales, utiliza cadenas de bits de 0s y 1s para la tranmision del mensaje. Funcionando a la frecuencia de 38Khz (cada pulso durará $562,5 \mu s$), el mensaje se transmite de la siguiente forma: **0 lógico:** Envía un pulso de $562,5 \mu s$, seguido de un espacio de $562,5 \mu s$ de duración (tiempo de transmisión de 1,125 ms). **1 lógico:** Envía un pulso de $562,5 \mu s$ seguido de un espacio

de 1.6875 ms de duración (tiempo de transmisión de 2,25 ms). En la figura 3.23 se puede ver un ejemplo de la cadena de pulsos para un comando específico:

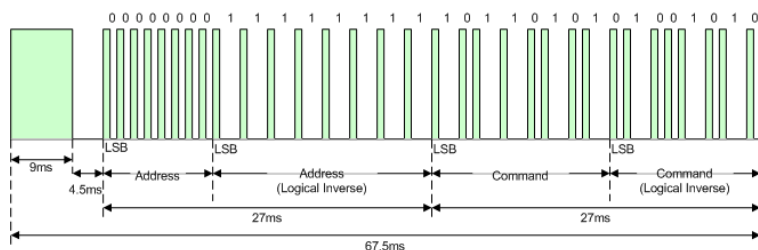


Figura 3.7: Cadena de pulsos para el envío del comando 10110101.

Es decir que, si el receptor recibe la misma secuencia de bits que ha enviado el emisor, se concluye diciendo que la señal ha rebotado contra algún obstáculo. Si por el contrario, si el receptor recibe una secuencia de bits diferente de la que ha enviado el emisor, dicha señal provendrá de otro robot o dispositivo emisor de infrarrojos.

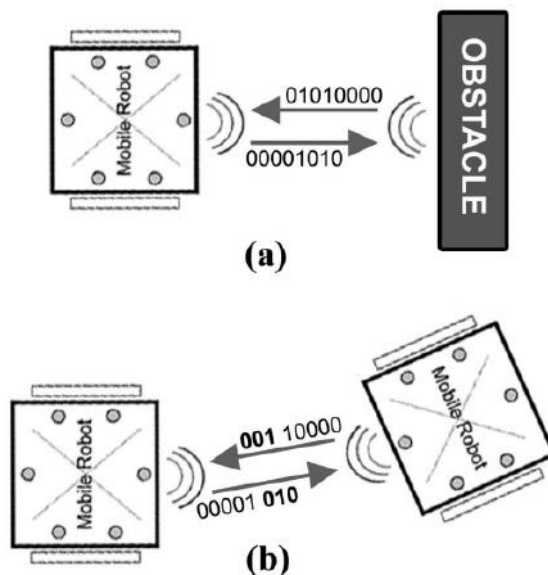


Figura 3.8: Casos de detección: (a) robot detectando obstáculos, (b) robot detectando otros robots.

El objetivo principal de estos sensores, a diferencia de los ultrasonidos es que además de detectar obstáculos, pueden detectar otras fuentes de emisión IR (dispositivos, otros robots...) así como recibir comandos con ordenes específicas. Prácticamente, tanto los emisores como los receptores IR, tienen todas las mismas características (frecuencias, longitudes de onda...) y solamente se diferencian en algunos rasgos específicos (ángulo, alcance..).

Hay infinidad de **emisores IR** aplicables en robots. De entre todos ellos, se destacan los siguientes:

- **Emisor TSAL6100.** Operando a longitud de onda de 940 nm [41], este emisor LED IR muy sencillo. Trabaja a 2.6 V y tiene un cono de ángulo de 20°.



Figura 3.9: *Emisor LED IR modelo TSAL6100 (Vishay Semiconductors).*

- **Emisor SE3455.** También de dos pines, se diferencia del anterior en que abarca mas campo visual ya que emite con un ángulo de 90° . Opera a 1.7 V [42].



Figura 3.10: *Emisor LED IR modelo SE3455 (Honeywell).*

- **Emisor OP280K.** Es uno de los que mas ángulo abarca ya que puede llegar a los 180° [43]. Trabaja a 1.5 V.



Figura 3.11: *Emisor LED IR modelo OP280K (Optek-Technology).*

En cuanto a los **receptores IR**, también encontrar una gran variedad en el mercado. En este proyecto, se decanta por estos dos:

- **Receptor TSOP4838.** Compuesto por 3 pines, este receptor de infrarrojos puede llegar detectar hasta una distancia de 45 metros de alcance [44]. Además, el ángulo de directividad es de 45° . Opera a la frecuencia de transporte del marco europeo 38 KHz trabajando entre los 2.5 y 5.5 voltios.



Figura 3.12: Receptor IR modelo TSOP4838 (Vishay Semiconductors).

- **Receptor TSOP77438WTT.** Este receptor [45], a diferencia del anterior, está compuesto por 4 pines (aunque dos de ellos irán a tierra normalmente). La distancia de detección disminuye hasta los 35 metros pero sin embargo, el ángulo de directividad aumenta hasta los 75°. También opera a la frecuencia de 38 KHz, trabaja en 2.5-5.5 voltios.

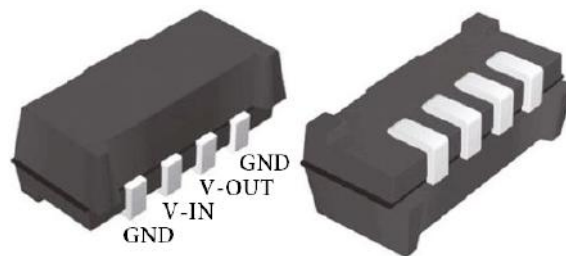


Figura 3.13: Receptor IR modelo TSOP77438WTT (Vishay Semiconductors).

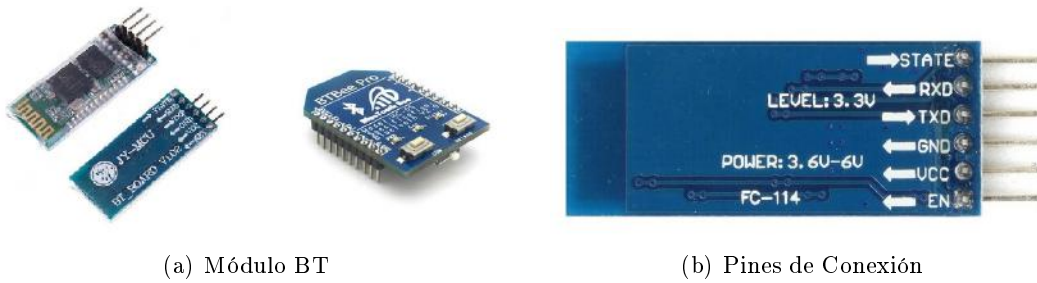
El **funcionamiento** de los receptores IR aplicados en robots, es un poco más complejo que los emisores. En este caso, el receptor recibe un 'chorro' de bits de 1's y 0's por parte del emisor IR de otro robot. Dichos bits, no solo contienen la instrucción de lo que se desea leer (como se ha visto anteriormente), por lo que el receptor, los tiene que procesar de manera que solamente se quede con lo que desea leer. Este proceso se puede llevar a cabo conectando el receptor a un microcontrolador tipo Arduino y programándolo dentro en base a lo que se quiere hacer.

3.2.3. Diseño Sistemas Bluetooth

- **Módulo BT CC2540.** Alimentado con 3.9 V, este módulo posee la versión 4.0 Low Energy de Bluetooth [46]. Como se ha visto en el capítulo anterior, esta versión de Bluetooth es mucho más rápida que las anteriores y además es compatible con todas ellas [47]. Además, es mucho más fácil de implementar ya que normalmente, vienen integrada en un adaptador USB, con lo que directamente se puede conectar al PC sin necesidad de realizar ninguna conexión.
- **Módulos BT HC-05/06 y BT Bee PRO.** Estos dos módulos son muy similares entre sí. Son los más utilizados para aplicaciones de control remoto [48]. Los primeros, pueden actuar ya sea como maestro o como esclavo y el otro módulo está pensado para aquellos robots en los que ya haya implementado una placa para Zigbee (ya que el footprint de este módulo Bluetooth es el mismo). Todos ellos son alimentados a 3.3 V, (por lo que pueden usar adaptadores USB), funcionan con la versión de Bluetooth 2.0 y el baud rate de todos ellos puede ser modificado. El precio de estos módulos está en torno a 10 €



Figura 3.14: *Módulo Bluetooth CC2540 (Texas Instrument).*



(a) Módulo BT

(b) Pines de Conexión

Figura 3.15: *Modulo Bluetooth HC-05).*

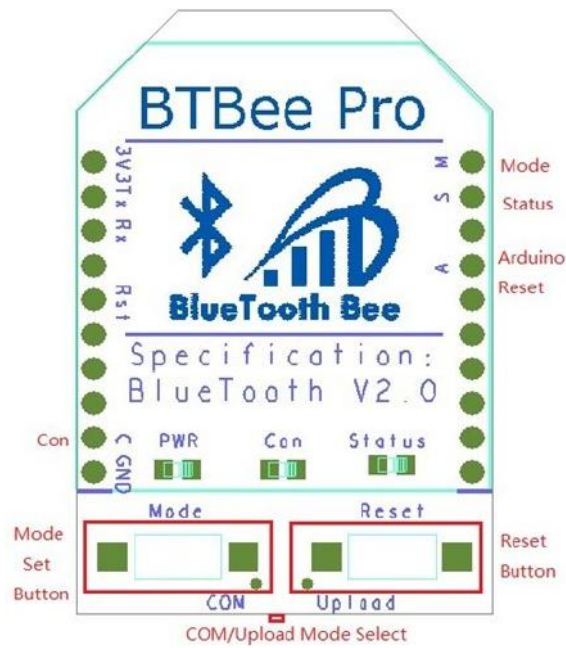


Figura 3.16: *Conexión Pines módulo BTBee.*

3.2.4. Diseño Sistemas Wi-Fi

En cuanto a los sistemas Wi-Fi, se pueden crear comunicaciones integrando estos sistemas en varios robots. Para ello hay varias Shield WiFi en el mercado, aunque su precio es bastante elevado. Pero, si se quieren conseguir prestaciones similares a un precio mas asequible, se puede usar el módulo WiFi ESP8266.

El modulo **WiFi ESP8266**, es muy parecido a los módulos Bluetooth HC-05 anteriormente mencionados [49]. Se alimenta con 3.3 V. Además, permite una comunicación mediante comandos AT. Prevee también el uso de los protocolos 802.11 b/g/n, lo cual este módulo lo hace compatible con la mayoría de los teléfonos móviles y PCs del mercado. El precio está en unos 8 €.



Figura 3.17: Módulo WiFi ESP8266 (Adafruit).

Por otro lado, los pines de conexión son practimante identicos al HC05. Es decir, se podría conectar de casi de igual manera a un PC o microcontrolador mediante la conexión de los pines como se ve en la figura 3.18. En este caso, el puerto RST se deja sin conectar igual que los dos puertos GPIO. Estos puertos GPIO (General Purpose Input Output), sirven para usar el módulo Wifi como activador de algo. Sin embargo, este aspecto no es propiamente de este proyecto.

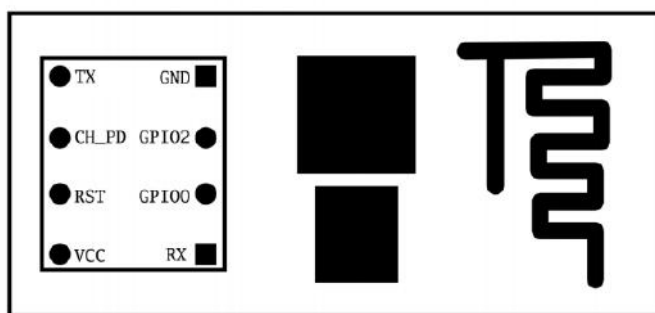


Figura 3.18: Conexión pines ESP8266.

3.2.5. Diseño Sistemas ZigBee

La comunicación por Zigbee se realiza principalmente a través de módulos de Zigbee. El funcionamiento principalmente es el de enviar y recibir datos a través de ondas de radio. Existe una gran variedad de módulos en el mercado aunque los mas frecuentes son los de las Serie 1 y Serie 2 (Ver Tabla) [50]. Entre dichos módulos, hay muy pocas diferencias ya que sus hardware son muy similares y la mayoría de sus pines desempeñan las mismas tareas. El único inconvenientes

es el de que no es posible la comunicación entre ambos módulos al ser incompatibles entre ellos. Los precios varían dependiendo de los modelos pero oscilan entre los 20 y 40 €.

	Xbee Serie 1	Xbee Serie 2
Alcance interior	Max 30 m	Max 40 m
Alcance exterior	Max 100 m	Max 120 m
Potencia de transmisión	1 mW (0dBm)	2 mW (3dBm)
Tension de alimentación	2.8 - 3.4 V	2.8 - 3.6 V
Topologías	Punto-Punto y Estrella	Punto-Punto, Estrella y Malla
Entradas/Salidas Digitales	8	10
Entradas Analógicas	7	4
Salidas Analógicas	2	-

Tabla 3.5: Comparativa entre módulos Xbee

Con estos tipos de módulos también existen diferentes versiones de ellos dependiendo de los protocolos usados dentro Zigbee (DigiMesh, SX, 900HP, 802.15.4). Por otro lado, de cada uno de ellos, existe la versión normal y la versión PRO, que se diferencia de la primera en su potencia de transmisión. Además, en cuanto a la potencia, los módulos tienen también diferentes configuraciones de antenas:

- **Wire antena.** Es un pequeño cable que sale del módulo permitiendo una radiación omnidireccional. Es decir, que cuando el cable se encuentra perpendicular al módulo, la distancia cubierta es prácticamente la misma en todas direcciones.



Figura 3.19: Xbee con Wire Antena.

- **PCB antena.** También existe la posibilidad de utilizar la antena que viene por defecto en los módulos. Esta va integrada directamente en el PCB del Xbee, por lo que, aunque puede que no tenga el mismo alcance, es una alternativa si se quiere evitar comprar antenas externas adicionales.

- **Chip antena.** Es un pequeño chip cerámico que radia de manera unidireccional. Este tipo de antena permite una radiación desde la parte frontal del módulo, donde en la parte posterior no tiene apenas sensibilidad y se produce atenuación.
- **Conector RPSMA.** Permite montar la antena directamente sobre el módulo sin necesidad de usar un cable de conexión adicional.



Figura 3.20: Xbee con Chip Antena.



Figura 3.21: Xbee con RPSMA Conector Antena.

3.2.6. Diseño Sistemas GSM y GPRS

Los sistemas de comunicación GSM y GPRS están pensados como solución a diseñar una red de robots con mayor alcance. Y debido a que el uso del teléfono móvil está tan extendido, no es de extrañar que cada vez se apueste más por este tipo de sistemas.

- **Módulo GSM TC65.** Este módulo ofrece una potencia de emisión de 1W (clase 1) para operar a las frecuencias de 1800 y 1900 MHz, y de 2W (clase 4) para las de 850 y 900 MHz [51]. Alimentado con solamente 3.2 V, según el fabricante, cuando la comunicación se ha establecido, puede llegar a tener unos picos de corriente de 3.2 A. Permite también una comunicación mediante comandos AT, lo cual es beneficioso en este proyecto ya que como se verá a continuación, se trabaja tanto en Bluetooth como ZigBee.



Figura 3.22: *Módulo GSM TC65 (Siemens).*

- **Módulo GPRS GPRS8000-S.** Este módulo tiene características similares al módulo GSM anterior [52]. Se alimenta con un voltaje de 4.5 V. Es un dispositivo GPRS de clase B (hace uso de GSM y GPRS de manera alternativa).



Figura 3.23: *Módulo GPRS GPRS8000-S (Embest Technology).*

3.2.7. Diseño Sistemas 3G y 4G

- **Módulo 3G SIM5216E.** El módulo presentado puede soportar hasta el protocolo HSDPA (3.5G o 3G+). Se presenta este módulo ya que es uno de los mas implementados en placas Arduino [53]. Con una tensión de alimentación de 3.3-4.2 V, puede ser programado para comunicarse mediante comandos AT y puede alcanzar una velocidad de transmisión de 3.6 Mbps.
- **Módulo 4G LTE910.** Este módulo 4G, dispone de los protocolos HSPA+ y LTE (aparte de un pequeño sensor de GPS). Opera en las bandas de frecuencia 700, 850, 1700 y 1900 MHz y según el fabricante [54], es capaz de alcanzar una velocidad de transferencia de datos de 100 Mbps. Se alimenta con un máximo de 4.3 V. Además, puede ser configurado de manera que se pueda comunicar mediante comandos AT.



Figura 3.24: Módulo 3G (Simcom).

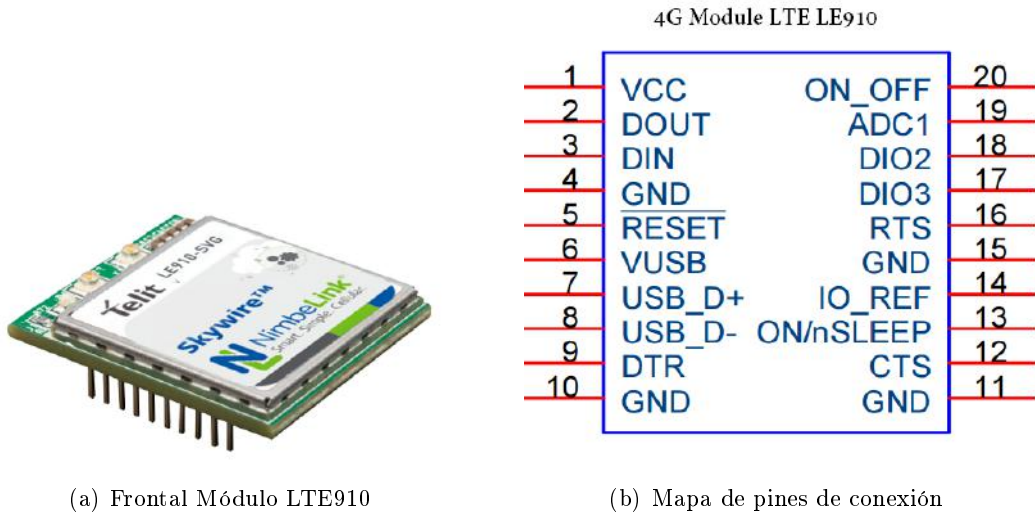


Figura 3.25: Módulo 4G LTE910 (NimbeLink).

4

Desarrollo e Implementación

En el presente capítulo se han escogido los sistemas de comunicación por radiofrecuencia, Bluetooth, WiFi y Zigbee, para en base a los diseños del capítulo anterior, proceder a crear la comunicación entre ellos y la implementación real. La **elección** de estos módulos se ha hecho en base a su disponibilidad en el HCTLab, que son módulos baratos, que se usan frecuentemente sea en robots que en la vida real y que la implementación de los mismos es sencilla. Por tanto, se explicarán con detalle los módulos empleados así como los softwares necesarios para su preciso funcionamiento. Posteriormente se realizará un análisis de los enlaces y configuraciones posibles. Por último, se propondrá una serie de escenarios diferentes para la realización de futuras pruebas.

4.1. Implementación Sistema Bluetooth

Para empezar el análisis, se explicará en primer lugar la característica de Bluetooth de poder actuar tanto como dispositivos Masters o Slaves (Amos o esclavos). La principal diferencia es que un BlueTooth Slave solo puede conectarse a uno que sea master, y a nadie más. En cambio un BlueTooth Master, puede conectarse a varios Slaves, o también, permitir que ellos se conecten y recibir y solicitar información de todos ellos, (hasta un máximo de 7 dispositivos).

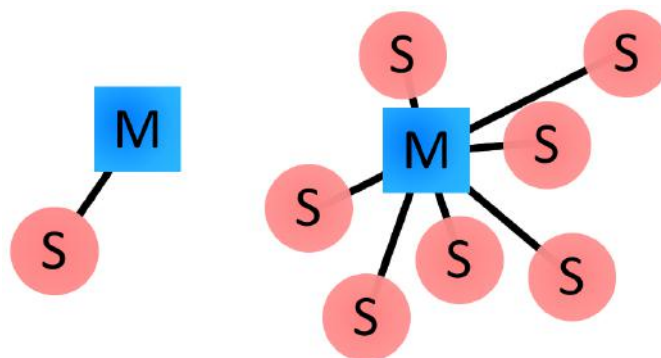


Figura 4.1: *Ejemplo distribución Bluetooth como Master/Slave*

Cada dispositivo Bluetooth se identifica por una dirección única de 48 bits y, para facilitar, un nombre de dispositivo que sirva para identificarlo (por ejemplo, cuando en el Bluetooth del smartphone le cambias el nombre que será el que se muestre a los demás cuando quieran buscarte). También es habitual que se incluya una PIN de conexión o código de identificación para acceder al mismo

Para conectar dos dispositivos entre ellos, existe un protocolo de *pairing* (o emparejamiento) que vincula a dos dispositivos Bluetooth. Cuando esto ocurre, se comienza a identificar por nombre e identificación interna y es en este punto donde se solicita el PIN previamente mencionado para autorizar la conexión. Si se realiza con éxito dicho emparejamiento, la conexión se queda 'grabada' de manera que si alguna otra vez se vuelven a encontrar dichos dispositivos, se volverán a vincular de manera automática sin necesidad de volverlo a hacer.

Los módulos Bluetooth más frecuentes en el mercado a la hora son HC-05 y HC-06. En este proyecto se ha decantado por la primera opción, ya que aunque los dos módulos son idénticos en cuanto al hardware, la principal diferencia entre ambos es que mientras que el HC-06 solamente puede ser configurado como Slave, el módulo HC-05 se puede configurar tanto Slave como Master. Y además, para este proyecto de robótica cooperativa, los módulos HC-05 [48] son los más adecuados de cara a construir redes de colaboración.

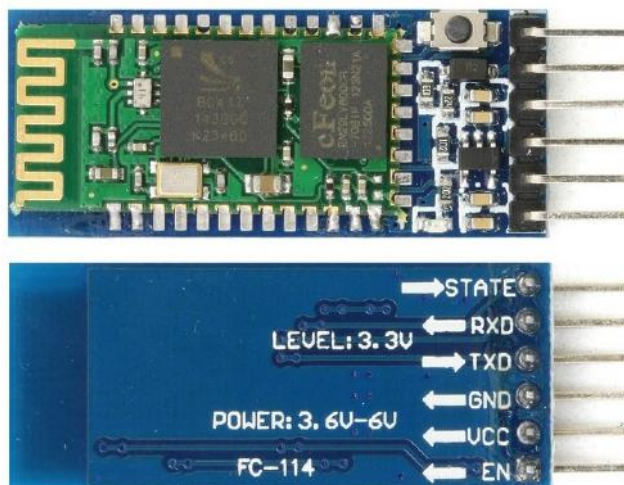


Figura 4.2: Frente y trasera del módulo Bluetooth HC-05 utilizado en el proyecto.

Otras características de este dispositivo son:

- **Bajo consumo.** Los módulos Bluetooth seleccionados para este proyecto, se caracterizan por tener bajo consumo de potencia que oscila en torno a los 50 mA. Si se compara con otros módulos Bluetooth del mercado con las mismas características, se ve cómo es de los módulos que menos consumo de potencia gastan (114mA Módulo Bluetooth LM400).
- **Alcance.** Los valores nominales teóricos de alcance máximo son entre 5 y 10 metros. Aun así, estos valores han sido contrastados como se podrá ver a continuación.
- **Modulación GFSK** (Gaussian Frequency Shift Keying). Estos módulos Bluetooth utilizan la modulación GFSK en comparación con los módulos de las nuevas versiones de Bluetooth cuya modulación es FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum).

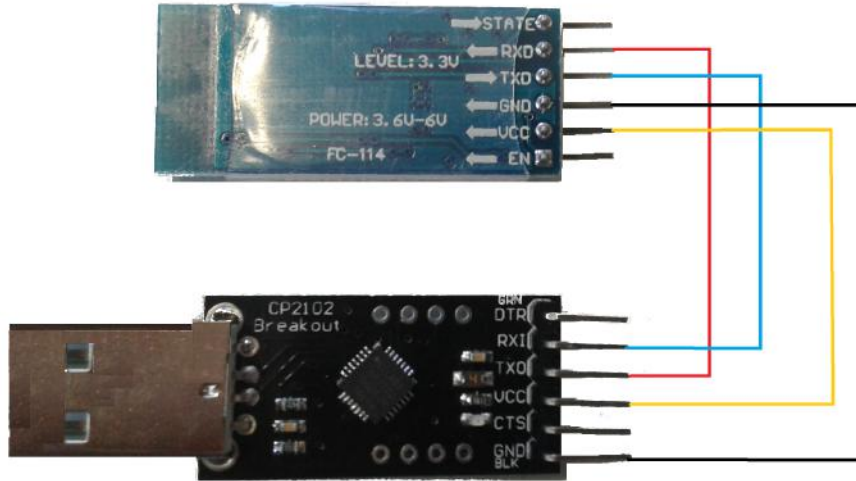


Figura 4.3: Conexiones entre el módulo Bluetooth HC-05 y el adaptador USB-TTL PL2303.

- **Velocidad de transmisión.** La velocidad máxima que ofrecen este tipo de módulos es de 2.1Mbps en asíncrona y de 1Mbps en síncrona. No son los módulos mas rápidos del mercado, pero estas condiciones son suficientes para este proyecto.

4.1.1. Configuración de los módulos

Lo primero que se debe hacer será conectar el módulo Bluetooth un adaptador USB-TTL para posteriormente poder conectarlo al ordenador mediante el puerto USB. Para ello se puede usar cualquier módulo conversor (por ejemplo PL2303) y realizar las conexiones pertinentes como se indica en la figura 4.3.

Para configurar los módulos y realizar la comunicación, hay varios softwares disponibles en Internet. Para este proyecto, se ha elegido **CoolTerm**, en primer lugar por la sencillez en su interfaz y en segundo lugar porque está disponible para cualquier sistema operativo ya sea Windows, Linux o Mac. En algunas versiones y dependiendo del sistema operativo en que trabaje el ordenador, para que este reconozca el módulo Bluetooth, es necesario instalar los drivers CP210x USB (<https://www.silabs.com/products/mcu/Pages/USBtoUARTBridgeVCPDrivers.aspx>).

Una vez descargado el software, instalado los paquetes y conectado el módulo Bluetooth al conversor USB y a su vez al ordenador, ejecutando el programa, se selecciona el puerto COM donde esté conectado.

(Nota: Para conocer el puerto COM que se está utilizando, (en Windows) se va a Equipo->Administrador de Dispositivos->Puertos(COM y LPT).)

Otras opciones a modificar son:

- **Line Mode.** En la pestaña Terminal, en Terminal Mode, se selecciona Line Mode. Con esta opción, se escribe en una línea de comandos que se encuentra en la parte inferior, permite borrar si se ha cometido un error, y hasta que se presiona ENTER, no se manda el comando. Raw Mode sin embargo, escribe directamente en la pantalla de la terminal.
- **Local Echo.** Dentro de la misma pestaña, se marca también la opción de Local Echo. Marcando esta opción, se muestra todo lo que se escriba por pantalla. De esta manera se

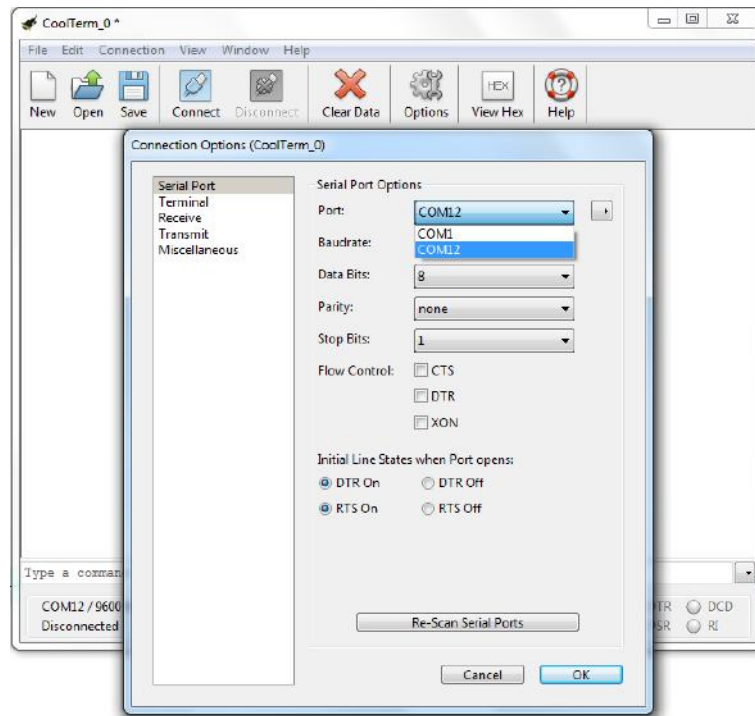


Figura 4.4: Ventana principal del software CoolTerm

asegura de que los comandos que se están escribiendo están correctos o no.

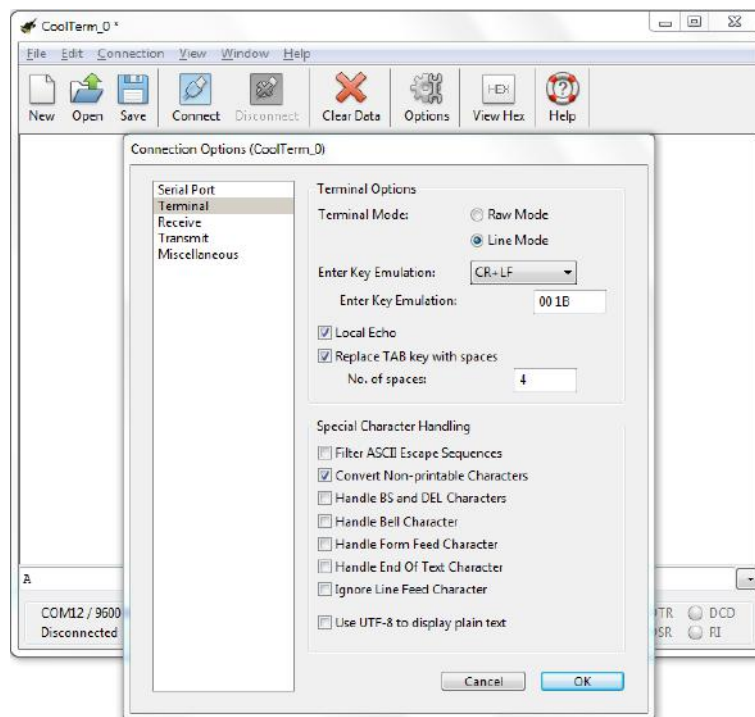


Figura 4.5: Opciones de configuración del software CoolTerm

Una vez modificado las opciones comentadas, pulsando OK, se procede a la conexión me-

diante el botón Connect. Aparecerá entonces en la parte inferior izquierda, el nombre del puerto y el estado, en este caso concreto aparece COM12 /9600 8-N-1. Connected + (tiempo de conexión). En este momento, y para proceder a la verificación, configuración de parámetros y envío de mensajes, se utilizarán los **Comandos AT**.

4.1.2. Comandos AT

Desarrollados por la compañía *Hayes Communications* en 1977, los comandos Hayes son instrucciones codificadas para configurar, parametrizar y proporcionar instrucciones a los modems. Los caracteres 'AT' que preceden a las instrucciones, significan *attention*, por lo que estos comandos son más conocidos como **Comandos AT**.

En un principio, la finalidad principal de estos comandos era como ya se ha comentado, la comunicación entre modems. Pero con el paso del tiempo y la evolución de las tecnologías, la telefonía móvil GSM adoptó también este estándar como suyo para poder comunicarse con sus terminales, incluyendo así instrucciones de manera que se pudieran realizar llamadas de datos o de voz, leer y escribir en la agenda de contactos y enviar mensajes SMS, entre otros.

Los comandos AT empleados en Bluetooth sirven para configurarlos, conocer su estado, velocidad de transmisión, nombre, PIN. Pueden establecer el emparejamiento con otros dispositivos Bluetooth y una vez hecho, conocer todo acerca del dispositivo emparejado aparte de crear una comunicación bidireccional. En esta sección, se comentarán y explicarán alguno de los comandos AT más utilizados y necesarios. Aunque, si se quiere ver más en profundidad, el resto de comandos se pueden encontrar en el **Anexo A** del presente proyecto.

4.1.3. Comunicación punto a punto

En primer lugar, lo que se deberá hacer tras la conexión de los dos dispositivos Bluetooth, será verificar que la conexión de los módulos se haya efectuado correctamente. Para ello, en la pantalla se escribe el comando base, **AT**, y el sistema debería devolver un OK. Es una manera de comprobar que todo haya ido bien.

Posteriormente, se debe configurar el Bluetooth para que sea Master o Slave. Con el comando **AT+ROLE?** se pregunta como está actualmente configurado el módulo, (0=Slave y 1=Master). Por defecto viene configurado como Slave, así que para configurarlo como Master, basta con escribir la instrucción **AT+ROLE=1**.

Opcionalmente pero recomendable, una vez configurados los dispositivos, se pueden dar un nombre identificativo para cada uno de ellos (para poder reconocerlo) y además conocer su estado actual (para poder emparejarlos). Para ello se usa los siguientes comandos AT:

AT+NAME?. Para conocer el nombre del módulo. Por defecto es HC-05, pero se debe cambiar para identificarlo mejor. Por ejemplo **AT+NAME=MASTER1** y **AT+NAME=SLAVE1**. De esta manera es mucho más fácil dar instrucciones a cada uno.

AT+ADDR?. Para conocer la dirección MAC del módulo, en este caso el software responderá con un 2015:12:288996.

Otro comando AT muy útil para iniciar la comunicación entre los módulos es **AT+STATE?**. Este comando puede adoptar diversos valores. Para que se puedan enlazar, los dos dispositivos han de estar en estado **Ready**. Para emparejarlos, se necesita estar en estado **Inquiring** tras el cual, si hay un dispositivo Bluetooth cercano, se le aparecerá una pantalla en la que deberá

introducir el PIN de emparejamiento. Si el PIN introducido es correcto, se emparejan los dos Bluetooth y una vez hecho, el estado cambiará a **Paired** y posteriormente a **Connected**, donde ya conectados, están totalmente disponibles para poder hablar e iniciar una comunicación. Por último, si uno de los dos dispositivos se desconecta, el estado del otro será **Pairable** y, cuando el primero vuelva a estar disponible, se emparejarán automáticamente sin necesidad de renovar los credenciales del PIN de acceso.

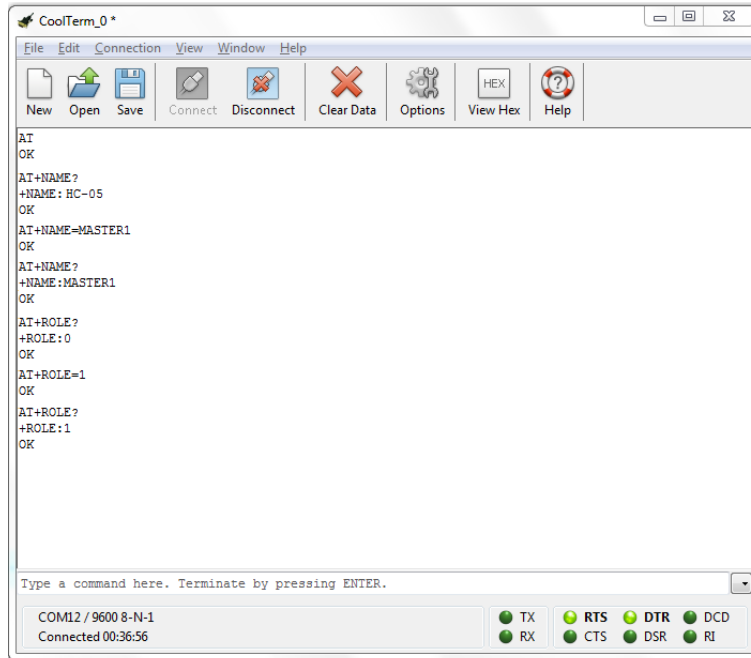


Figura 4.6: *Pantalla CoolTerm con varios comandos AT ejecutados.*

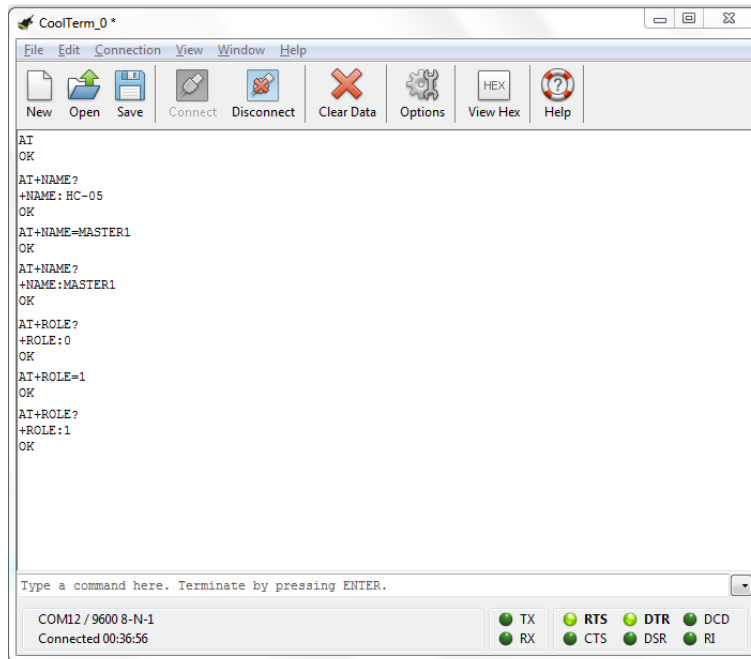


Figura 4.7: *Pantalla CoolTerm con cambios de estado*

Una vez estén los dos módulos emparejados y conectados, es momento de poder hablar entre ellos. Además, mientras se está hablando, se puede volver a la rutina de comandos AT para por ejemplo, preguntar por la dirección del módulo conectado y después retomar la conversación con normalidad.

4.1.4. Comunicación punto a multipunto

Como se ha visto en el inicio del capítulo, los sistemas Bluetooth tienen dos tipos posibles de comunicación. La anteriormente vista, y la que se describe a continuación. Para la comunicación punto-multipunto, se han utilizado dos módulos Bluetooth (idénticos a los del apartado anterior) y dos dispositivos móviles (una tablet y un smartphone). Para utilizar cualquier dispositivo móvil como terminal Bluetooth con el fin de enviar comandos AT, hay varios softwares que lo hacen posible. Para este proyecto, se ha utilizado el software **Bluetooth Serial Controller** descargado desde Play Store de Android (<https://play.google.com/store/apps/details?id=nextprototypes.BTSerialController&hl=es>).

El proceso es idéntico al apartado anterior solo que en este caso se debe emparejar más dispositivos. Para ello, primero se buscan en la pantalla de terminal cuantos dispositivos hay enlazados al módulo(AT+ADCN) ya que si ha llegado al límite, no se podrán emparejar más. Y en segundo lugar, se hará una búsqueda (AT+INQM) de todos los dispositivos Bluetooth cercanos para después se emparejan con el código PIN introducido correctamente (Ver figura 4.8)

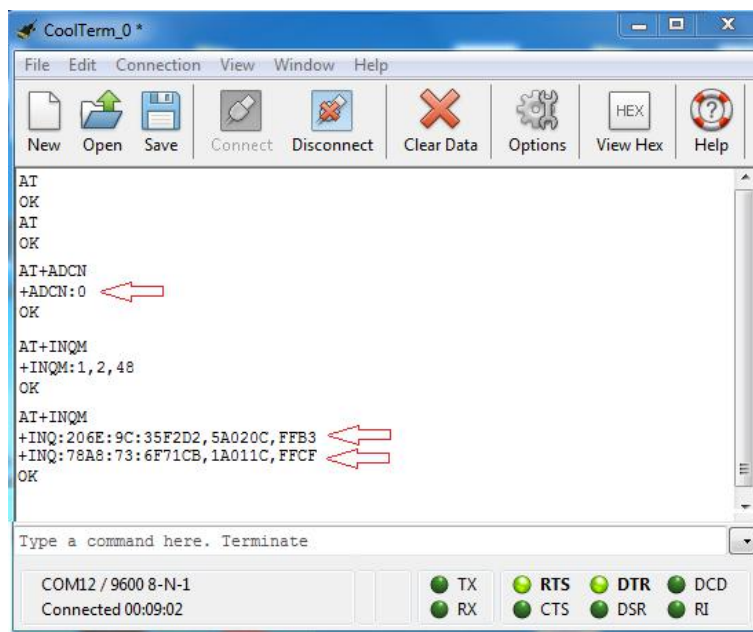


Figura 4.8: Pantalla CoolTerm búsqueda de dispositivos y dispositivos conectados.

En la figura anterior se comprueban dos cosas. Por un lado, que el dispositivo está vacío de dispositivos emparejados, por lo que no tendremos ningún problema para hacerlo. En segundo lugar, verificamos que la búsqueda la ha realizado correctamente donde, en este caso, ha encontrado tanto el smartphone (MAC 20:06:9C:35:F2:D2) como la tablet (78:A8:73:6F:71:CB).

Una vez emparejados todos los dispositivos, (como se ha visto en la sección anterior) se

ha procedido a hacer las pruebas pertinentes para su correcto funcionamiento como se puede observar en las figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12.

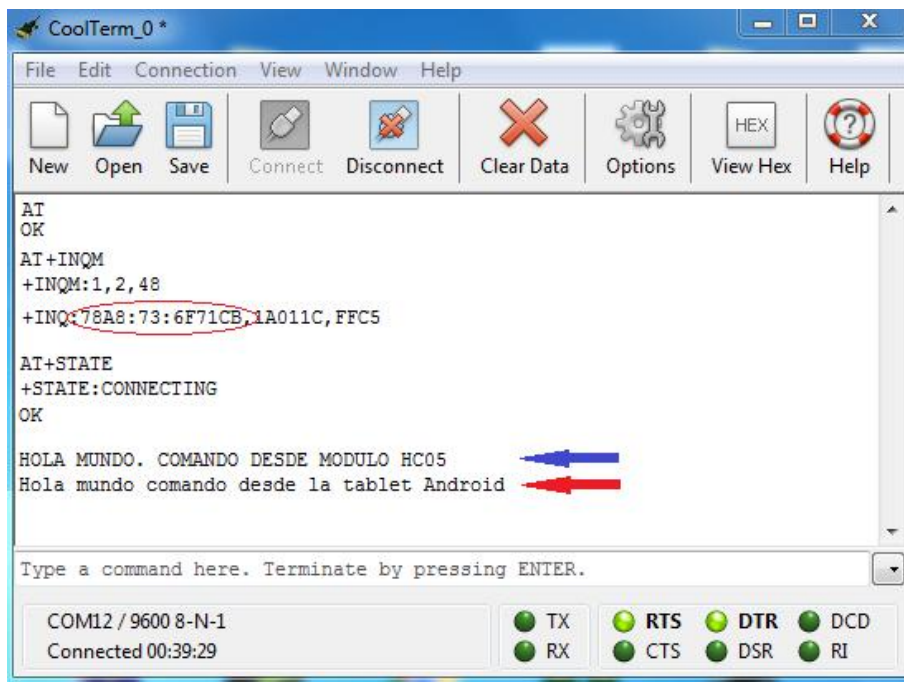


Figura 4.9: *Comunicación entre módulo HC-05 y tablet.*

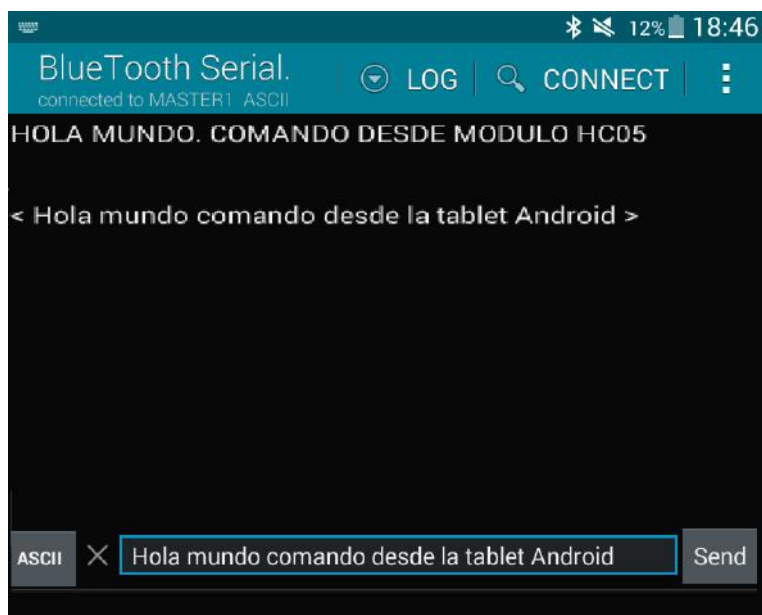


Figura 4.10: *Pantalla de comunicación en el terminal tablet.*

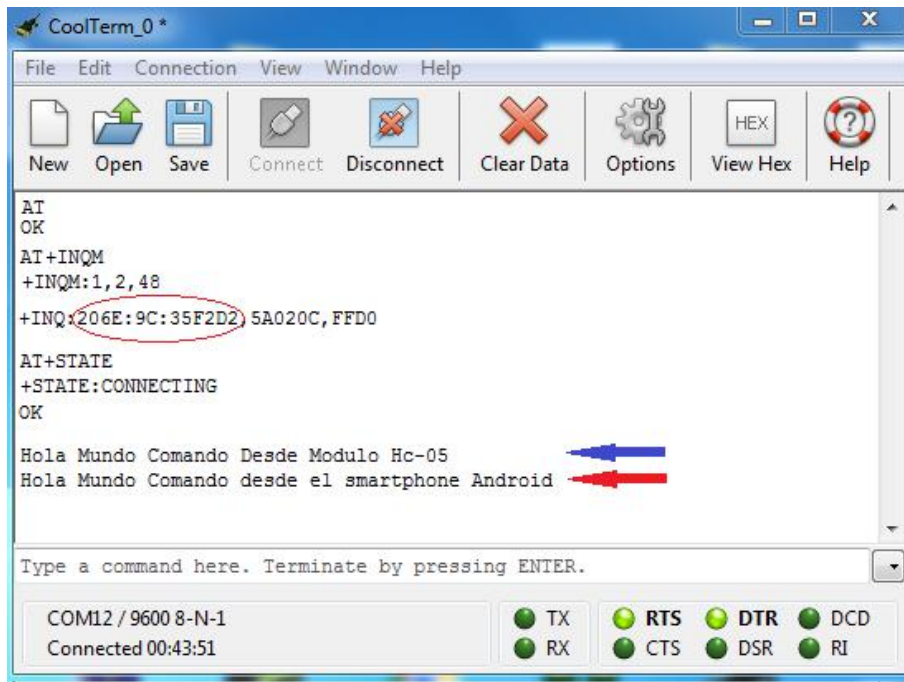


Figura 4.11: Comunicación entre módulo HC-05 y smartphone.

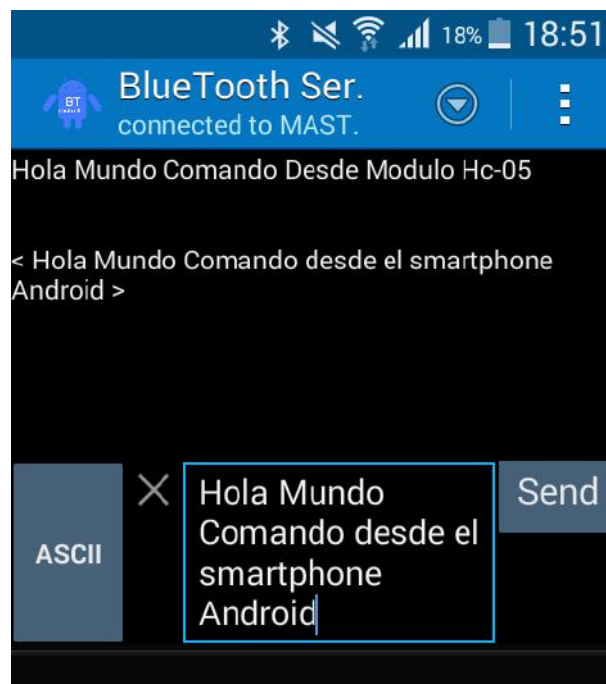


Figura 4.12: Pantalla de comunicación en el terminal smartphone.

Nota: Para las conexiones se ha utilizado como tablet, un modelo Samsung Galaxy Tab 4 y como smartphone, un modelo Samsung Galaxy Core 2 (ambos con versiones de Bluetooth v4.0)

4.2. Implementación Sistema ZigBee

Como se ha visto en el capítulo anterior, hay bastantes tipos de dispositivos que ofrecen distintas características. Así, es posible elegir entre potencias, tipo de antena, velocidades o frecuencias y siempre con la misma interfaz de comunicación, lo que, sin lugar a dudas, es una clara ventaja a la hora de poder cambiar entre distintos módulos.

Para este proyecto en concreto, de todos los tipos de módulos Xbee disponibles en el mercado, se ha decantado por la elección de módulos **Xbee Series 1** [50] de Digi International. El principal motivo de haber escogido estos módulos y no otros, ha sido el hecho de que no es necesario una programación interna específica para que comiencen a comunicarse. Tan solo será necesario, como veremos a continuación, una pequeña y sencilla configuración de algunos parámetros y ya estará listo para operar.



Figura 4.13: Módulos Xbee Series 1 utilizados en el proyecto

Otras características de este dispositivo son:

- **Bajo consumo.** Los módulos Xbee seleccionados, aun no siendo los que menor consumo tienen, si es de los mas bajos del mercado 55 mA, comparándolo con otros módulos, cuyo consumo se eleva hasta los 100 mA (Xbee Series 6).
- **Velocidad máxima** de transmisión de datos. Es el módulo Xbee con mayor velocidad de todos, llegando hasta los 250 kbps. Solamente lo supera un módulo que integra Xbee y Wi-Fi.
- **Modulación DSSS** (Direct Sequence Spread Spectrum). Los módulos Xbee Series 1, utilizan DSSS para protegerse frente a interferencias y hacer el enlace mas fuerte frente al multitrayecto. Además, los enlaces que utilizan modulación con espectro ensanchado, proporcionan una mayor privacidad ya que solo conociendo el código, se puede desensanchar la señal recibida y recuperar los datos.
- **Alcance.** Los valores nominales teóricos de alcance máximo para entornos cerrados son de 30 metros y de 100 metros para exteriores. Aun así, estos valores han sido contrastados como se podrá ver a continuación.

4.2.1. Configuración de los módulos

Lo primero que deberemos hacer será conectar el módulo Xbee al controlador Xbee USB y a su vez conectarlo al ordenador mediante el puerto USB. Del mismo modo que en la configuración de Bluetooth puede ser necesario la descarga de algunos drivers para el reconocimiento del controlador. En este caso, se deberán instalar los drivers FTDI (<http://www.ftdichip.com/FTDrivers.htm>).

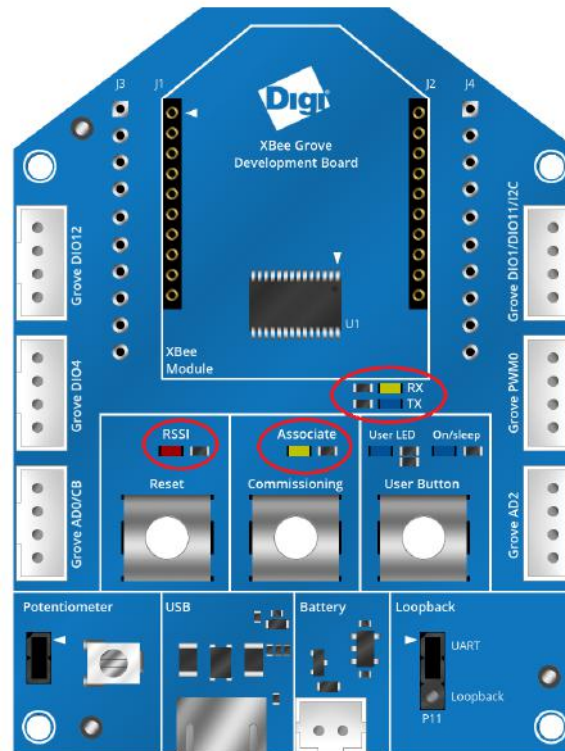


Figura 4.14: Esquemático del controlador Xbee USB.

El controlador Xbee Grove Development Board de la figura 4.14, además de para conectar el módulo Xbee mediante puerto USB al ordenador, también es muy útil ya que los diferentes pines, puertos y leds, dan bastante información. Entre los cuales, se destacan los siguientes:

- **LED Associate.** Este Led indica si el módulo Xbee es Coordinador de una red o si por el contrario, está asociado a un Xbee Coordinador Válido. En el primer caso, de que el módulo conectado sea Coordinador de la red, dicho led parpadeará **1 vez por segundo**. Por el contrario, si se tratase de un módulo que pertenece ya a una red en la cual existe ya un módulo coordinador, dicho led parpadeará **2 veces por segundo**.
- **LED RSSI.** Bastante útil para saber si se están enviando/recibiendo datos. Una vez se envía un paquete de datos desde un módulo al otro, este indicador se encenderá si le están llegando datos. De lo contrario, la conexión entre los módulos será inexistente.
- **LEDs RX y TX.** Otra forma de saber tanto si se están enviando datos, como si se están recibiendo. Dependiendo del caso que sea, se encenderá un LED o el otro.

Existen varios softwares para crear comunicación entre el puerto serie y realizar la programación del módulo. Se podría utilizar perfectamente CoolTerm, como en el caso anterior con los módulos Bluetooth, pero esta vez se ha escogido utilizar el software **X-CTU** ya que es un programa propio de Digi International, el fabricante de los módulos. Además, como en el caso anterior, dicho software está disponible para cualquier sistema operativo ya sea Windows, Linux o Mac.

Una vez descargado, instalado y conectado la placa mediante USB, se selecciona el puerto COM donde esté conectado y clicando sobre Test/Query, se debe ver algo parecido a la figura 4.15. Donde el Serial Number es la dirección única de cada dispositivo. Dicha dirección, viene grabada de fábrica y aparece en la parte trasera del mismo, y que debe coincidir con el Serial Number mostrado por el programa.

En la pestaña *Modem Configuration*, pulsando en el botón Read, se cargarán todos los parámetros relativos al dispositivo que se ha conectado y, dependiendo del tipo de enlace que queramos configurar, se deberán modificar algunos de ellos, de entre los cuales, los mas importantes son:

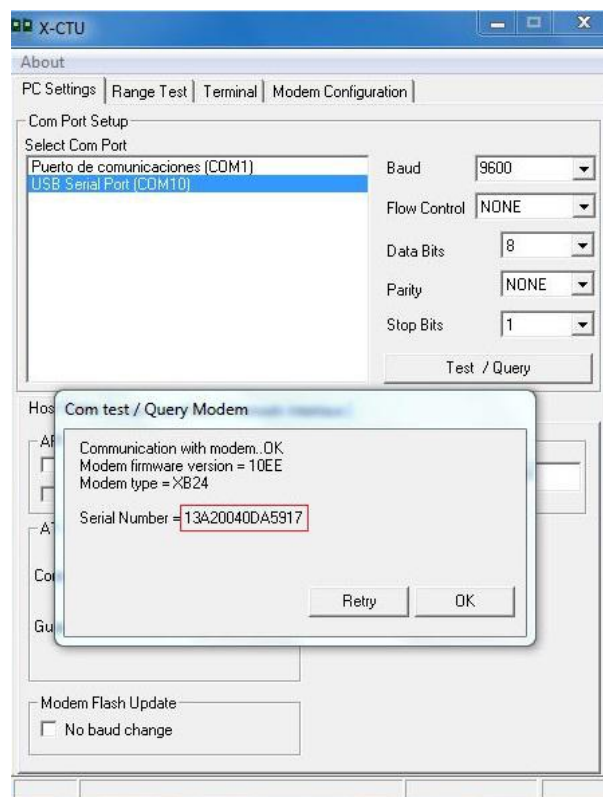


Figura 4.15: Información relativa al módulo Xbee conectado



Figura 4.16: Parte trasera módulo Xbee

- **PAN ID:** Es el número de identificación único de la red. Solamente los Xbee que tengan asignados el mismo PAN ID, pueden comunicarse entre sí.
- **CE,** Coordinator Enable. Indica la imposición o no del dispositivo como Coordinador.
- **DH,** Destination Address High: Representa la primera mitad de la dirección que se desea habilitar. Como no se necesitan tantas direcciones, se impondrá el valor 0.
- **DL,** Destination Address Low: Esta representa la dirección que se usará para localizar los módulos Xbee.
- **SH,** Serial Number High: Es la primera mitad del Serial Number del dispositivo.
- **SL,** Serial Number Low: Es la segunda mitad del Serial Number del dispositivo.

4.2.2. Enlace Punto a Punto

Este es el caso más simple. Se desea hacer un enlace punto a punto entre dos módulos Xbee. Para ello se conecta cada uno a su adaptador Xbee-USB correspondiente y de ahí al ordenador. A continuación se prosigue como en el apartado anterior. Se abre el programa y se reconocen los módulos de manera independiente. En la pestaña Modem Configuration, se comparan los dos módulos, se observa que los parámetros son todos iguales a excepción de SL, ya que al ser dispositivos distintos, tienen distinto Serial Number.



Figura 4.17: Diseño de configuración punto a punto.

Para realizar la conexión punto a punto, se tienen que configurar de la siguiente manera. Lo primero será asegurarse de que el parámetro identificador de la red PAN ID, sea el mismo en los

dos módulos. En caso contrario, se deberá igualar uno de ellos al otro. A continuación se debe imponer a uno de los módulos, Coordinador de la red Zigbee que se va a crear. Para ello se debe seleccionar un '1' en el parámetro Coordinator Enable.

	Módulo A	Módulo B
PAN ID	3332	3332
DH	13A200	13A200
DL	40D2A9B8	40DA5917
CE	1	0
SH	13A200	13A200
SL	40DA5917	40D2A9B8

Tabla 4.1: Configuración de dos módulos Xbee para una comunicación punto a punto.

Se observa, que los parámetros SH y SL están ya compilados automáticamente con el Serial Number leído del dispositivo. Por lo tanto, para un enlace punto a punto, se deberá apuntar un módulo al otro. Esto es tan sencillo como establecer los parámetros de direccionamiento (DH y DL) del primer modulo a los valores de dirección propia (SH y SL) del segundo y viceversa, para conseguir que la comunicación sea bidireccional. Cada vez que se inserte un valor nuevo, se debe pulsar al botón Write para que quede grabado.

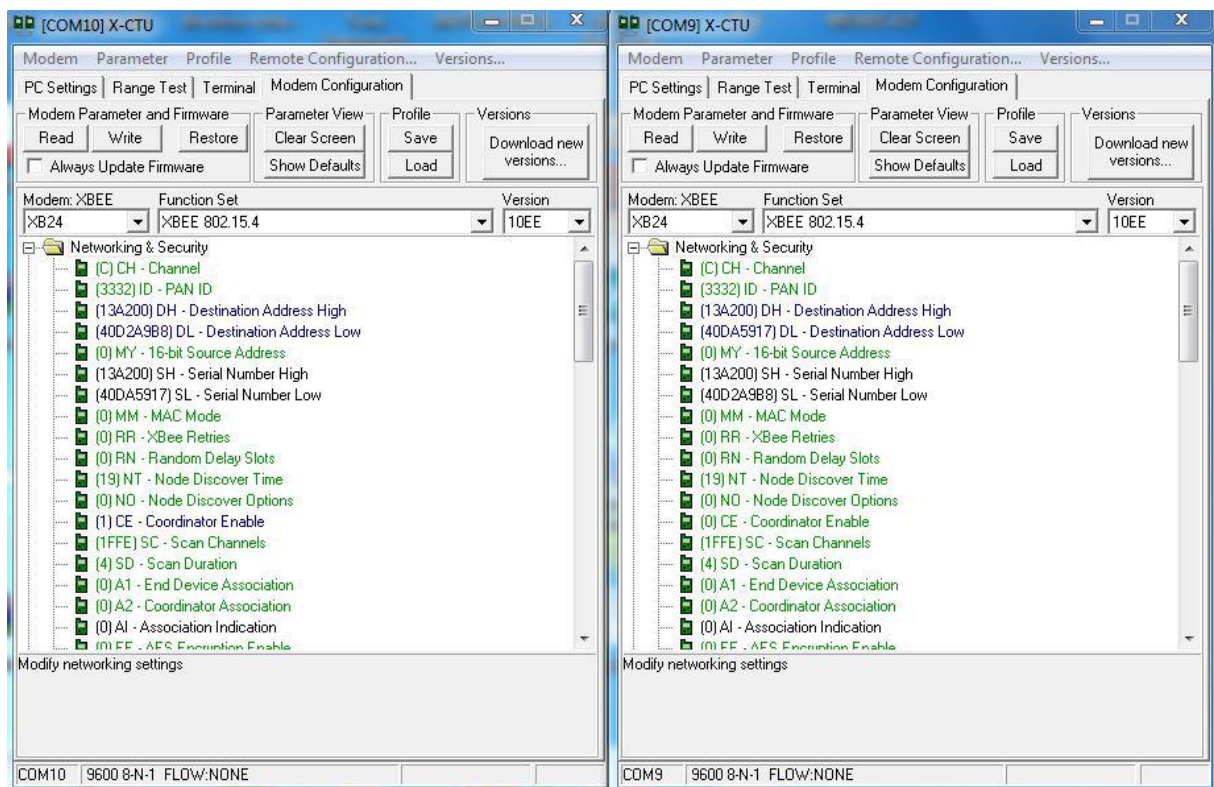


Figura 4.18: Ventana Modem Configuration para la configuración de dos módulos Xbee en una comunicación punto a punto

Para terminar y verificar que la comunicación se ha establecido correctamente, se accede a la ventana Terminal del programa. En la figura 4.19, se puede ver como la comunicación se ha

realizado perfectamente. En rojo, aparecen los comandos que se reciben y en azul, los comandos enviados.

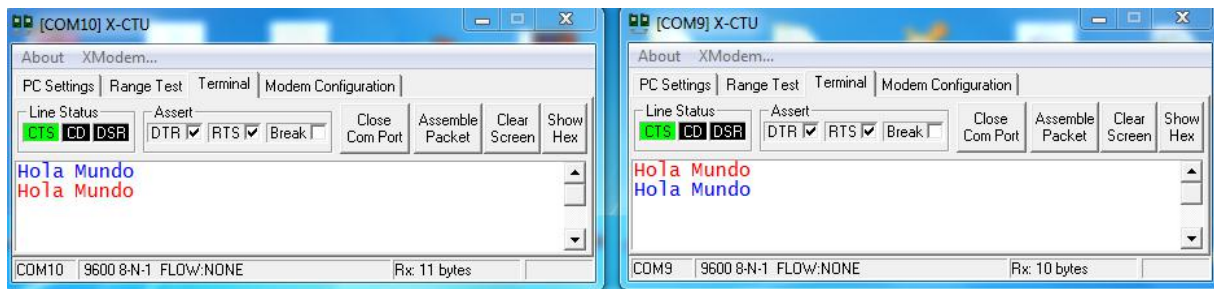


Figura 4.19: Ventana Terminal de visualización para la configuración de dos módulos Xbee en una comunicación punto a punto

4.2.3. Enlace Punto a Multipunto

Para este tipo de enlaces, se parte de la configuración anterior. Lo primero que se necesita es la conexión de otro módulo Xbee con su Xbee USB Adapter al ordenador. Se procede con los mismos pasos realizados en el apartado 4.2.2 para lectura y puesta en marcha del tercer dispositivo.

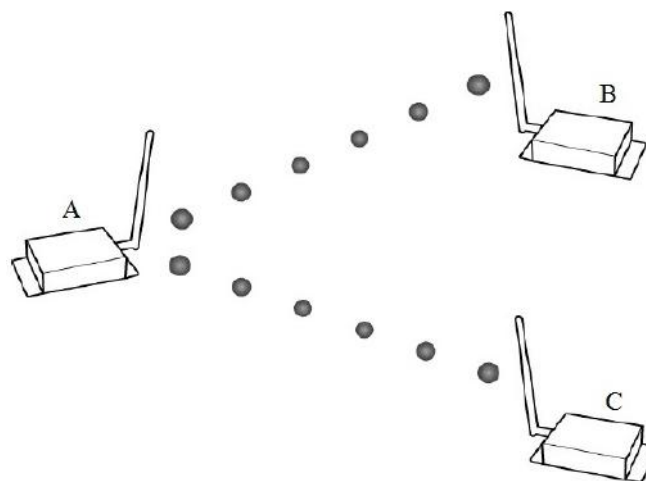


Figura 4.20: Ejemplo de configuración punto a multipunto.

Para realizar una conexión punto multipunto, lo primero que se debe tener en cuenta es que los tres dispositivos estén en la misma red PAN, por lo que será necesario cerciorarse de que el parámetro PAN ID sea igual en los tres dispositivos. Una vez comprobado, se deben configurar las direcciones.

El tercer dispositivo se configurará exactamente igual que se hizo en el apartado 4.2.2, es decir, apuntando al nodo Coordinador de la red. Los parámetros direccionales DH y DH se fijarán a los valores seriales de dicho nodo quedando el parámetro CE a 0.

La configuración del nodo Coordinador también varía. En la figura 4.20 se ve de manera esquemática el diseño propuesto. En este caso, es el nodo Coordinador el encargado de mandar

comandos a los otros dos (o más) módulos y estos serán los que le respondan, interactuando solamente con él. Para que el nodo coordinador pueda enviar mensajes a los dos (o mas) módulos, la dirección DL, a la que apunte será FFFF. Esto quiere decir que cualquier dispositivo que esté en la misma red PAN, recibirá los mensajes. En la tabla 4.2 se resumen los valores comentados que se deberán introducir en la ventana Modem Configuration del programa X-CTU.

	Módulo A	Módulo B	Módulo C
PAN ID	3332	3332	3332
DH	0	13A200	13A200
DL	FFFF	40DA5917	40DA5917
CE	1	0	0
SH	13A200	13A200	13A200
SL	40DA5917	40D2A9B8	40E495DA

Tabla 4.2: Configuración de tres módulos Xbee para una comunicación punto a multipunto.

A continuación, abriendo la ventana de Modem Configuration, se procede a modificar los parámetros de acuerdo con la tabla 4.2. Una vez hecho, se escriben y guardan los valores pulsando Write, y a la nueva lectura de los valores, se deberá ver algo similar a la figura 4.24

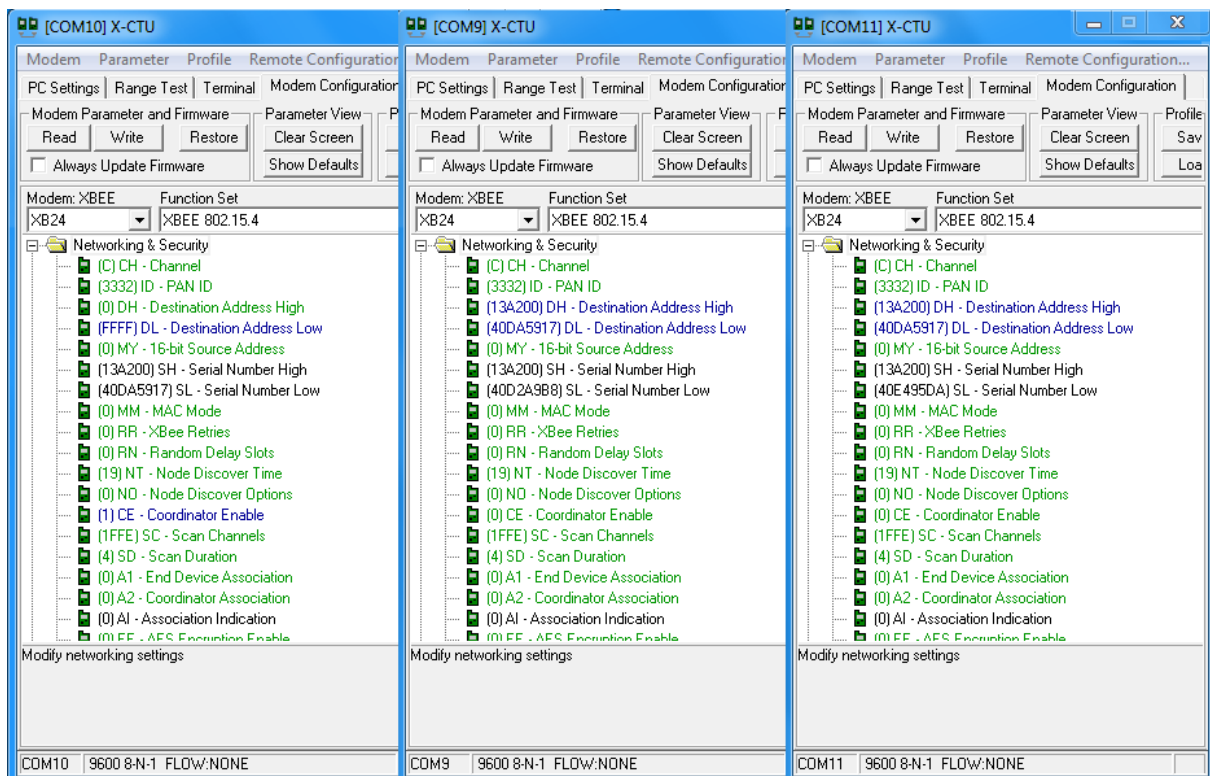


Figura 4.21: Ventana Modem Configuration para la configuración de tres módulos Xbee en una comunicación punto multipunto.

Por último, en la ventana Terminal, se mandan los comandos para comprobar la correcta configuración de los módulos. En la figura 4.22 se ve un ejemplo. La ventana de la izquierda pertenece al nodo Coordinador que envía un mensaje que lo reciben los otros dos dispositivos. A su vez, cada uno de ellos le responde de manera independiente ya que, los mensajes de un

dispositivo no deben de ser vistos por otros dispositivos, solamente por el Coordinador. En caso contrario, se estaría hablando de una comunicación todos a todos, que se verá en el apartado siguiente 4.2.4.

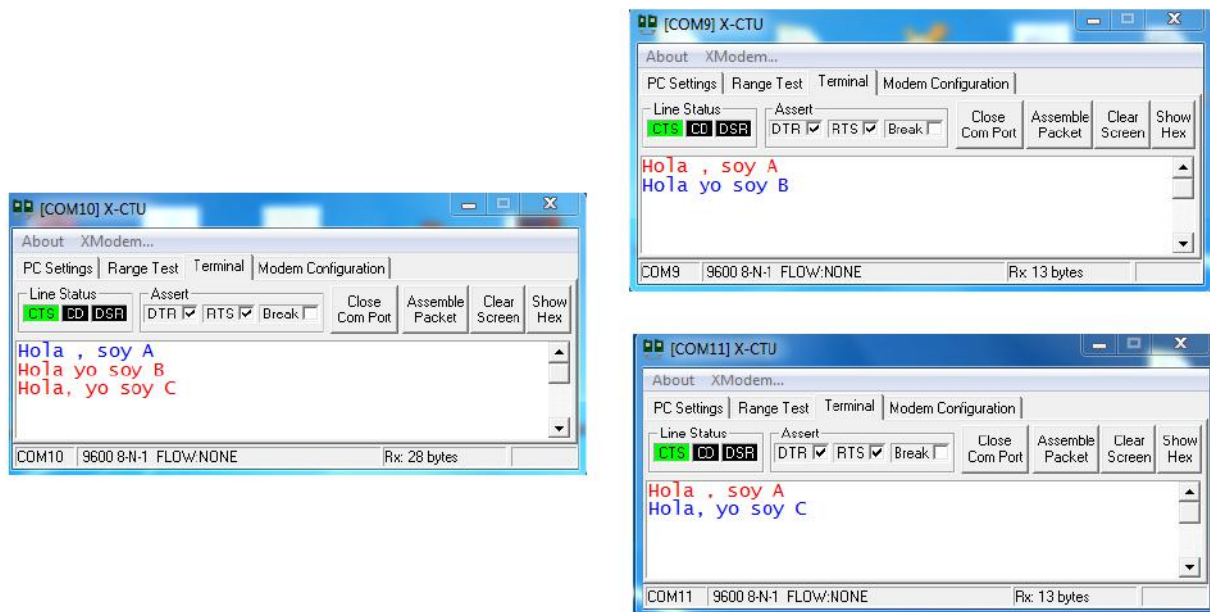


Figura 4.22: Ventana Terminal de visualización para la configuración de tres módulos Xbee en una comunicación punto a multipunto

4.2.4. Enlace Broadcast

Los enlaces Broadcast (todos a todos) son enlaces de comunicación donde todos los dispositivos se comunican con todos. Es decir, cualquier dispositivo dentro de una red, podrá mandar y recibir mensajes y comandos de cualquier otro dispositivo que esté también dentro de la red.

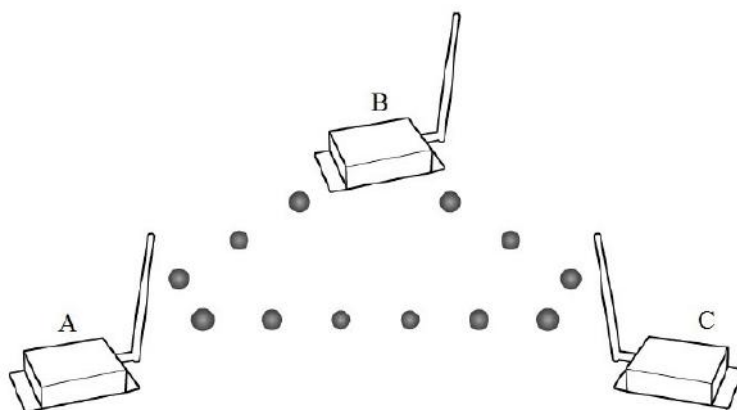


Figura 4.23: Ejemplo de configuración Broadcast.

Para ello, se deberá configurar cada uno de los dispositivos, como el Coordinador del apartado anterior. Es decir, la dirección a la que apunten, sera DL=FFFF abarcando así todas las

direcciones de dispositivos disponibles que pueda haber en esa misma red. En la tabla 4.3, los valores a introducir en cada parámetro.

	Módulo A	Módulo B	Módulo C
PAN ID	3332	3332	3332
DH	0	0	0
DL	FFFF	FFFF	FFFF
CE	1	0	0
SH	13A200	13A200	13A200
SL	40DA5917	40D2A9B8	40E495DA

Tabla 4.3: Configuración de tres módulos Xbee para una comunicación Broadcast.

Por tanto, una vez más, abriendo la ventana de Modem Configuration, se procede como en los dos casos anteriores, a modificar los parámetros de acuerdo con la tabla 4.3. Una vez compilados, se escriben y guardan los valores pulsando Write, y a la nueva lectura de los valores, se deberá ver algo similar a la figura 4.24

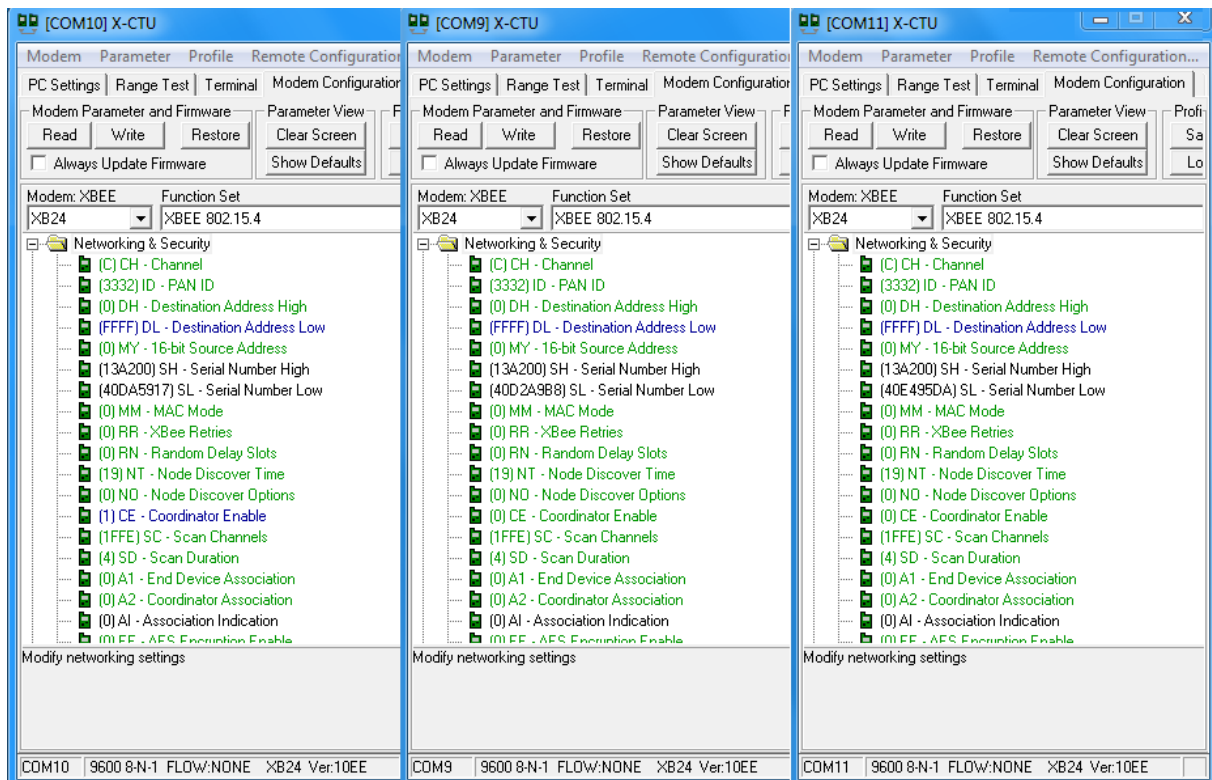


Figura 4.24: Ventana Modem Configuration para la configuración de tres módulos Xbee en una comunicación broadcast

Y como en todos los casos anteriores, se deberá comprobar en la ventana Terminal si se ha realizado correctamente la configuración, teniendo en cuenta que cualquier mensaje que se envíe/recibe debe ser visto por todos los dispositivos de la red. Asimismo, como en los ejemplos anteriores, se puede comprobar cuales son los mensajes enviados (color azul) y cuales los recibidos (color rojo)

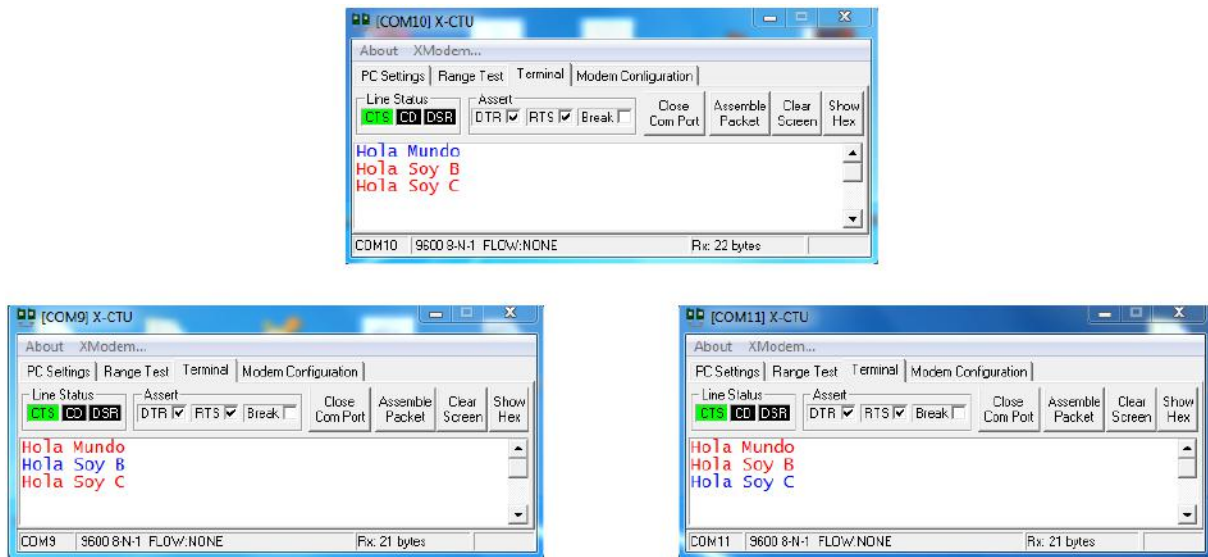


Figura 4.25: Ventana Terminal de visualización para la configuración de tres módulos Xbee en una comunicación Broadcast

4.3. Implementación Sistema Wi-Fi

En cuanto a comunicaciones por Wi-Fi, hay una gran variedad de módulos y placas desarrolladas con esta tecnología. Para este proyecto, se ha utilizado el módulo Wi-Fi **ESP8266** [49], en primer lugar debido a su económico precio, y en segundo lugar, debido a su facilidad y sencillez de instalación y configuración.

El módulo, es el descrito en el capítulo anterior. Destacar de él que se alimenta con 3.3 V y que se comunica por el puerto serie que tiene el módulo. En este caso, se ha conectado a un conversor USB, como el utilizado en los módulos Bluetooth, con el fin de conectarlo al ordenador. Las conexiones a este conversor son las que se ve en la figura 4.26:

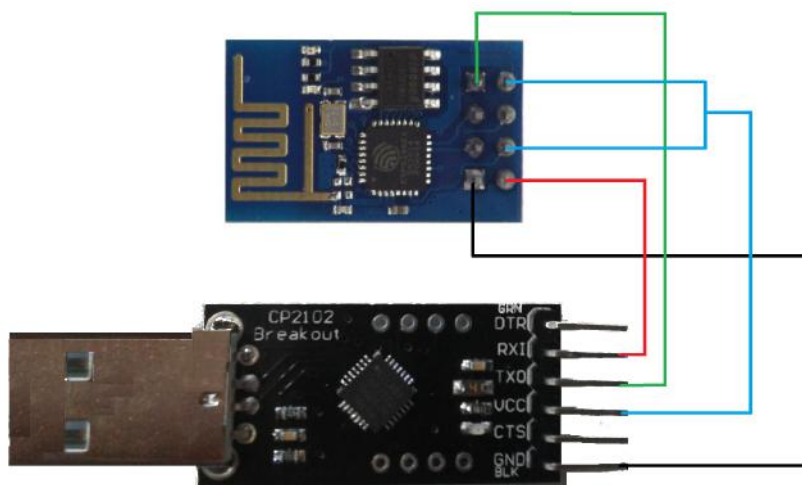


Figura 4.26: Mapa de conexiones entre ESP8266 y conversor USB

Otras características de este dispositivo son:

- **Bajo consumo.** El módulo WiFi seleccionado, puede consumir en torno a los 50mA pero puede llegar hasta los 200mA en algunas opciones y configuraciones específicas.

- **Versión.** Este módulo viene implementado con la versión de Wifi 802.11 b/g/n, compatible con todos los dispositivos WiFi actuales. Solamente por encima estaría la versión 802.11ac.

- **Alcance.** Los valores nominales teóricos de alcance máximo son 100 metros, aunque no se especifica si en la recepción de paquetes se consigue el 100 %.

Para su configuración, aunque se podría haber elegido cualquier otro terminal de comandos, se ha utilizado el mismo terminal software que en Bluetooth, **CoolTerm** simplemente porque ya se había estudiado previamente.

Una vez conectado al ordenador, y como ya se tenían los drivers instalados previamente, se abre el programa modificando el valor del baud rate a 115200 bps (ya que es el valor por defecto). Como se ha dicho, este módulo también es capaz de establecer una comunicación mediante comandos AT. Sin embargo, aunque comparte comandos AT genéricos con Bluetooth y ZigBee, también posee comandos propios de comunicaciones Wi-Fi. A continuación se verán los mas importantes aunque para más información, se puede consultar el resto de comandos en el Anexo A.

Primero como siempre, será comprobar que las conexiones de los pines han sido satisfactorias para lo cual se envía el comando **AT** y deberá responder el módulo con un OK. Posteriormente, se tiene la opción de configurar el módulo en tres modos con el comando **CWMODE**: estación(1), router(2) o ambas(3). Una vez hecho, se procede a la búsqueda de redes WiFi disponibles cercanas. Esto lo realiza el comando **CWLAP**.

Con este comando, se muestra una lista de redes WiFi cercanas con una serie de valores entre los que destaca la codificación (abierto, WEP, WPA, WPA2..), el nombre (SSID) de la red, y uno de los aspectos mas interesantes, la RSSI con la que se recibe la señal. Este último dato, servirá para futuras pruebas de medidas, alcance máximo y potencia recibida.

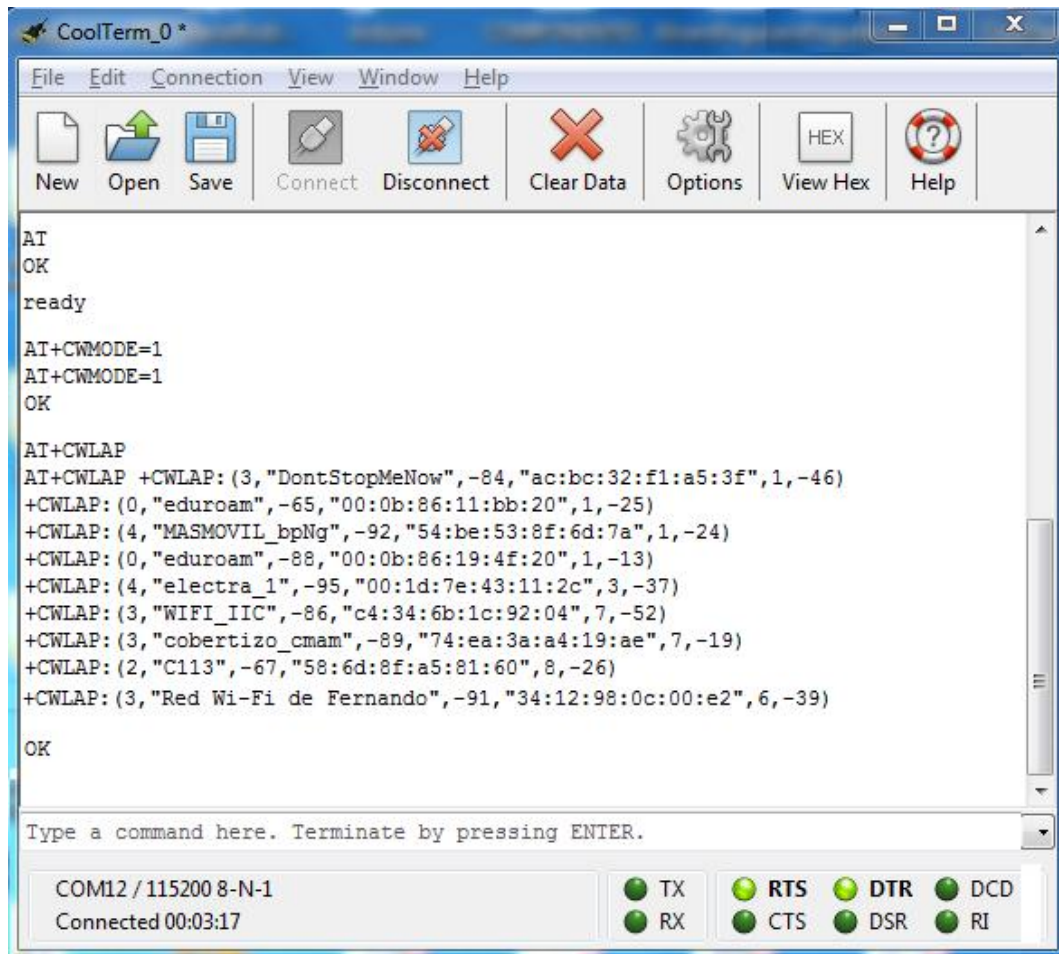


Figura 4.27: Redes Wi-Fi descubiertas por el módulo ESP8266.

La comunicación de este módulo se puede realizar con otro módulo, o con cualquier dispositivo en el que esté implementado un pequeño módulo WiFi (ordenadores portátiles, smartphones...). Por ello se ha escogido trabajar con la misma tablet utilizada en la comunicación Bluetooth. Para este proyecto, se ha utilizado el software **WiFi TCP/UDP Controller** descargado desde Play Store de Android (<https://play.google.com/store/apps/details?id=udpcontroller.nomall=es>).

Al abrir el software Android, se debe configurar una serie de parámetros en él. El primero que se debe cambiar es el campo **IP**. La dirección IP actual, se muestra cuando se escribe el comando **AT CIFS**. Por otro lado, el tipo de protocolo a escribir es **TCP** en vez de UDP. TCP es, en resumen, el protocolo orientado a conexión entre dos sistemas. Sin embargo, en el protocolo UDP, el flujo de datos es unidireccional.

Solo falta configurar el módulo. Para ello se siguen un par de comandos:

- **AT+CIPMUX**. Este módulo WiFi admite 5 conexiones simultáneamente. Para esta prueba, se ha reducido a una sola conexión igualando el comando anterior a 0.
- **AT+CIPSTART**. Inicia una conexión con un servicio. Se le deben de pasar unos parámetros como el tipo de conexión (TCP), la dirección IP de destino (en este caso la de la tablet Android) y el puerto.

- **AT+CIPSERVER.** Activa el modo servidor. Con el valor 0, requerirá un reinicio para hacerse efectivo.
- **AT+CIPSEND.** Y para poder enviar datos desde el módulo, este es el comando justo. Se debe indicar el id (numero de conexion de referencia) seguido de la longitud de datos que se van a enviar/recibir.

Si todo ha salido tal y como estaba previsto, el sistema responderá con un *CONNECT*. Ahora ya están conectado ambos dispositivos para una comunicación bidireccional como se puede ver en las figuras siguientes:

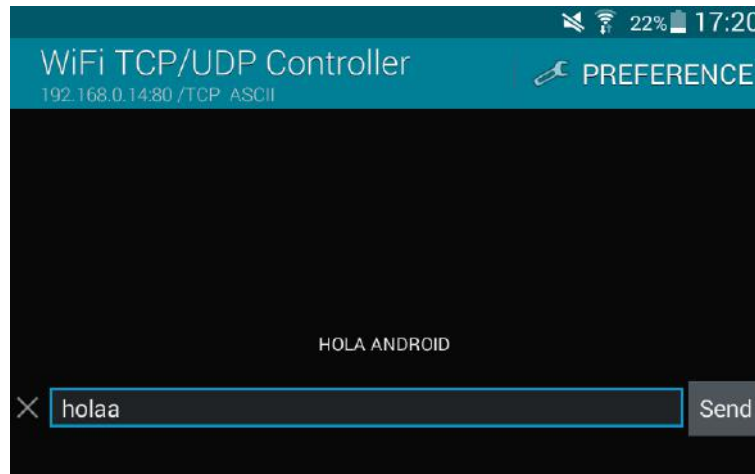


Figura 4.28: Ejemplo de comunicación desde el módulo ESP8266 hacia la tablet.

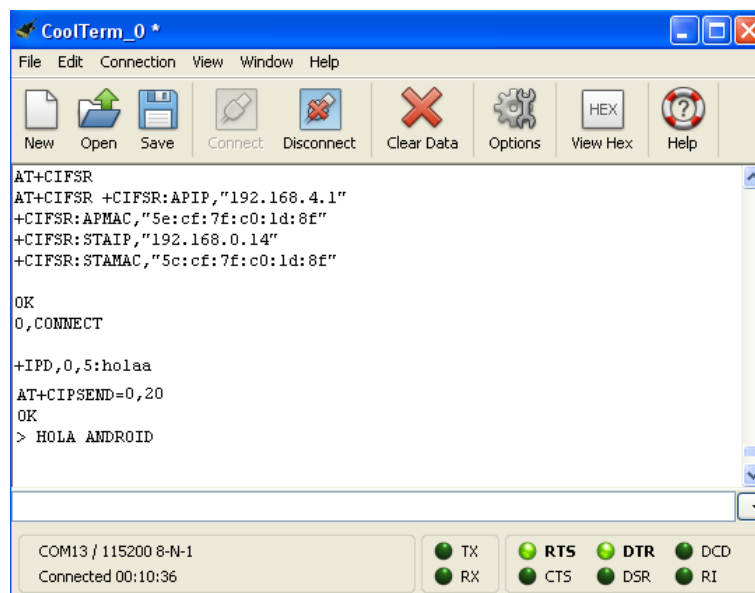


Figura 4.29: Ejemplo de comunicación desde la tablet hasta el módulo ESP8266.

5

Experimentos realizados y resultados.

En este capítulo se presentan los experimentos y resultados obtenidos a lo largo de la realización del proyecto. Dichos experimentos se han realizado, como consecuencia de la implementación realizada en el capítulo anterior. Dicha implementación proviene de la tabla-resumen del capítulo 3, en donde se decidió escoger, los módulos de radiofrecuencia. Para estudiar los diversos factores, se han realizado las pruebas haciendo una comparación entre entornos abiertos y entornos cerrados.

Todas las pruebas y experimentos que se describen en este proyecto han sido realizados en el Edificio Joseph Fourier (Edificio C) de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid, por lo que todas las medidas, distancias y escenarios experimentados, se han realizado acorde a las dimensiones del edificio en cuestión.

5.1. Pruebas Zigbee.

Para las pruebas de ZigBee, se ha utilizado el software X-CTU [55] mencionado ya en el capítulo anterior.



Figura 5.1: Ejemplo de la interfaz del software X-CTU.

En primer lugar, se han realizado pruebas para medir la **potencia de señal recibida (RSSI)**, o lo que es lo mismo, el nivel de fuerza de la señal de un dispositivo inalámbrico del último paquete recibido, medido en -dBm. Para ello, se ha realizado las pruebas con tres valores diferentes de potencia de transmisión: 2dBm, 0dBm y -2dBm. El valor de RSSI ha sido medido después de mandar 50 paquetes de 32 bytes cada uno para posteriormente calcular un valor promedio de RSSI que es el que se anota.

De la figura 5.2 se extraen varias conclusiones. En primer lugar, y como se esperaba, los valores medidos de RSSI disminuyen linealmente a medida que aumenta la distancia. Por otro lado, otra conclusión que se podría sacar de la figura anterior, es que, aparentemente, una mayor potencia de transmisión genera un mejor rendimiento. Por último hablar del alcance, ya que aunque el fabricante dice en entornos cerrados, el máximo alcance son 30m, los experimentos realizados dan un alcance máximo de 55 metros (85 % de paquetes recibidos con éxito). Los dispositivos aún llegan a 'verse' hasta 58 metros, pero no se ha analizado debido a que el porcentaje de paquetes con éxito era menor del 50 %, por lo que no tiene sentido estudiarlo.

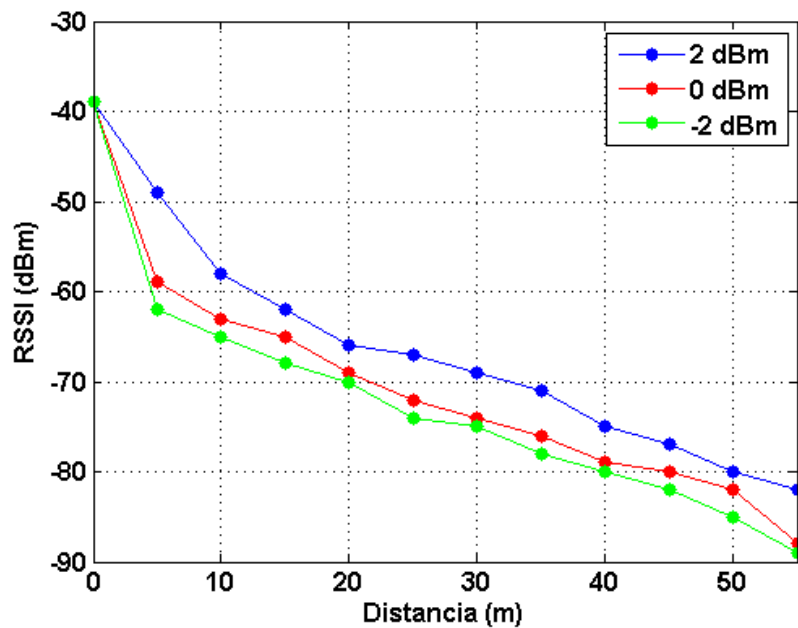


Figura 5.2: Valores medidos de RSSI frente a la distancia a determinados valores de potencia de transmisión

También se ha realizado quitando el módulo anterior e introduciendo un módulo Xbee Pro con antena Wire. Los resultados (Ver figura X) son concluyentes. Con el XbeePRO se mejora el alcance, llegando a los 70 metros con un éxito total de recepción de paquetes. También, y debido a su antena física omnidireccional, se mejoran los valores de RSSI, muy significativamente.

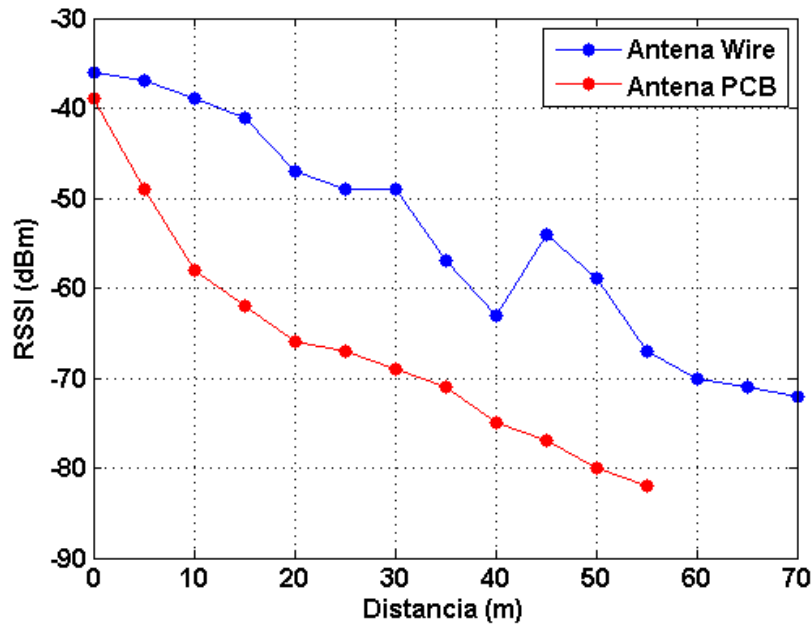


Figura 5.3: RSSI y distancia en interior horizontal para XbeePRO con wire antena y Xbee con PCB antena.

El mismo experimento se ha realizado para entornos abiertos, salvo que esta vez ya solamente se trabaja con la potencia de transmisión de 2dBm debido a que, como se ha visto, es la que ofrece mejores resultados. Las pruebas se han realizado tanto con Xbee como XbeePRO y os resultados obtenidos son los siguientes:

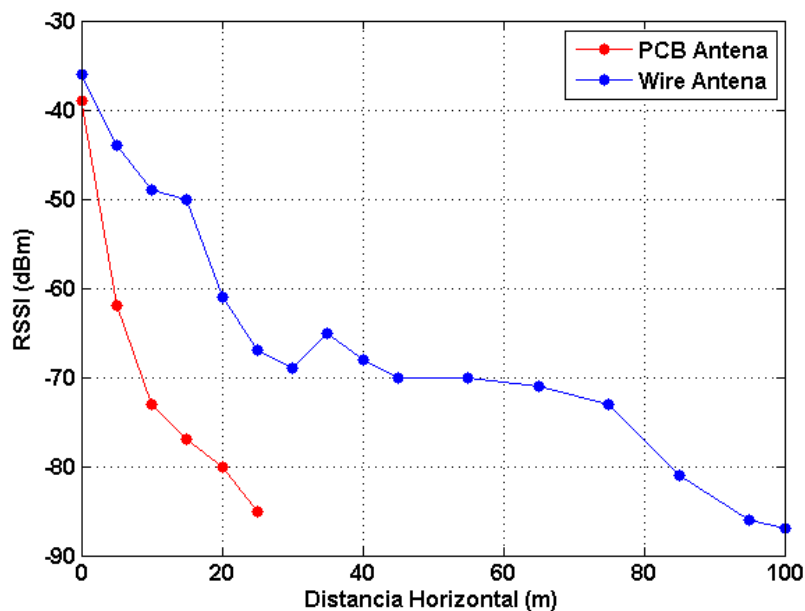


Figura 5.4: RSSI y distancia en exteriores para XbeePRO con wire antena y Xbee con PCB antena.

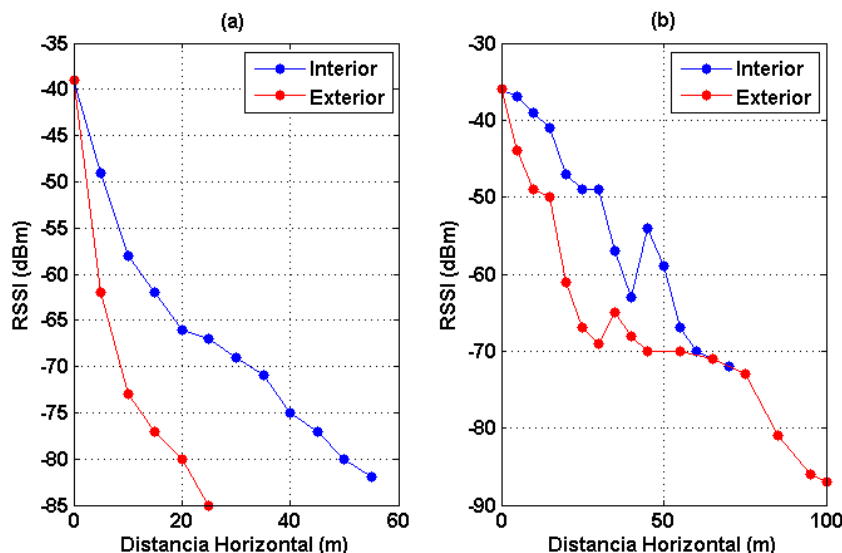


Figura 5.5: Comparación de RSSI y distancia en entornos interiores y exteriores para (a) Xbee con PCB antena y (b) XbeePRO con wire antena.

Si se comparan los dos análisis (ver figura 5.5), observando los experimentos realizados en interior y en exterior, se llega a varias conclusiones. En primer lugar, en entornos interiores, el sistema de comunicación Zigbee tiene un mayor alcance (la distancia máxima que se ha podido probar en interiores ha sido de 70 metros), por lo que se puede estimar que el XbeePRO pueda llegar también a los 100m de alcance.

Una de las causas de este mayor alcance en interiores es que en exteriores, las ondas se propagan en todas las direcciones mientras que en entornos interiores, dichas ondas rebotan en personas, columnas...dando lugar incluso a una mayor direccionalidad. En segundo lugar, aparte del alcance, la potencia con la que la señal llega al receptor, también se mejora en entornos interiores, probablemente debido al mismo motivo anterior. A su vez y pensando en el haz de cada antena, se ha procedido también a la medición de alcance y RSSI en el plano vertical con los dos módulos ZigBee disponibles. En la figura 5.6 se ven los resultados.

Se observa que el módulo XbeePRO mantiene su mejor rendimiento frente al módulo convencional incluso en el plano vertical. Como se puede comprobar, a una altura máxima medida de 15 m, la potencia de recepción del Xbee convencional es de -75 dBm, mientras que del XbeePRO es de -50. También se observa que, en ambos casos, ni siquiera en la altura de 15 metros, hay pérdida de paquetes y, aunque el valor de la potencia recibida en recepción, es bajo lo importante es que se ha realizado una comunicación completa y sin pérdidas.

Por último, en la figura 5.7 se realiza una comparación de los dos módulos tanto en el plano vertical como en el plano horizontal.

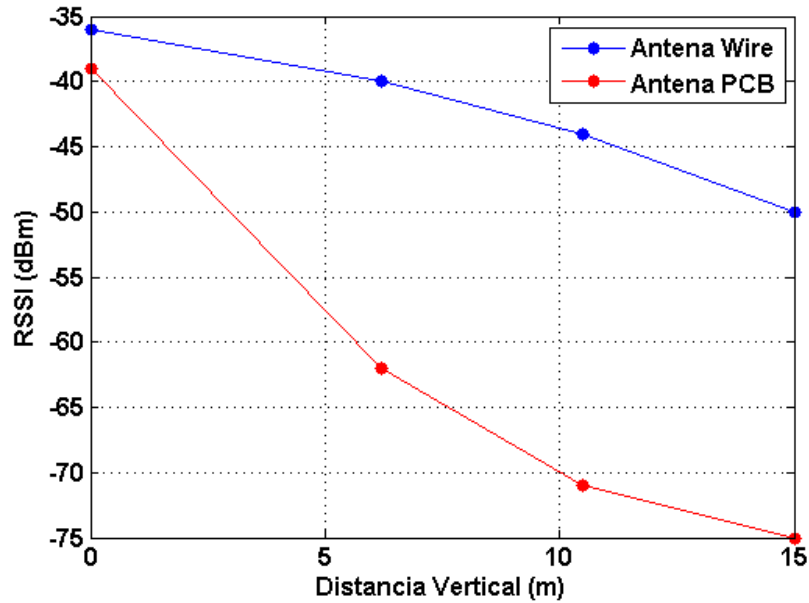


Figura 5.6: RSSI y distancia en interior vertical para XbeePRO con wire antena y Xbee con PCB antena.

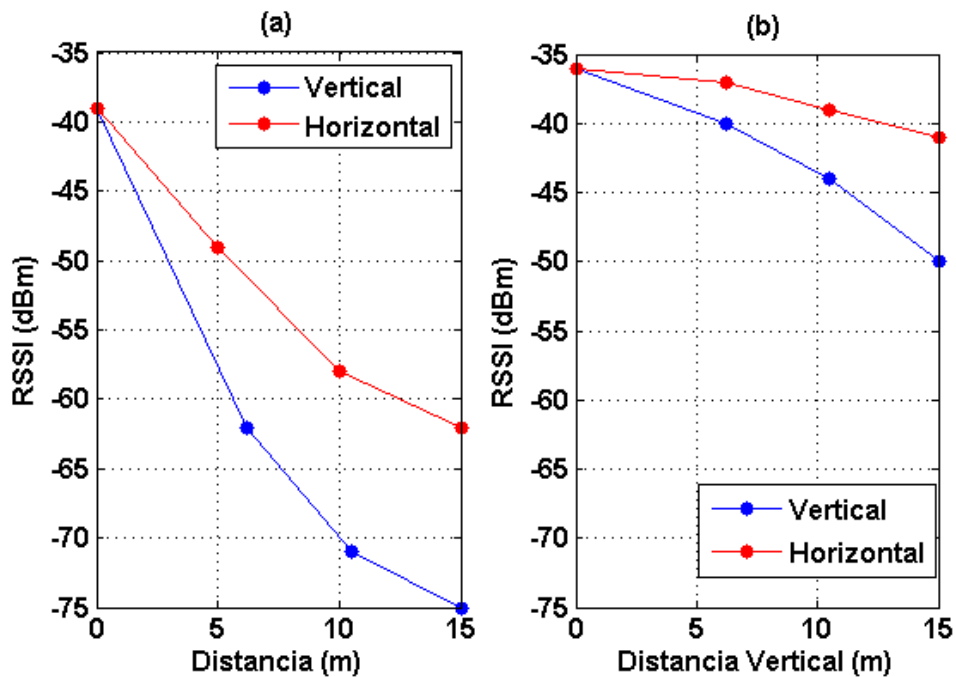


Figura 5.7: Comparaciones entre los planos vertical y horizontal de los módulos (a) Xbee S1 y (b) XbeePRO.

De la figura anterior se puede extraer que, utilizando el módulo **Xbee S1**, se puede aproximar que del plano horizontal al plano vertical, la intensidad de señal recibida **decae 2.5 dBm por metro**. Utilizando el otro módulo, **Xbee PRO**, se aproxima que la intensidad de señal recibida

decae 1.5 dBm por metro.

Estos dato son bastante útiles para poder estimar valores de RSSI en distancias verticales. De esta manera, conociendo los valores en el plano horizontal en 20 metros, para **20 metros de altura**, se puede estimar una RSSI de **-80 dBm con Xbee S1** y de **-55 dBm con Xbee PRO**.

Otro aspecto analizado ha sido el **rendimiento (throughput)** de ZigBee. Este rendimiento se define como la cantidad de datos enviados/recibidos durante un periodo de tiempo. El rendimiento de un sistema depende de la velocidad y del tamaño de los paquetes. Para ello, se ha programado un envío de paquetes de 10 bytes incrementándolos hasta llegar a 100 bytes. Se ha realizado así principalmente por un motivo: ZigBee permite fragmentación. Esto quiere decir que, independientemente de las opciones del módulo utilizado, si se prueba a enviar una trama de 255 bytes, la transmisión de datos se verá interrumpida originando múltiples paquetes. Para evitar esa fragmentación, el tamaño máximo de paquete de cada trama viene dada por la hoja de características de ZigBee. Por lo que de acuerdo con dicha hoja y en el caso de los módulos utilizados en este proyecto, la carga máxima de los paquetes que puede soportar es de 100 bytes. Aún así, para evitar una posible sobrecarga con el protocolo ZigBee, se han utilizado paquetes de 90 bytes de tamaño.

El rendimiento se puede ver en la figura 5.8, donde intervienen diferentes baud rates y los tamaños de los paquetes. Dicho rendimiento ha sido calculado en base a 50 paquetes recibidos y repetidos varias veces para obtener el valor medio.

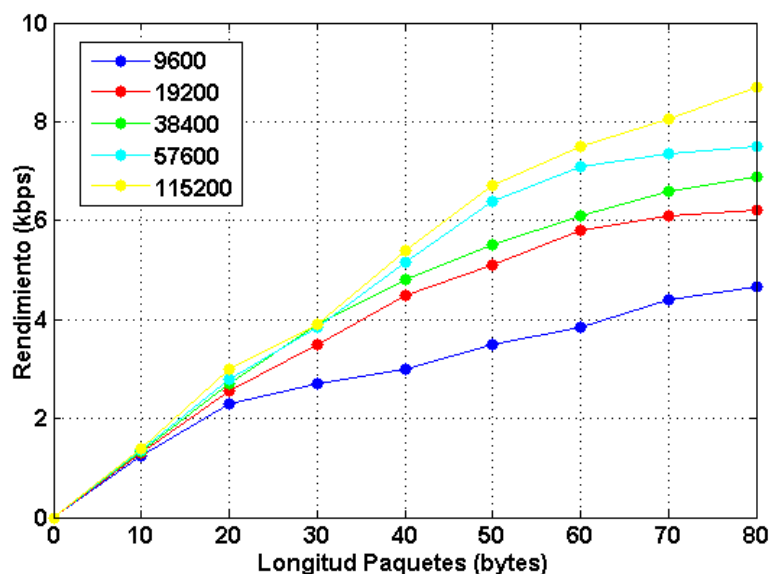


Figura 5.8: Rendimiento del Zigbee a diferentes valores de baudrate y tamaño paquetes

Se puede observar que el rendimiento o throughput aumenta, a la vez que también aumenta el baud rate. Si se compara con las hojas de especificaciones de ZigBee, en ellas figura una transmisión de datos de 250 kbps, pero como se ha podido ver, los resultados obtenidos del experimento practico distan bastante de dicho valor. De hecho, solo se ha conseguido una velocidad máxima de 8.9 kbps a un baud rate de 115200 bps y usando el máximo tamaño de paquete posible.

5.2. Pruebas Bluetooth.

Al igual que en el caso anterior, la primera prueba realizada ha sido la distancia máxima de **alcance** a su vez que se obtiene la potencia recibida **RSSI**. Las pruebas se han realizado con la colocación de dos módulos Bluetooth HC-05, separándose cada metro y enviando tramas de paquetes de 32bytes. Los resultados obtenidos después de obtener la media de 20 pruebas.

Como se puede apreciar en la figura 5.9, estos módulos Bluetooth llegan a comunicarse a una distancia máxima de 15 metros. Se concluye como distancia máxima la anteriormente mencionada ya que, pasados esos 15 metros de la comunicación, los datos recibidos no eran los mismos que los enviados y por tanto la comunicación deja de ser fiable al 100 %. Por otro lado, comentar que aunque la RSSI a esos 15m ya es demasiado baja, entorno a los -85 dBm, es fiable ya que en los experimentos, no hay pérdida de paquetes.

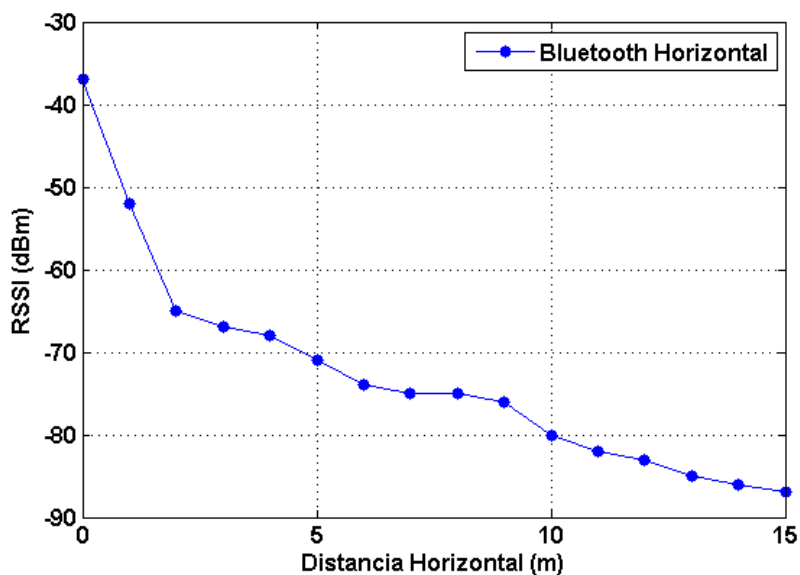


Figura 5.9: Alcance máximo y RSSI de los módulos Bluetooth HC-05

El mismo experimento se ha realizado en exteriores, donde se compara con el realizado en interiores, dando lugar a la figura 5.10. En ella se puede comprobar, como en el caso de los Xbee, que también funciona mejor para entornos interiores. Tanto la distancia, como la RSSI, da peores prestaciones para entornos al exterior.

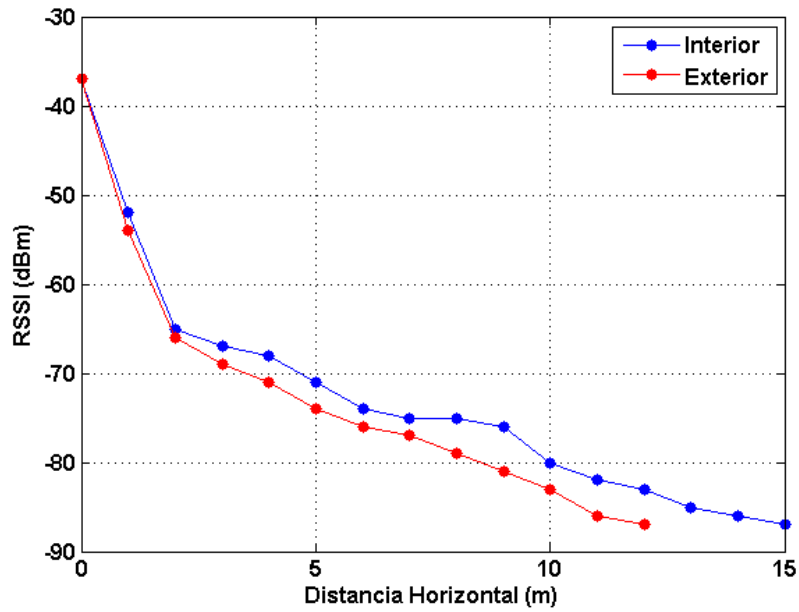


Figura 5.10: Comparación de RSSI y distancia en entornos interiores y exteriores para módulos Bluetooth HC-05

Por su parte, se ha evaluado los efectos de la comunicación en el plano vertical. Para ello, igual que con ZigBee, se ha comparado este estudio con el del plano horizontal. El resultado (Ver figura 5.11) es el esperado. A medida que se avanza en metros de altura, la potencia de recepción disminuye.

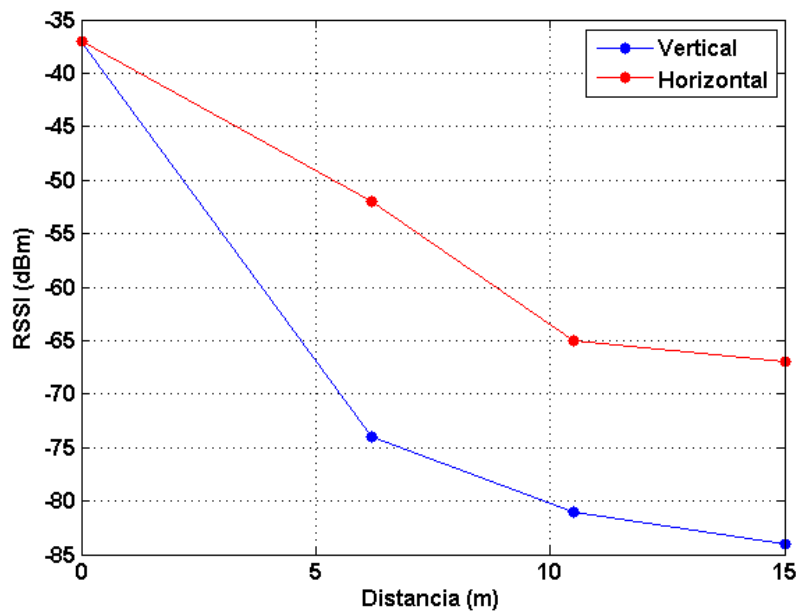


Figura 5.11: Comparación de RSSI y distancia en en plano horizontal y vertical para módulos Bluetooth HC-05

6

Conclusiones y trabajo futuro

6.1. Conclusiones.

El presente Proyecto Final de Carrera se ha centrado en el estudio de sistemas de comunicación para su aplicación en términos de robótica cooperativa. Se ha analizado detalladamente diferentes sistemas de comunicación, desde sistemas ópticos, hasta los últimos sistemas de telefonía, pasando por ultrasónicos y de radiofrecuencia. En primer lugar, se ha realizado un análisis teórico y evolutivo de cada uno de los sistemas de comunicación y donde se ha podido verificar cómo la tecnología crece a pasos agigantados y cómo cada vez más, ese avance va en términos de velocidad y rapidez de respuesta. Seguidamente, el análisis de cada uno de ellos ha dado paso a un detallado diseño con diferentes propuestas de sensores y de donde, se ha escogido los sistemas de radiofrecuencia para su posterior implementación.

Los dispositivos de los sistemas utilizados han sido dos módulos HC-05 (Bluetooth), un módulo ESP8266 (Wi-Fi) y cinco módulos Xbee s1/PRO (ZigBee). Con el objetivo de estudiar el funcionamiento de los sistemas por radiofrecuencia en robots, se han diseñado e implementado los módulos mencionados anteriormente. Paralelamente se han estudiado en primer lugar, las tensiones de entrada y conexiones necesarias de los pines de los módulos con lo que después, poder estudiar los distintos software utilizados y realizar las configuraciones de ciertos parámetros para su correcto funcionamiento y posterior realización de pruebas.

De los análisis y experimentos llevados a cabo durante el proyecto, se pueden extraer las siguientes conclusiones generales:

- Con los distintos módulos implementados se ha demostrado la sencillez en su instalación. Esto es un aspecto muy positivo de cara a la robótica donde el número de implementaciones es mayor.
- Tanto el entorno utilizado, como la orientación de las mediciones, influyen en el rendimiento del sistema. Se ha visto, como es preferible medir en un entorno de interior, donde aunque haya diversos rebotes de las ondas, dichos rebotes pueden ser positivos haciendo guiar las ondas hasta el receptor de manera más precisa que en entornos exteriores.

- El estudio realizado y la posterior implementación ha proporcionado buenos resultados. En algunos casos se han mejorado incluso los resultados (alcance) con respecto al fabricante aunque en otros los resultados se alejan bastante de los valores ofrecidos por el mismo (velocidad).

6.2. Trabajo Futuro.

A pesar del trabajo realizado en el presente Proyecto Fin de Carrera, existen varios aspectos que deben ser estudiados y se proponen como diferentes líneas de trabajo futuro continuando y mejorando así el estudio realizado en este proyecto:

- Una vez estudiado los sistemas de radio más conocidos, se propone una implementación conjunta entre dos de esos sistemas. Es más, hay módulos ZigBee que llevan ya implementado un pequeño módulo WiFi.
- Realizar un estudio similar al realizado en este proyecto pero con alguno de los demás sistemas propuestos e implementarlos, para poder así comparar datos pero esta vez, experimentalmente.
- Realización de '*mini robots*'. Debido a que tanto el módulo WiFi como el de Bluetooth (Zigbee tendría que ser un módulo de la serie 2) llevan microprocesadores programables, se propone la creación de robots utilizando los módulos como unidad central de los mismos. Se reducirían los gastos, la creación de numerosas pistas así como también se ahorraría en tiempo.

Glosario de acrónimos

- **AM:** *Aplitude Modulation.*
- **AP:** *Access Point.*
- **DSSS:** *Direct Sequence Spead Spectrum.*
- **DTMF:** *Dual Tone Multi Frequency.*
- **EDGE:** *Enhanced Data rates for GSM Evolution.*
- **EDR:** *Enhanced Data Rate.*
- **FHSS:** *Frequency Hopping Spead Spectrum.*
- **FSO:** *Free Space Optical.*
- **FTDI:** *Future Technology Devices International.*
- **GPIO:** *General Purpose Input Output.*
- **GPRS:** *General Packet Radio System.*
- **GPS:** *Global Positioning System.*
- **GPSSM:** *Global Sistem Mobile communications.*
- **HSDPA:** *High Speed Download Packet Access.*
- **HSPA:** *High Speed Packet Access.*
- **IP:** *Internet Protocol.*
- **IR:** *InfraRed.*
- **LAN:** *Local Area Network.*
- **LED:** *Light Emmiting Diode.*
- **LTE:** *Long Term Evolution.*
- **MAC:** *Media Access Control.*
- **MIMO:** *Multiple Input Multiple Output.*
- **OFDM:** *Orthogonal Frequency Division Multiplexing.*
- **OSI:** *Open System Interconnection.*
- **PAN:** *Personal Area Network.*

- **PHY:** *Physical Signaling Layer.*
- **PIN:** *Personal Identification Number.*
- **RF:** *Radio Frequency.*
- **RSSI:** *REceived Signal Strength Indicator.*
- **UAV:** *Unmanned Aerial Vehicle.*
- **UGV:** *Unmanned Ground Vehicle.*
- **US:** *UltraSonidos.*
- **USB:** *Universal Serial Bus.*
- **WLAN:** *Wireless Local Area Network.*
- **WPAN:** *Wireless Personal Area Network.*

Bibliografía

- [1] G. Benet, F. Blanes, J.E. Simó, and P. Pérez. Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots. In *Robotics and Autonomous Systems 1006*, volume 44, pages 1–12. Elsevier Science, 2002.
- [2] M.R. Cerezo. Sistema de control remoto para aplicaciones domÓticas a travÉs de internet. In *Escuela Politecnica Superior - Universidad Aut3noma de Madrid*, pages 1–200, Oct 2014.
- [3] A. H. Ismail, M. N. Ayob, T. Kaihao, H. B. Hassrizal, M. S. M. Hashim, N. A. Rahim, M. S. M. Azmi, M. A. Aziz, A. B. Shahrman, and K. Wan. Investigation of homogeneous multi robots communication via bluetooth. In *Computer Applications and Industrial Electronics (ISCAIE), 2012 IEEE Symposium on*, pages 124–129, Dec 2012.
- [4] Amadeu Fernandes, Micael S. Couceiro, David Portugal, Jo3o Machado Santos, and Rui P. Rocha. Ad hoc communication in teams of mobile robots using zigbee technology. *Computer Applications in Engineering Education*, 23(5):733–745, 2015.
- [5] J. Velagic, N. Osmic, F. Hodzic, and H. Siljak. Outdoor navigation of a mobile robot using GPS and GPRS communication system. In *ELMAR, 2011 Proceedings*, pages 173–177, Sept 2011.
- [6] R. Tsuzuki, G. Yamauchi, K. Nagatani, and K. Yoshida. Teleoperation of mobile robots using hybrid communication system in unreliable radio communication environments. In *2014 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (2014)*, pages 1–5, Oct 2014.
- [7] Mehran Anvari. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*. John Wiley and Sons Ltd, 2012.
- [8] S. Elvira, A. de Castro, and J. Garrido. ALO: an Ultrasound System for Localization and Orientation based on Angles. In *Microelectronics Journal*, volume 44, pages 959–967. Conference on Design of Circuits and Integrated System, October 2013.
- [9] F. Arvin, K. Samsudin, and A. R. Ramli. A short-range infrared communication for swarm mobile robots. In *2009 International Conference on Signal Processing Systems*, pages 454–458, May 2009.
- [10] H.R. Everett. *Sensors for Mobile Robots: Theory and application*. A.K. Peters, Ltd, 1995.
- [11] A. M. Mahdy and J. S. Deogun. Optimizing free space optics for city-wide wireless networks. In *Networking, 2007. ICN '07. Sixth International Conference on*, pages 66–66, April 2007.
- [12] Ray Horak. *Telecommunications and Data Communications Handbook*. Wiley-Interscience, A John Wiley and Sons, INC., 2008.

- [13] P. J. Cruz and R. Fierro. Towards optical wireless communications between micro unmanned aerial and ground systems. In *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015 International Conference on*, pages 669–676, June 2015.
- [14] Mahmudur Khan and Murat Yuksel. Autonomous alignment of free-space-optical links between uavs. In *Proceedings of the 2Nd International Workshop on Hot Topics in Wireless, HotWireless '15*, pages 36–40, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [15] Yu Fai Fung, Mingjun Dai, and M. F. Ercan. Underwater short range free space optical communication for a robotic swarm. In *4th International Conference on Autonomous Robots and Agents, 2009. ICARA 2009.*, pages 529–532, Feb 2009.
- [16] B. Tian, F. Zhang, and X. Tan. Design and development of an led-based optical communication system for autonomous underwater robots. In *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 1558–1563, July 2013.
- [17] S.H. Choo, S.H.M. Amin, N. Fiscal, C.F. Yeong, and J. Abu Bakar. Using bluetooth transceivers in mobile robot. *Student Conference on Research and Development, SCOReD*, pages 472–476, 2002.
- [18] Bluetooth Core Specification Working Group. Bluetooth simple pairing whitepaper. *Bluetooth SIG Whitepaper*, 2006.
- [19] Yeong Che Fai, S. H. M. Amin, N. bt Fisal, and J. A. Bakar. Bluetooth enabled mobile robot. In *Industrial Technology, 2002. IEEE ICIT '02. 2002 IEEE International Conference on*, volume 2, pages 903–908 vol.2, Dec 2002.
- [20] S. H. Choo, S. H. M. Amin, N. Fisal, C. F. Yeong, and J. Abu Bakar. Using bluetooth transceivers in mobile robot. In *Research and Development, 2002. SCOReD 2002. Student Conference on*, pages 472–476, 2002.
- [21] H. Gulati, S. Vaishya, and S. Veeramachaneni. Bluetooth and wi-fi controlled rescue robots. In *2011 Annual IEEE India Conference*, pages 1–5, Dec 2011.
- [22] Technical White Paper. The Fifth Generation of Wi-Fi. *Cisco Public Information*, 2014.
- [23] IEEE 802.11. Working Group for WLAN Standards.
- [24] S. Zvanovec, P. Pechac, and M. Klepal. Wireless lan networks design: Site survey or propagation modeling? In *Radioengineering*, volume 12, pages 42–49, December 2003.
- [25] Saraladevi. B and Sedhumadhavan. S. Video streaming in autonomous mobile robot using wi-fi. In *Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), 2015 International Conference on*, pages 1–5, March 2015.
- [26] S. Srivastava and B. S. Manoj. Path planning algorithms for mesh networked robots based on wifi geo-location. In *Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), 2012 IEEE International Conference on*, pages 111–116, Dec 2012.
- [27] S. Mazuelas, A. Bahillo, R. M. Lorenzo, P. Fernandez, F. A. Lago, E. Garcia, J. Blas, and E. J. Abril. Robust indoor positioning provided by real-time rssi values in unmodified wlan networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 3(5):821–831, October 2009.

- [28] S. Benjamin Arul. Wireless home automation system using zigbee. In *International Journal of Scientific and Engineering Research*, volume 5, December 2014.
- [29] Akshay Sharma, Ashish Upadhyay, Ashwani Singh, and M.V. Patil. Zigbee based voice recognition wireless home automation system. *Indian Streams Research Journal*, 4(6), July 2014.
- [30] Kanchan Kaushal, Taranvir Kaur, and Jaspinder Kaur. Zigbee based wireless sensor networks. In *International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT)*, volume 5, pages 7752–7755, December 2014.
- [31] J. Wan, Y. Wang, Q. Qin, and Y. Li. Multi-robots' communication system based on zigbee network. In *Electronic Measurement Instruments, 2009. ICEMI '09. 9th International Conference on*, pages 3–14–3–19, Aug 2009.
- [32] J.S. Artal, J.Caballero, and D.Lopez. Control y Guiado de un Robot Móvil Autónomo mediante Tecnología GSM. In *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI)*, pages 527–532, Julio 2011.
- [33] Aplicación GSM destinada al control de un Robot Móvil Autónomo mediante Java ME. In *Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI)*, pages 533–538, Julio 2011.
- [34] B. N. Binoy, T. Keerthana, P. R. Barani, A. Kaushik, A. Sathees, and S. N. Aswathy. A GSM-based versatile Unmanned Ground Vehicle. In *Emerging Trends in Robotics and Communication Technologies (INTERACT), 2010 International Conference on*, pages 356–361, Dec 2010.
- [35] G. S. V. Kumar and M. Meenakshi. Wireless Control of Autonomous Wheeled Robot through GPRS – Design and Real Time Validation. In *2013 6th International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*, pages 30–34, Dec 2013.
- [36] L. Wang, A. Ukhanova, and E. Belyaev. Power consumption analysis of constant bit rate data transmission over 3G mobile wireless networks. In *ITS Telecommunications (ITST), 2011 11th International Conference on*, pages 217–223, Aug 2011.
- [37] M. Langerwisch, T. Wittmann, S. Thamke, T. Remmersmann, A. Tiderko, and B. Wagner. Heterogeneous teams of unmanned ground and aerial robots for reconnaissance and surveillance - a field experiment. In *2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, pages 1–6, Oct 2013.
- [38] Datasheet. SRF8 Ultrasonic Sensor. <http://https://www.cs.york.ac.uk/micromouse/Docs/SRF08UltraSonicRanger.pdf>.
- [39] Datasheet. SRF04 Ultrasonic Module. http://www.txrobotic.fr/media/pdf/notices/0880.5_fr.pdf.
- [40] Datasheet. SRF10 Bluetooth Module. <http://www.robotikhardware.de/download/srf10doku.pdf>.
- [41] Datasheet. TSAL6100 IR Emitting Sensor. <http://www.vishay.com/docs/81009/tsal6100.pdf>.
- [42] Datasheet. SE3455 IR Emitting Sensor. <http://datasheet.octopart.com/SE3455-001-Honeywell-datasheet-11837244.pdf>.

- [43] Datasheet. OP280K IR Emitting Sensor. <http://optekinc.com/datasheets/op280.pdf>.
- [44] Datasheet. TSOP4838 IR Receiver Sensor. <http://www.vishay.com/docs/82459/tsop48.pdf>.
- [45] Datasheet. TSOP77438WTT IR Receiver Sensor. <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/1180/0900766b811803b7.pdf>.
- [46] Till Riemer. Mobile robot using Bluetooth Low Energy. In *Turku University of Applied Sciences - Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg*, pages 1–35, Jun 2012.
- [47] Datasheet. CC2540 Bluetooth Module. <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/swrs084f/swrs084f.pdf>.
- [48] Datasheet. HC-05 Bluetooth Module. http://www.linotux.ch/arduino/HC-0305_serial_module_AT_command_set_201104_revised.pdf.
- [49] Datasheet. ESP8266 WiFi Module. http://rancidbacon.com/files/kiwicon8/ESP8266_WiFi_Module_Quick_Start_Guide_v_1.0.4.pdf.
- [50] Datasheet. Xbee 802.15.4 Module. <http://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90000991.pdf>.
- [51] Datasheet. TC65 GSM Module. <http://www.farnell.com/datasheets/318232.pdf>.
- [52] Datasheet. GPRS8000-S Module. <http://www.farnell.com/datasheets/1647425.pdf>.
- [53] Datasheet. SIM5216 3G Module. <http://www.kowatec.com/prod/sim/doc/SIM5216\%20SPEC.pdf>.
- [54] Datasheet. LTE910 4G Module. <http://nimbelink.com/wp-content/uploads/2014/08/Data-Sheet-Skywire-embedded-cellular-modem-LTE-LE910.pdf>.
- [55] Configuration & Test Utility Software. X-CTU software. https://www.cse.msu.edu/~dennisp/SeismicNode/docs/90001003_A.pdf.



Comandos AT

Comandos AT

A continuación se anexa la lista completa de comandos AT disponibles para otras funciones no incluidas o mencionadas en el capítulo de desarrollo del presente proyecto. En primer lugar, se muestra la lista de comandos utilizados para Bluetooth (tabla azul) donde también se anexa una tabla de códigos de errores muy útil para conocer directamente el error y saber en qué se ha fallado. Seguidamente, se muestra la lista correspondiente a los comandos AT del módulo WiFi. Aunque la mayoría de comandos son diferentes entre los módulos, si hay algunos que comparten, como el de testeo o reseteo.

1. Test command:

Command	Respond	Parameter
AT	OK	-

2. Reset

Command	Respond	Parameter
AT+RESET	OK	-

3. Get firmware version

Command	Respond	Parameter
AT+VERSION?	+VERSION:<Param> OK	Param : firmware version

4. Restore Defaults

Command	Respond	Parameter
AT+ORGL	OK	-

Default state:

Slave mode, pin code :1234, device name: H-C-2010-06-01 ,Baud 38400bits/s.

5. Get module address

Command	Respond	Parameter
AT+ADDR?	+ADDR:<Param> OK	Param: address of Bluetooth module

6. Set/Check module name:

Command	Respond	Parameter
AT+NAME=<Param>	OK	Param: Bluetooth module name (Default :HC-05)
AT+NAME?	+NAME:<Param> OK (/FAIL)	

7. Get the Bluetooth device name:

Command	Respond	Parameter
AT+RNAME?<Param1>	1. +NAME:<Param2> OK 2. FAIL	Param1,Param 2 : the address of Bluetooth device

8. Set/Check module mode:

Command	Respond	Parameter
AT+ROLE=<Param>	OK	Param: 0- Slave 1- Master 2- Slave-Loop
AT+ROLE?	+ROLE:<Param> OK	

9. Set/Check device class

Command	Respond	Parameter
AT+CLASS=<Param>	OK	Param: Device Class
AT+ CLASS?	1. +CLASS:<Param> OK 2. FAIL	

10. Set/Check GIAC (General Inquire Access Code)

Command	Respond	Parameter
AT+IAC=<Param>	1.OK 2. FAIL	Param: GIAC (Default : 9e8b33)
AT+IAC	+IAC:<Param> OK	

11. Set/Check -- Query access patterns

Command	Respond	Parameter
AT+INQM=<Param>,<Param2>,<Param3>	1.OK 2. FAIL	Param: 0 - inquiry_mode_standard 1 - inquiry_mode_rssi Param2: Max num of Bluetooth devices to respond Param3: Timeout (1-48 : 1.28s to 61.44s).
AT+ INQM?	+INQM : <Param>,<Param2>,<Param3> OK	

12. Set/Check PIN code:

Command	Respond	Parameter
AT+PSWD=<Param>	OK	Param: PIN code (Default 1234)
AT+ PSWD?	+ PSWD :<Param> OK	

13. Set/Check serial parameter:

Command	Respond	Parameter
AT+UART=<Param>,<Param2>,<Param3>	OK	Param1: Baud Param2: Stop bit Param3: Parity
AT+ UART?	+UART=<Param>,<Param2>,<Param3> OK	

14. Set/Check connect mode:

Command	Respond	Parameter
AT+CMODE=<Param>	OK	Param: 0 - connect fixed address 1 - connect any address 2 - slave-Loop
AT+ CMODE?	+ CMODE:<Param> OK	

15. Set/Check fixed address:

Command	Respond	Parameter
AT+BIND=<Param>	OK	Param: Fixed address (Default 00:00:00:00:00:00)
AT+ BIND?	+ BIND:<Param> OK	

16. Set/Check LED I/O

Command	Respond	Parameter
AT+POLAR=<Param1,<Param2>	OK	Param1: 0- PIO8 low drive LED 1- PIO8 high drive LED Param2: 0- PIO9 low drive LED 1- PIO9 high drive LED
AT+ POLAR?	+ POLAR=<Param1>,<Param2> OK	

17. Set PIO output

Command	Respond	Parameter
AT+PIO=<Param1>,<Param2>	OK	Param1: PIO number Param2: PIO level 0- low 1- high

18. Set/Check – scan parameter

Command	Respond	Parameter
AT+IPSCAN=<Param1>,<Param2>,<Param3>,<Param4>	OK	Param1: Query time interval
AT+IPSCAN?	+IPSCAN:<Param1>,<Param2>,<Param3>,<Param4> OK	Param2 :Query duration Param3 :Paging interval Param4 :Call duration

19. Delete Authenticated Device

Command	Respond	Parameter
AT+PMSAD=<Param>	OK	Param: Authenticated Device Address

20. Delete All Authenticated Device

Command	Respond	Parameter
AT+ RMAAD	OK	-

21. Search Authenticated Device

Command	Respond	Parameter
AT+FSAD=<Param>	1. OK 2. FAIL	Param: Device address

22. Get Authenticated Device Count

Command	Respond	Parameter
AT+ADCN?	+ADCN :<Param> OK	Param: Device Count

23. Most Recently Used Authenticated Device

Command	Respond	Parameter
AT+MRAD?	+ MRAD :<Param> OK	Param: Recently Authenticated Device Address

24. Get the module working state

Command	Respond	Parameter
AT+ STATE?	+ STATE :<Param> OK	Param: "INITIALIZED" "READY" "PAIRABLE" "PAIRED" "INQUIRING" "CONNECTING" "CONNECTED" "DISCONNECTED" "UNKNOWN"

25. Initialize the SPP profile lib

Command	Respond	Parameter
AT+INIT	1. OK 2. FAIL	-

26. Inquiry Bluetooth Device

Command	Respond	Parameter
AT+INQ	+INQ: <Param1> , <Param2> , <Param3> OK	Param1 :Address Param2 :Device Class Param3 : RSSI Signal strength

27. Cancel Inquiring Bluetooth Device

Command	Respond	Parameter
AT+ INQC	OK	-

28. Equipment Matching

Command	Respond	Parameter
AT+PAIR=<Param1>,<Param2>	1. OK 2. FAIL	Param1 :Device Address Param2 :Time out

29. Connect Device

Command	Respond	Parameter
AT+LINK=<Param>	1. OK 2. FAIL	Param :Device Address

30. Disconnect

Command	Respond	Parameter
AT+DISC	DISC:SUCCESS DISC:LINK_LOSS DISC:NO_SLC DISC:TIMEOUT DISC:ERROR OK	-

AT COMMAND ERROR CODE – ERROR(ERROR CODE)

error_code(Hexadecimal)	Note
0	AT command error
1	Default result
2	PSKEY write error
3	Too long length of device name (more than 32 bytes).
4	No device name
5	Bluetooth address: NAP is too long.
6	Bluetooth address: UAP is too long.
7	Bluetooth address: LAP is too long.
8	No PIO number's mask
9	No PIO number
A	No Bluetooth devices.
B	Too length of devices
C	No inquire access code
D	Too long length of inquire access code
E	Invalid inquire access code
F	The length of passkey is 0.
10	Too long length of passkey (more than 16 bytes)
11	Invalid module role
12	Invalid baud rate
13	Invalid stop bit
14	Invalid parity bit
15	Authentication device is not at the pair list.
16	SPP lib hasn't been initialized.
17	SPP lib has been repeated initialization.
18	Invalid inquire mode
19	Too long inquire time
1A	No Bluetooth address
1B	Invalid safe mode
1C	Invalid encryption mode

ESP8266 AT Command Set

Function	AT Command	Response
Working	AT	OK
Restart	AT+RST	OK [System Ready, Vendor:www.ai-thinker.com]
Firmware version	AT+GMR	AT+GMR 0018000902 OK
List Access Points	AT+CWLAP	AT+CWLAP +CWLAP:(4,"RochefortSurLac",-38,"70:62:b8:6f:6d:58",1) +CWLAP:(4,"LiliPad2.4",-83,"f8:7b:8c:1e:7c:6d",1) OK
Join Access Point	AT+CWJAP? AT+CWJAP="SSID","Password"	Query AT+CWJAP? +CWJAP:"RochefortSurLac" OK
Quit Access Point	AT+CWQAP=? AT+CWQAP	Query OK
Get IP Address	AT+CIFSR	AT+CIFSR 192.168.0.105 OK
Set Parameters of Access Point	AT+ CWSAP? AT+ CWSAP= <ssid>,<pwd>,<chl>, <ecn>	Query ssid, pwd chl = channel, ecn = encryption
WiFi Mode	AT+CWMODE? AT+CWMODE=1 AT+CWMODE=2 AT+CWMODE=3	Query STA AP BOTH
Set up TCP or UDP connection	AT+CIPSTART=? (CIPMUX=0) AT+CIPSTART = <type>,<addr>,<port> (CIPMUX=1) AT+CIPSTART= <id><type>,<addr>, <port>	Query id = 0-4, type = TCP/UDP, addr = IP address, port= port
TCP/UDP Connections	AT+ CIPMUX? AT+ CIPMUX=0 AT+ CIPMUX=1	Query Single Multiple
Check join devices' IP	AT+CWLIF	
TCP/IP Connection Status	AT+CIPSTATUS	AT+CIPSTATUS? no this fun
Send TCP/IP data	(CIPMUX=0) AT+CIPSEND=<length>; (CIPMUX=1) AT+CIPSEND= <id>,<length>	
Close TCP / UDP connection	AT+CIPCLOSE=<id> or AT+CIPCLOSE	
Set as server	AT+ CIPSERVER= <mode>[,<port>]	mode 0 to close server mode; mode 1 to open; port = port
Set the server timeout	AT+CIPSTO? AT+CIPSTO=<time>	Query <time>0~28800 in seconds
Baud Rate*	AT+CIODBAUD? Supported: 9600, 19200, 38400, 74880, 115200, 230400, 460800, 921600	Query AT+CIODBAUD? +CIODBAUD:9600 OK
Check IP address	AT+CIFSR	AT+CIFSR 192.168.0.106 OK
Firmware Upgrade (from Cloud)	AT+CIUPDATE	1. +CIPUPDATE:1 found server 2. +CIPUPDATE:2 connect server 3. +CIPUPDATE:3 got edition 4. +CIPUPDATE:4 start update
Received data	+IPD	(CIPMUX=0): + IPD, <len>: (CIPMUX=1): + IPD, <id>, <len>: <data>
Watchdog Enable*	AT+CSYSWDTENABLE	Watchdog, auto restart when program errors occur: enable
Watchdog Disable*	AT+CSYSWDTDISABLE	Watchdog, auto restart when program errors occur: disable

* New in V0.9.2.2 (from <http://www.electrodragon.com/w/Wi07c>)

B

Presupuesto

1) Ejecución Material	
▪ Compra de ordenador personal (Software incluido)	1000 €
▪ Material de oficina	150 €
▪ Compra de componentes	150 €
▪ Total de ejecución material	1300 €
2) Gastos generales	
▪ 16 % sobre Ejecución Material	200 €
3) Beneficio Industrial	
▪ 6 % sobre Ejecución Material	80 €
4) Honorarios Proyecto	
▪ 1200 horas a 15 €/ hora	18000 €
5) Material fungible	
▪ Gastos de impresión	100 €
▪ Encuadernación	200 €
6) Subtotal del presupuesto	
▪ Subtotal Presupuesto	19880 €
7) I.V.A. aplicable	
▪ 21 % Subtotal Presupuesto	4174,8 €

8) Total presupuesto

■ Total Presupuesto	24054,8 €
---------------------	-----------

Madrid, Julio 2016

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Álvaro Foguet Carrasco

Ingeniero de Telecomunicación



Pliego de condiciones

Pliego de condiciones

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un *estudio de sistemas de comunicación para aplicación en robótica cooperativa*. 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
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 Contrataz 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.