



Sistema de posicionamiento móvil para interiores vía WIFI

Nombre Estudiante

Jesús Piedra Vega

Ingeniería Técnica de Informática de sistemas

Sistemas Empotrados

Nombre Consultor/a

Jordi Bécares Ferrés

Nombre Profesor/a responsable de la asignatura

Pere Tuset Peiró

Junio de 2016

A mis hijos Laura y Alejandro, y en especial a mi mujer Esmeralda por su paciencia y comprensión durante toda la carrera y por todo el tiempo que les he quitado sin disfrutar de su compañía.

Sin ti no lo hubiera logrado, gracias.

Copyright © 2016 Jesús Piedra Vega.

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.3 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.

A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".

Agradecimientos

Me gustaría agradecer al consultor de este proyecto Jordi Bécares Ferrés y al profesor de la asignatura Pere Tuset Peiró por sus consejos y su paciencia, su ayuda durante el desarrollo de este proyecto y sobre todo la comprensión y apoyo durante la realización del mismo.

También, agradecer a toda la comunidad educativa UOC, profesores, compañeros y tutores que han estado conmigo recompensando mis esfuerzos con ánimo y ayuda durante toda la carrera. La soledad del aprendizaje a distancia la hace más llevadera.

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	<i>Sistema de posicionamiento móvil para interiores vía Wifi.</i>
Nombre del autor:	<i>Jesús Piedra Vega</i>
Nombre del consultor:	<i>Jordi Bécares Ferrés</i>
Nombre del PRA:	<i>Pere Tuset Peiró y Xavier Vilajosana Guillen</i>
Fecha de entrega (mm/aaaa):	06/2016
Titulación:	<i>Ingeniería Técnica de Informática de Sistemas</i>
Área del Trabajo Final:	<i>Sistemas empotrados</i>
Idioma del trabajo:	<i>Español Castellano</i>
Palabras clave	<i>Sistemas empotrados, microcontroladores, localización en interiores.</i>

Resumen del Trabajo: (máximo 250 palabras)

Esta memoria documenta la realización, desarrollo y resultados del trabajo final de la carrera de Ingeniería Técnica de Informática de Sistemas en la Universidad Abierta de Cataluña en el área de Sistemas empotrados.

En el presente trabajo se ha diseñado y llevado a cabo el proyecto consistente en desarrollar un proceso teórico de posicionamiento basado en la localización física de un objeto móvil en interiores a través de un sistema de red de nodos satélites, de tal forma, que el objeto móvil que se encuentra cerca sea capaz de conectarse a la red por conexión WiFi y escanear los *nodos satélites* que se encuentran a su alrededor, ser capaz de detectar la potencia RSSI de señal recibida de cada uno de ellos y así poder calcular cuál es su ubicación, para seguidamente enviarla al sistema de control.

Abstract: (in English, 250 words or less)

This report documents the performance, development and results of the final work of the career of Engineering in Computer Systems at the Open University of Catalonia in the area of embedded systems.

In the present work is designed and carried out the project consisting develop a theoretical positioning process based on the physical location of a movable object inside through a system of satellite network nodes, so that the object Mobile which is close to be able to connect to the network by Wi-Fi and scan satellite nodes located around, being able to detect the RSSI signal strength received from each of them so we can calculate what your location to then send it to the control system.

Índice

Agradecimientos.....	iii
1. Introducción.....	1
1.1. Contexto y justificación del trabajo	1
1.2. Descripción del trabajo	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Enfoque y método seguido	3
1.5. Planificación del trabajo	4
1.6. Recursos empleados	5
1.7. Productos obtenidos	8
1.8. Descripción de los otros capítulos	8
2. Antecedentes	10
2.1. Estado del arte.....	10
2.2. Métodos y técnicas de localización.....	14
2.3. Tecnologías para localización en interiores	20
2.4. Estudio de mercado	24
3. Diseño sistema posicionamiento.....	26
3.1. Sistema de localización basado en WIFI	26
3.2. Diseño aplicación.....	27
3.3. Método de estimación de localización basado en RSSI	28
3.4. Diagrama de bloques.....	34
4. Pruebas de campo	37
4.1. Módulo de comunicaciones	37
4.2. Modulo conversor USB- TTL CP2102.....	38

4.3. Preparación del entorno.....	39
4.4. Caso particular de triangulación	41
4.5. Experimentación	46
5. Viabilidad técnica	51
6. Valoración económica.....	52
7. Conclusiones.....	53
7.1. Conclusiones.	53
7.2. Autoevaluación	54
7.3. Líneas de trabajo futuro	54
8. Glosario.....	55
9. Bibliografía y recursos Web	58
9.1. Bibliografía.....	58
9.2. Recursos Web	61
Apéndice A.....	62

Lista de figuras

FIGURA 1: DETALLE DE LA PLACA LPC1769.....	5
FIGURA 2: DETALLE DEL CONVERTOR CP2102	6
FIGURA 3: DETALLE DEL MÓDULO WiFLY RN-XV 802.11B/G.....	6
FIGURA 4: DETALLE DEL ADAPTADOR XBEE A DIP	7
FIGURA 5: ESTADO DEL DESARROLLO Y GRADO DE PRECISIÓN DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE LOCALIZACIÓN EN INTERIORES [4].....	13
FIGURA 6: INTERSECCIÓN DE SEÑALES BASADAS EN MEDIDAS DE RANGOS	15
FIGURA 7: CÁLCULO DE ÁNGULOS EN LA INTERSECCIÓN DE SEÑALES.....	16
FIGURA 8: INTERSECCIÓN DE SEÑALES BASADOS EN MEDIDA DE POTENCIA (RSS)...	16
FIGURA 9: OBTENCIÓN DE LA POSICIÓN DEL <i>NODO CLIENTE</i>	19
FIGURA 10: ESTRUCTURA DE LA SALA LOCALIZADA POR COORDENADAS	27
FIGURA 11: ESTIMACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN POR MEDIO DE TRIANGULACIÓN.	29
FIGURA 12: DIAGRAMA DE RADIACIÓN EN 3D Y SU SECCIÓN.	29
FIGURA 13: RESOLUCIÓN GRÁFICA DEL SISTEMA DE ECUACIONES.	30
FIGURA 14: PROPIEDADES DEL EJE RADICAL.	32
FIGURA 15: RESOLUCIÓN GRÁFICA DEL SISTEMA DE ECUACIONES.	34
FIGURA 16: DIAGRAMA CONCEPTUAL DEL PROYECTO.....	35
FIGURA 17: APROXIMACIÓN A LA METODOLOGÍA FINAL.....	35
FIGURA 18: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA EMBEBIDO PARA PRUEBAS.....	36
FIGURA 19: MODELO GENERAL DEL SISTEMA DE LOCALIZACIÓN EN INTERIORES.....	36
FIGURA 20: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL WiFLY RN-XV	37
FIGURA 21 CONEXIONADO LPC + WiFLY.....	38
FIGURA 22. CONEXIONADO LPC+ CP 2102.	38
FIGURA 23. SISTEMA EMBEBIDO PARA AYUDA DE LA PRÁCTICA.....	38
FIGURA 24: VERIFICACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA.	39

FIGURA 25. SALA CON LOS <i>NODOS SATÉLITES</i> (NS_x) Y EL <i>NODO CLIENTE S</i>	39
FIGURA 26. ESCANEADO DE LA RED POR EL <i>NODO CLIENTE</i>	40
FIGURA 27: <i>CLIENTE</i> EN LA INTERSECCIÓN DE LAS CIRCUNFERENCIAS.	42
FIGURA 28: PUNTO <i>S</i> INTERSECCIÓN DE LAS SECANTES DE LAS CIRCUNFERENCIAS. .	42
FIGURA 29: DISTANCIA MEDIA ENTRE CIRCUNFERENCIAS SECANTES.....	43
FIGURA 30: SITUACIÓN IDEAL.....	44
FIGURA 31: DESFASE EN EL CÁLCULO DE <i>S</i>	45
FIGURA 32: CREACIÓN DE LA REJILLA 10 X 10.....	47
FIGURA 32: RECOGIDA DE DATOS PARA MUESTREO.	47
FIGURA 34: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS RESULTADOS.	50

Lista de tablas

TABLA 1: INTERSECCIÓN DE SEÑALES BASADOS EN INDICADOR DE POTENCIA (RSSI).18	
TABLA 2: TABLA FACTOR DE CONVERSIÓN DE LOS <i>NODOS SATÉLITES</i> OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE.	46
TABLA 3: MEDIA ARITMÉTICA DE LAS MEDIDAS DETECTADAS EN CADA UNO DE LOS PUNTOS.	48
TABLA 4: ERRORES COMETIDOS EN LOS PUNTOS DE REFERENCIA.	48
TABLA 5: MUESTRAS DE LAS DOS POSICIONES ALEATORIAS CON SUS MEDIAS.....	49
TABLA 6: ERRORES COMETIDOS EN EL CÁLCULO DE LAS DOS POSICIONES.....	49
TABLA 7: TABLA APROXIMATIVA DEL COSTE ECONÓMICO DEL TFC	52

1. Introducción

El aumento de una eventual proliferación de sistemas de sensores inteligentes junto con el desarrollo de redes que recopilan enormes cantidades de información, apuntan a la contribución de forma favorable de la organización del trabajo, al buen funcionamiento de la industria, al control ganadero y agrícola y a la predicción de desastres naturales entre otros. Estas redes de sensores se basan en la distribución de pequeñas plataformas de hardware que recogen datos, que en la mayoría de los casos son capaces de procesarlos y transmitirlos. Para facilitar todas estas herramientas, se han ido desarrollando diferentes sistemas operativos que se pueden instalar en hardware con pocos recursos y que mantienen un bajo consumo energético. En uno de estos puntos se encuentran en pleno apogeo las plataformas de desarrollo de entorno móviles y dentro de ellas, en especial por lo que se refiere a este proyecto, el tratamiento de *clientes móviles* en un entorno de interiores, su localización y control.

El desarrollo teórico de la implementación de sistemas de localización en interiores y de un estudio empírico sobre un ejemplo de una plataforma embebida LPC1769 de NXP sobre la que monta un emisor-receptor WiFi, el WiFly RN-171 de Microchip, será el medio para verificar este estudio.

1.1. Contexto y justificación del trabajo

En estos últimos años la tecnología ha evolucionado a gran velocidad, dotándonos de dispositivos que proporcionan una mejor calidad de vida a las personas. La finalidad de estos dispositivos es tener una visión específica de todo lo que sucede a nuestro alrededor.

El constante uso de las redes móviles y esta nueva necesidad creada de saber en todo momento dónde se encuentran las personas ya sean familiares (hijos, padres, etc.) o personal laboral y de objetos (ordenadores o equipamientos importantes) así como la necesidad de un sistema de guiado de personas mayores o con algún grado de dificultad y la puesta en marcha de la teleasistencia, pone en funcionamiento los mecanismos embrionarios para la creación de plataformas de desarrollo de aplicaciones que pueden hacer uso de sistemas de localización por radiofrecuencia (RF). El uso de estos sistemas permite el que no tengan que estar visibles los

elementos a controlar para poder comunicarse con ellos o saber en todo momento dónde se encuentran, lo cual permite que se pueda trabajar en entornos movibles y de obstáculos.

Todo esto ha permitido el estudio del desarrollo del presente proyecto: La localización de elementos móviles en interiores por medio de señales de radiofrecuencia. Estas señales de radiofrecuencia abarca lo que se ha denominado tecnologías inalámbricas de corto alcance como son Bluetooth, WiFi, RFID, Zigbee,... y que se pueden aplicar en diferentes entornos y a elementos muy diferentes. Desde objetos, unos movidos por sí solos y otros llevados y transportados a diferentes plantas dentro de un mismo edificio, hasta gestionar las plazas de un aparcamiento, pasando por la gestión de un sistema para el control de personas mayores o con cierto grado de discapacidad dentro de su propio domicilio o residencia, para ciertos controles de asistencia social y sobre todo para la seguridad y tranquilidad de sus familiares.

El estudio se va a centrar en una sala de espacio más o menos amplio y de techo alto y despejado, pero como se ha comentado antes se podría ampliar en un futuro al control de diversas salas o habitaciones dentro de una casa o planta de un edificio.

1.2. Descripción del trabajo

Como se ha mencionado en el resumen, este trabajo va a desarrollar un estudio teórico de las diversas tecnologías de RF y el uso de una de ellas, en concreto el sistema WiFi, y se ha utilizado un sistema de conexión a la red inalámbrica por medio del módulo WiFly RN-171 para llevar a cabo una serie de pruebas de campo para verificar los resultados teóricos desarrollados en este proyecto. Estas tareas o funciones han sido necesarias hacerlas para poder montar el sistema de desarrollo, como son: la conexión a la red con acceso a internet, acceso a los dispositivos AP (*nodos satélites*) de la misma red a través de módulo WiFly, para conocer la potencia de cada uno de ellos a la que le llega al nodo cliente para hacer el cálculo de localización dentro de la sala por medio de triangulación. Este módulo se podría montar en un sistema embebido como puede ser la placa LPC1769 de NXP, a la que se ha tenido acceso, pero en el mercado existen diversas placas como el entorno de desarrollo Arduino donde se puede montar el mismo módulo WiFly.

El sistema de posicionamiento basado en redes inalámbricas WiFi o también llamadas redes Wireless se basa en las mediciones que los *nodos satélites* de acceso a la red hacen de la potencia y de la relación SNR de las emisiones transmitidas por el *nodo cliente* inalámbricos que se conecta a la red. Una red Wireless utiliza frecuencias libres y por lo tanto no necesita licencia.

1.3. Objetivos

Objetivo general

El objetivo general del proyecto será el desarrollo de una red inalámbrica de *nodos satélites* para que el *nodo cliente* sea capaz de realizar un posicionamiento relativo de los nodos que la forman mediante la medida de la potencia de la señal RSSI que recibe de ellos y su posición determinada en unos ejes de coordenadas prefijados de antemano. Para lograrlo se utilizará una técnica de triangulación semejante a la utilizada por los sistemas de posicionamiento global, la cual será adaptada a los dispositivos RFID (IDentificación por Radio Frecuencia) y aplicada en el sistema de posicionamiento local a desarrollar.

Objetivos principales

- Estudio de la tecnología de los sistemas de posicionamiento basados en redes RF.
- Búsqueda de un sistema de localización basado en RSS.
- Técnicas a aplicar para el cálculo de la posición del *nodo cliente* en este sistema.
- Ejemplo que corrobore la técnica de triangulación usada.

1.4. Enfoque y método seguido

El proyecto se ha dividido en fases, cada una de ellas con unas tareas determinadas. En cada tarea se ha seguido el mismo procedimiento: primero la documentación y en ella, incluida también la búsqueda en internet; después, el desglose de cada tarea en partes más específicas y de éstas, las que fueran más complicadas o dieran problemas se simplificarán a otras más sencillas; y para finalizar, la implementación de cada tarea.

Una vez estudiadas las diferentes tecnologías de posicionamiento basadas en redes RF, se buscará el sistema de localización más adecuado al proyecto desarrollado. Este proyecto se fundamenta en la medida de la potencia proporcionada por los *nodos satelites* y que el módulo WiFly es capaz de medir mediante su propia API, para, apoyándose en la tecnología WiFi se hagan las pruebas de campo correspondientes y así poder presentar los resultados y verificar la exactitud del método.

Para estas pruebas se ha utilizado, como se ha comentado antes, la placa LPC1769 junto con el módulo WiFly y el conversor USB-TTL UART. Todo ello para poder tener en salida de consola la información correspondiente a las lecturas de la red, la identificación de los *nodos clientes* y la potencia a la que éstos emiten para poder hacer los cálculos correspondientes y saber en qué

posición se encuentra el *nodo cliente*, que en este caso sería el propio sistema embebido montado, pero como se ha dicho anteriormente, podría ser otro sistema empotrado o embebido.

1.5. Planificación del trabajo

En el estudio de riesgos, se está valorando la posibilidad de retraso en las entregas por el escaso margen de tiempo de dedicación. Hay pequeñas dificultades de asociación en la composición general del proyecto y la dificultad de establecer un horario constante y habitual hace que se retrase los procedimientos y un seguimiento continuo del proyecto.

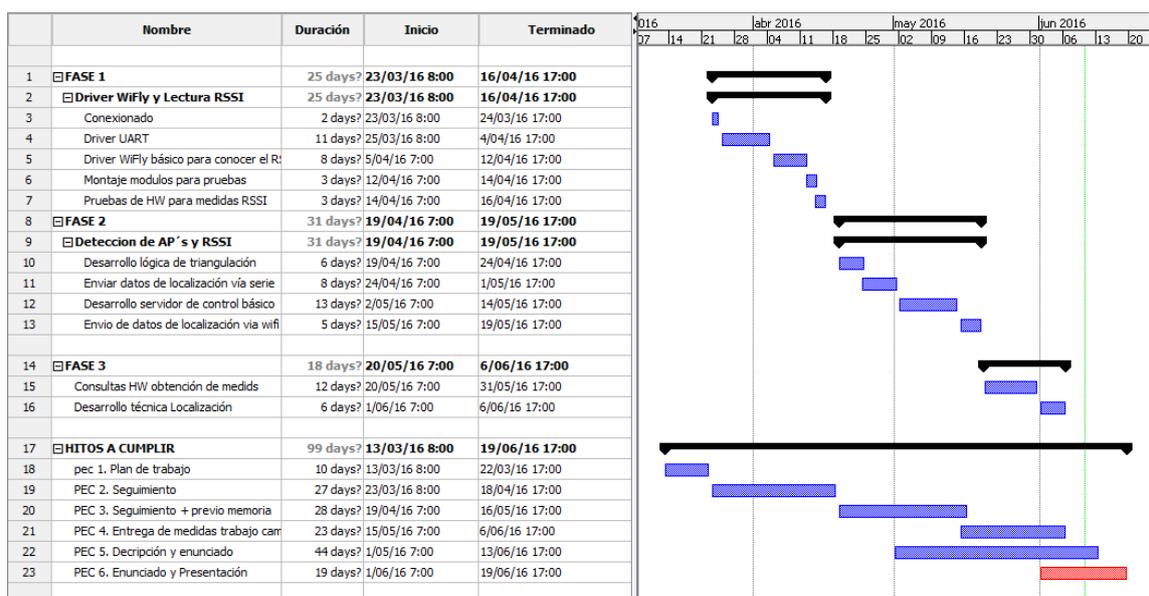
Por otro lado, la composición de toda la estructura de la red en una zona diáfana hoy por hoy es complicada. Se instalan los equipos, se hacen algunas pruebas y se tiene que desmontar hasta la próxima vez que se vuelvan a usar. Esto lleva consigo que en un momento dado no funcione todo a la primera y se corre el riesgo de retrasar también los cronogramas previstos.

Descomposición en actividades

El trabajo se descompone en 3 fases, de las cuales una de ellas comprende los hitos a cumplir que son las entregas. Las cuales se alternan y combinan en algunas tareas para ajustarse a las fechas de entrega tanto del periodo final como de las que se han organizado para el seguimiento del proyecto.

Cronograma o diagrama de Gantt

Completado el proceso el cronograma queda así:



1.6. Recursos empleados

A continuación se detallaran los recursos empleados en la realización de este proyecto, diferenciando entre los recursos Hardware y Software.

1.6.1. Recursos Hardware

- 4 routers que harán de *nodo satélite*.

Se han conseguido 2 Huawei HG532c y 2 Sagem Fast 2604, cuyas características técnicas se muestran a continuación:

Router	Modelo	Características WLAN
	Huawei HG532c	Estandar IEEE 802.11b/g/n 2.4GHz-2.484GHz Hasta 300 Mbps Encriptación WEP, WPA (TKIP), WPA2 (AES),
	Sagem Fast 2604	Estandar IEEE 802.11b/g 2.4GHz-2.484GHz Encriptación WEP, WPA (TKIP), WPA2 (AES), Hasta 54 Mbps

- Placa microcontroladora LPC1769 de NXP

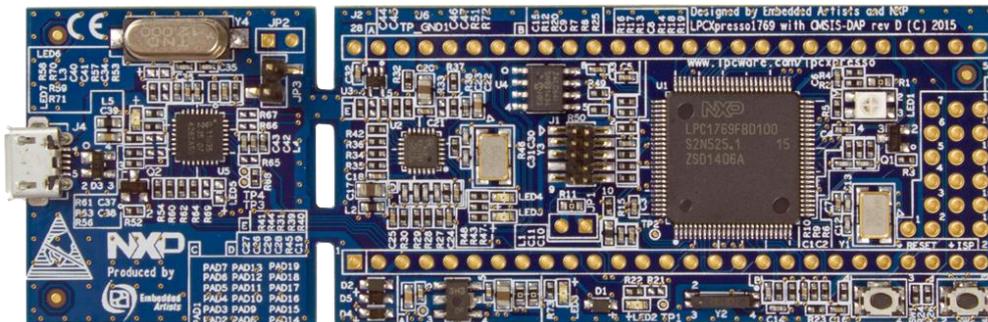


Figura 1: Detalle de la placa LPC1769

Incorpora un microcontrolador ARM Córtex M3 y un depurador CMSIS-DAP para la programación del mismo a través de USB.

La placa LPC1769 tiene como principales características:

- Puede trabajar en frecuencias de hasta 120 MHz,
- Opera a una tensión entre -0.5 y 4.5V,
- Tiene 64 kB de memoria SRAM y 512 kB de memoria Flash,

- 4 puertos UART,
 - Puerto Ethernet,
 - 3 interfaces de bus I2C,
 - 1 interfaz SPI,
 - 2 controladores SSP,
 - 2 canales CAN,
 - Motor de control PWM,
 - USB 2.0 Device/Host/OTG,
- El conversor USB 2.0 a TTL CP2102, para comunicar los puertos UART de la placa al PC y poder recibir los datos de depuración.



Figura 2: Detalle del conversor CP2102

Es una pasarela de comunicación con interface plug and play, que nos permite el envío bidireccional de datos. Dispone de 6 pines (3,3V, RST, 5V, TXD, RXD, GND).

- Módulo WiFLy RN-XV con antena para conexión inalámbrica.

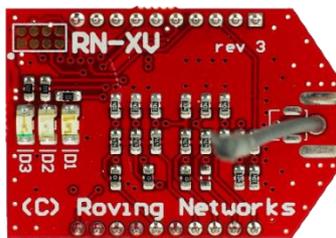


Figura 3: Detalle del módulo WiFly RN-XV 802.11b/g

Entre sus características destacan:

- Bajo consumo: 40mA en RX, 180mA en TX y 4 μ A en reposo (sleep)
- Funciona a 3,3 Vcc de tensión
- Señal de transmisión configurable entre 0 dBm y +12dBm
- Incluye 14 pines GPIO (4 se comparten con el puerto UART)
- 8 entradas analógicas de 14 bits de resolución
- Aplicaciones integradas como ICMP, cliente HTTP, servidor y cliente TCP, servidor y cliente DHCP, cliente FTP

- Soporta configuración WI-FI protected setup (WPS)
- Adaptador XBEE a DIP para soporte del módulo WiFLy.

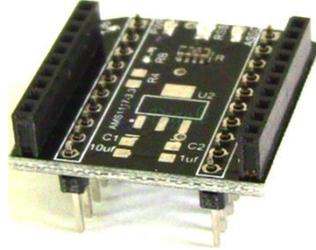


Figura 4: Detalle del adaptador XBEE a DIP

- Máquina virtual con sistema operativo Linux Mint con soporte FreeRTOS e IDE Eclipse englobado en un entorno de programación LPCXpresso desarrollado por el fabricante, con licencia limitada. Todo ello soportado en un ordenador PC con sistema Windows 7 con 12 GB de RAM y licencia de estudiante.

1.6.2. Recursos de Software

- FreeRTOS que será el sistema y base del entorno de trabajo. Es un sistema operativo y librerías en tiempo real para el control de μ Controladores. Compatible con diferentes arquitecturas.



- LPCXpresso v8.0.0_526. Es un entorno de desarrollo basado en Eclipse para el desarrollo de aplicaciones en lenguaje C. Nos permite la compilación y grabación en flash de la aplicación en el μ Controlador. La versión utilizada es de evaluación y nos limita a 128kb.



- CMSIS v2p00. Librería de funciones para μ Controladores Córtex-M para sistemas operativos RTOS.



- Ejemplos del fabricante para familiarizarse con los elementos físicos a programar.

- Librerías de uso creative commons



- Sistemas operativos Linux Mint y Windows 7 para el entorno de trabajo sobre el que se soporta todo el software.



En este entorno de desarrollo no se puede dejar a un lado los drivers de los fabricantes de los diversos componentes, sin los cuales sumarían unas dificultades añadidas que probablemente darían al traste parte de la viabilidad del proyecto teniendo en cuenta el tiempo de que se dispone.

El entorno de desarrollo LPCXpresso es suministrado por el fabricante. Es un IDE basado en Eclipse que se obtiene desde la página web del fabricante mediante registro y obtención posterior de la licencia. Esta licencia permite la depuración de código que no llegue a los 128 KB.

1.7. Productos obtenidos

Como se verá más adelante se obtendrán, por un lado un recorrido por los aspectos básicos de los diferentes sistemas de posicionamiento basados en RF. Y por otro, un estudio de un sistema empotrado en forma de plataforma móvil formada por la placa μ Controladora LPC1769, el módulo WiFly RN-171 y el módulo CP2102 que manejados por el sistema operativo en tiempo real FreeRTOS cubrirán los objetivos marcados en este proyecto.

Además se obtendrá un desarrollo teórico del sistema de localización en entorno real y una variante de los métodos de posicionamiento en interiores para el desarrollo del entorno propuesto en este proyecto.

1.8. Descripción de los otros capítulos

Una vez explicadas las características generales del proyecto, pasaremos a comentar brevemente el contenido de los siguientes capítulos del trabajo a desarrollar en esta memoria.

El capítulo 2 es un paseo por la visión detallada del estado actual en que se encuentran las tecnologías en las que se fundamenta este proyecto, junto con algún producto o empresa que se pueden encontrar en el mercado de lo privado y de lo cooperativo.

En el capítulo 3 se hará una descripción teórico-funcional del diseño del sistema de posicionamiento elegido para desarrollar este proyecto y la justificación de la modificación elegida en el capítulo siguiente.

El capítulo 4 continuará con una descripción más técnica y detallada de las pruebas de campos realizados, así como del hardware de apoyo para la realización de las pruebas y verificación del sistema teórico, al que seguirán los capítulos siguientes exponiendo un estudio de viabilidad técnica y una valoración económica orientativa del coste del sistema.

Y por último, se expondrán las conclusiones extraídas del proyecto exponiendo propuestas de mejora y una pequeña autoevaluación de los objetivos propuestos en el capítulo primero.

2. Antecedentes

2.1. Estado del arte

En el mundo de la informática, el hardware ha evolucionado en capacidad y prestaciones según las capacidades tecnológicas del momento, pero siempre hay necesidades que no precisan de una gran potencia de cálculo ni grandes cantidades de memoria ni almacenamiento. Ésta es la parcela donde se ubican los sistemas empotrados. Son dispositivos que, habitualmente se agrupan formando parte de un sistema más grande como, por ejemplo, un coche, que puede llegar a tener una cantidad importante de estos dispositivos. También se pueden encontrar en electrodomésticos o, formando parte de lo que se llama redes de sensores. En este último caso podemos encontrar muchos ejemplos de dispositivos que forman las redes de las llamadas Smart Cities. Los microcontroladores funcionan individualmente a todos los niveles, incluso de alimentación eléctrica ya que a menudo se encuentran bajo el pavimento, tomando datos del entorno, pero se comunican con otros nodos para enviar estos datos a uno o más servidores centrales. Es en este caso resulta evidente que debe primar el bajo consumo de energía sobre las otras capacidades.

Una de estas tecnologías, a la que pertenece este proyecto, es el desarrollo de localización en interiores. Una tecnología en plena expansión a causa de las deficiencias de la geolocalización en lugares de sombras y en interiores dónde la pérdida o atenuación de señal de los satélites, hace que no se puedan utilizar las tecnologías propias de una localización al aire libre dónde en todo momento se están “viendo” el satélite y el receptor. Pero antes de entrar en detalles del sistema a desarrollar, se va a hacer una pequeña introducción en lo que se ha llamado sistemas de localización basados en radiofrecuencia de corto alcance en interiores (indoor), conociendo por encima el entorno de localización en general.

La posición de un objeto (o usuario) móvil, o no, en un entorno de exterior es sencilla. Si hay una visión directa con los satélites (campo o ciudad despejada de edificios), un sistema de

localización como los sistemas de navegación o GPS tienen una estimación muy aproximada de la posición del objeto o usuario con un error de unos pocos metros.

Otro sistema de localización, por medio de la red de telefonía móvil, no necesita estar en un espacio despejado pero tiene el problema de las torretas o células, pues éstas pueden tener un radio de unos 35 Km. Con objeto de aumentar la precisión se utiliza una triangulación entre un receptor y 3 células o BTS, mediante diferencias de tiempos en la comunicación con lo cual se reduce el error de localización a unos 20 o 30 metros. Si a esto le añadimos la posibilidad de sincronizarse con conexión GPS, reducimos aún más el posible error de cálculo a unos cuantos metros, como si estuviéramos a cielo abierto.

Pero ¿qué sucede en zonas encañonadas o de sombra causada por la altura de los edificios? ¿Y en el interior de éstos? Por un lado, las señales de los satélites no pueden usarse en entornos de interiores porque no tienen la potencia suficiente para atravesar la mayoría de obstáculos para una visión directa entre usuario y satélite. Por otro lado, los sistemas de telefonía móvil tienen un problema similar con la recepción de la señal y el problema añadido anteriormente comentado de la precisión, un margen de error que no es suficiente, ni eficiente para la localización.

La alternativa es la utilización de infraestructuras inalámbricas como sustitutos de los satélites y la telefonía móvil para ofrecer una cobertura y precisión adecuada para los servicios de localización en entornos de interiores. Desde hace mucho tiempo es objeto de estudio e investigación por parte de diferentes empresas y universidades con el fin de encontrar una solución sencilla y fiable. Sin embargo, todavía no existe una solución única con un éxito similar a los sistemas utilizados en exteriores.

La razón principal es la económica, ya que la mayoría de los métodos necesitan tener una estructura fija (nodos, sensores, estaciones base, etc.) para dar soporte a todo el sistema y sin el cual no sería posible. Con el paso del tiempo, los costes han disminuido y han ido apareciendo otras técnicas bastante más asequibles.

Hay que tener en cuenta que la complejidad de la geolocalización aumenta cuando hablamos de localización en interiores, debido a los problemas que presentan las señales electromagnéticas (interferencias, atenuaciones, multipath¹, etc.). En los últimos años, debido al auge de las nuevas tecnologías, grandes fabricantes de electrónica de consumo han ido mostrando soluciones

¹ Multipath: fenómeno que se da cuando las señales de radio llegan a las antenas receptoras por dos o más caminos y en diferentes tiempos. https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_posicionamiento_global

orientadas, en gran medida, al uso de Bluetooth LE², como pueden ser los iBeacons de Apple [1] o la alternativa Open Source de Google, los Beacons Eddystone [2].

Actualmente las redes inalámbricas, se están orientando a dar servicio a todo tipo de entornos tanto empresariales como particulares o públicos, incluso se encuentran propuestas para dar cobertura a grandes superficies como ciudades. Se trata de una tecnología muy extendida y utilizada por lo que ha propiciado el desarrollo de este proyecto.

Estos sistemas de localización pueden clasificarse en dos tipos. Por un lado, los que utilizan etiquetas o tags para llevar a cabo su localización por medio de su propia identificación, y por otro los que no usan etiquetas y que se basan en la detección de presencia a través de *nodos satélites*, localizados en ubicaciones fijas y conocidas.

Tanto uno como otro, son sistemas de gran precisión basados en tecnologías inalámbricas de corto alcance como WiFi, Bluetooth, Rfid o USW.

Estos sistemas de localización en interiores también llamados sistemas de localización en tiempo real RTLS (Real Time Location System) y que entra en lo que se denomina Identificación por Radiofrecuencia (RFID) constaría de tres elementos fundamentales:

- El identificador o tag, en nuestro caso utilizaríamos la identificación única que nos proporciona la Mac del dispositivo (el *nodo cliente*),
- los *nodos satélites* situados en puntos de referencia fijos, y
- el software para el cálculo de la posición del *nodo cliente* (portador de tag) a través de la potencia de señal RSSI recibida por parte de los *nodos satélites*.

Independientemente de la infraestructura inalámbrica, estos sistemas de localización se pueden clasificar en función de la información de la señal que se intercambian entre el objeto o *nodo cliente* y los puntos de referencia o *nodos satélites*. Esta información, que se ampliará más adelante, es clasificada en: el tiempo de llegada (ToA, Time of Arrival), la diferencia entre tiempos de llegada (TDoA, Time Difference of Arrival), el ángulo de llegada (AoA, Angle of Arrival), o el nivel de potencia recibida de la señal del objeto o usuario a un punto de referencia (RSS, Received Signal Strength). [3]

² Bluetooth LE: Bluetooth Low Energy, especificación diseñada para funcionamiento con poca energía.
https://es.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_de_baja_energ%C3%ADa

También hay que decir que existen técnicas que combinan varias de éstas informaciones para aumentar y mejorar la precisión del sistema de localización.³

Esta infraestructura inalámbrica puede configurarse en tres estándares típicos:

- Redes “ad-hoc”. Son redes cerradas sin infraestructura donde un grupo de terminales próximos se comunican entre sí.
- Redes de acceso inalámbricas con infraestructura de red. Se trata de redes donde los terminales se comunican con un punto de acceso a través del cual pueden acceder a redes externas.
- Enlace entre varias WLAN o WAN-MAN. Se consigue interconectando LAN's o WLAN's distantes.

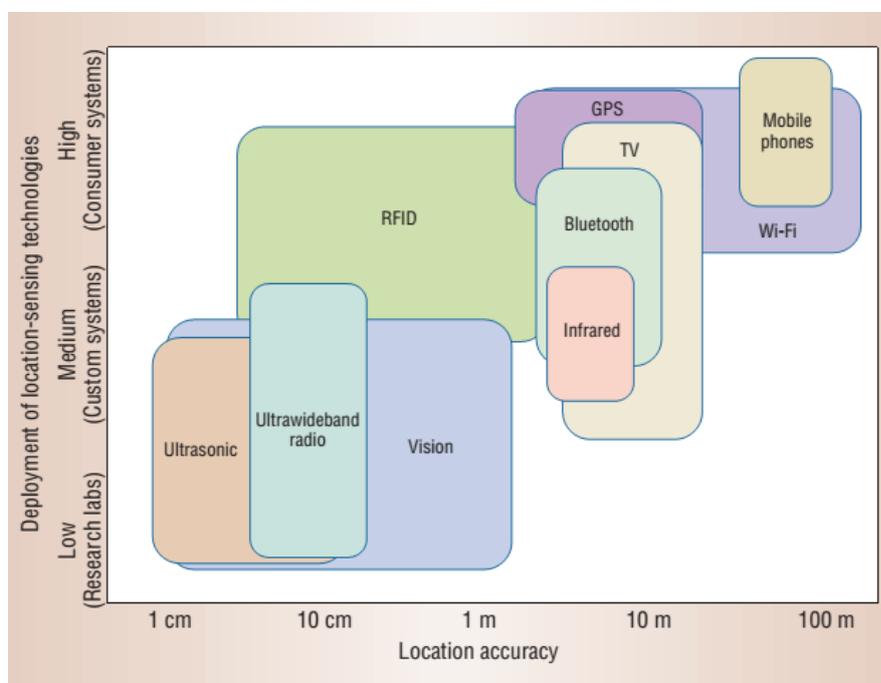


Figura 5: Estado del desarrollo y grado de precisión de diferentes tecnologías de localización en interiores [4]

En el caso de que la información a utilizar sea el nivel de potencia (este es nuestro caso), estos sistemas suelen estar basados en la diferencia de la potencia de señal recibida desde el *nodo cliente*, por al menos tres *nodos satélites*. La aplicación software debe saber los patrones de

³ Se pueden encontrar muchos estudios realizados en su mayoría por Ingenieros para sus tesis o para la publicación de artículos. En especial cabe destacar el sistema RADAR (4), desarrollado por el departamento de investigación de Microsoft y que supone el punto de partida para los posteriores estudios que han ido surgiendo.

señal y la ubicación de cada uno de los *nodos satélites*: si un *nodo cliente* recibe señal de un determinado *nodo* satélite con una potencia determinada, podrá conocer a qué distancia se encuentra el satélite de él en función de esa potencia, si anteriormente se ha realizado un estudio de cobertura personalizado de todos los lectores que componen el sistema de localización.

Recibiendo la información de tres o cuatro *nodos satélites*, la aplicación software es capaz de calcular la posición en un determinado mapa cargado previamente, y sobre el que se ha realizado el estudio de cobertura, conociendo también la ubicación de todos los *nodos satélites* que forman el sistema.

2.2. Métodos y técnicas de localización

Es difícil y complicado crear un modelo que se ajuste a la propagación en interiores debido a una serie de problemas que interfieren en la recepción de la señal como el multipath o los parámetros propios de la construcción del entorno como la distribución, los objetos en movimiento, los materiales, etc. A tenor de estos inconvenientes y circunstancias han surgido alternativas que tratan de atenuar estos errores de precisión como son los algoritmos de posicionamiento mediante análisis de escena o de proximidad. Otros, como la triangulación tradicional, han sufrido una transformación para su adaptación en entornos de interior.

En general, se entiende que un sistema de localización está formado de un lado, por una serie de dispositivos que emiten una señal al medio ya sean ultrasonidos, radio e incluso luz, y de otro, por dispositivos electrónicos que reciben esa señal tras su propagación a través de dicho medio. Una vez en posesión de esa información, se tiene que procesar para poder estimar la posición del usuario.

Existen diferentes técnicas para medir la posición basándonos en ciertas características de la señal transmitida:

2.2.1. Tiempo de llegada (ToA) [5]

Esta técnica se basa en la relación existente entre el tiempo de propagación de una señal y la distancia entre emisor y receptor. Con el fin de permitir la localización, las mediciones deben ser realizadas con respecto a las señales de al menos tres puntos de referencia. Para los sistemas basados en ToA, se mide el tiempo de propagación de ida y la distancia entre la unidad de medición y el transmisor de la señal [6].

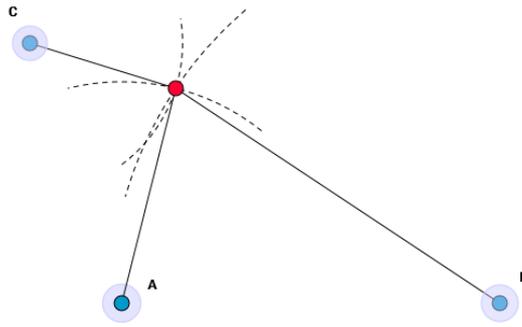


Figura 6: Intersección de señales basadas en medidas de rangos o distancias

La medición ToA tiene inherente una serie de dificultades, por un lado los transmisores y receptores en el sistema tienen que estar sincronizados previamente, y por otro debe llevar etiquetada con una marca de tiempo la señal de transmisión para que el receptor pueda calcular la distancia recorrida de la señal. Además, este método debe emplear un sistema de sincronización de reloj muy robusto y preciso para minimizar los errores.

2.2.2. Diferencia en Tiempo entre llegadas (TDoA) [5]

Basado en el método anterior, pero sin utilizar los tiempos absolutos, lo que facilita eliminar la costosa sincronización entre los relojes de transmisores y receptores. La técnica consiste en determinar la posición relativa del móvil calculando los diferentes tiempos de llegada de la señal en diferentes medidas. Se producen dos señales, una acústica y otra electromagnética. Como el tiempo de propagación es diferente para cada medio, la acústica viaja a la velocidad del sonido y la electromagnética lo hace a la velocidad de la luz, el receptor puede calcular la distancia mediante la diferencia de tiempo entre ambas señales.

Aunque se ha eliminado la sincronización con los receptores, se tiene que mantener la sincronización entre los emisores, necesaria para poder hacer los cálculos sin error en los tiempos de emisión de las señales, por lo que arrastra la misma desventaja del método anterior.

2.2.3. Ángulo de llegada (AoA) [7]

Determina la ubicación de un objeto a partir del ángulo de llegada de la señal. Su ventaja descansa en el bajo número de nodos satélites que se necesitan para el posicionamiento, dos para la localización en el plano y tres para una localización en tres dimensiones. Pero las desventajas gravan el método y lo hacen inoperativo para el posicionamiento. Para poder calcular el ángulo de llegada de la señal correctamente, emisor y receptor tienen que estar en línea de visión directa para evitar una angulación incorrecta de la señal de llegada (multipath), difícil de conseguir en posicionamiento en interiores.

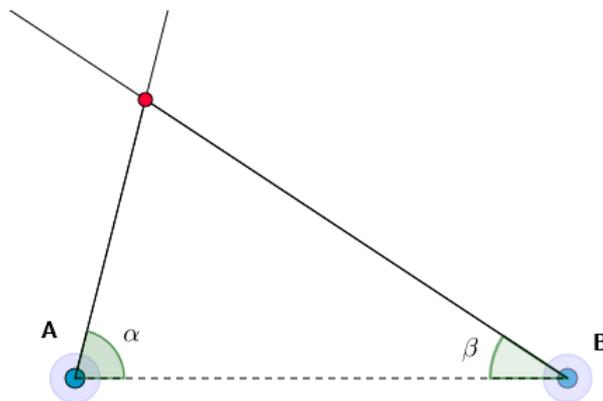


Figura 7: Cálculo de ángulos en la intersección de señales.

2.2.4. Fuerza de la señal recibida (RSS) [7]

El fundamento de este método está basado en la atenuación que sufre la señal a medida que se aleja del emisor. Calculando la atenuación sufrida, se puede hacer un cálculo de la distancia al emisor.

El principal problema es que la atenuación no es constante y puede variar dependiendo, además de la distancia, de factores externos como pueden ser las interferencias con otras señales o las reflexiones, difracciones o dispersiones en objetos o personas. La ventaja de esta técnica es que no es necesario la sincronización entre emisor y receptor para su cálculo, es de bajo coste y de fácil implementación.

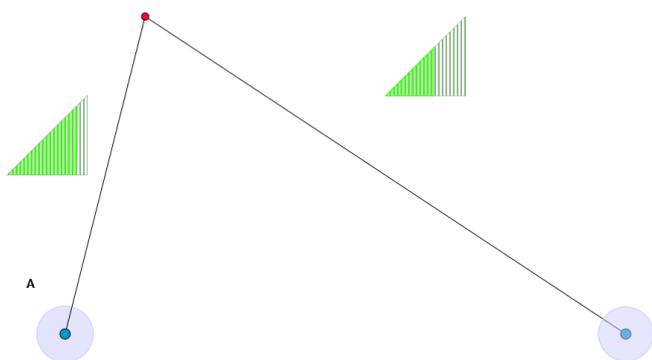


Figura 8: Intersección de señales basados en medida de potencia (RSS).

Aunque estos inconvenientes pueden insinuar que esta técnica no sea fiable para determinar una posición, será el método elegido para utilizar en el proyecto por ser la más sencilla de implementar y no requiere hardware adicional. Además no requiere ningún cálculo ya que es el propio hardware de los *nodos satélites* el que nos va a proporcionar el valor (RSS) de potencia de la señal recibida mediante la lectura de la propia señal WIFI.

Se pueden diferenciar dos métodos de trabajo para la localización por RSS [8], según quien sea el transmisor y el receptor. Si se considera a los *nodos satélites* como emisores o transmisores de la señal y como receptor el *nodo cliente* se denomina sistema unilateral y es el *nodo cliente* el que hace la estimación de su ubicación. Si se considera transmisor al *nodo cliente* y receptores a los *nodos satélites* entonces tenemos lo que denomina Binsky sistema multilateral. De estos dos sistemas, en lo concerniente a este proyecto, se considerará que trabajaremos sobre un sistema unilateral.

Hay dos técnicas que utilizan el RSS para localizar la posición: la triangulación y el fingerprinting

Fingerprinting [7]

Técnica basada en el reconocimiento de patrones, en la comparación de estos dentro de una base de datos entre la del sistema, datos guardados en la fase de captura, y la del *nodo cliente* (el vector de potencias recibidas de los *nodos satélites*). Se usa en ambos modos, multilateral o unilateral. Hay dos modelos de Fingerprinting:

- Búsqueda del *nodo satélite* más cercano o
- Búsqueda por métodos estadísticos.

En cualquiera de los dos modelos hay que pasar por la fase previa (su principal inconveniente) llamada fase de entrenamiento.

En un primer momento se ha de decidir el área a cubrir y elegir unos puntos determinados para tomar las medidas. Escoger los *nodos satélites* mínimos de acceso para que el error que se cometa entre la posición calculada y la real sea lo más aceptable posible. En un sistema unilateral, se mapea el área de búsqueda con P puntos, de ubicaciones conocidas, y se mide la potencia de cada *nodo satélite* para cada uno de esos puntos. A esto se le llama vector de potencias (RSS_p). Por tanto, habrá tantos vectores como P puntos de mapeo. Estos vectores se guardan en una base de datos.

$RSS_p = (AP_1, AP_2, AP_3, \dots, AP_k)$, donde k es el número total de *nodos satélites*.

Para el método de búsqueda del *nodo satélite* más cercano, se compara el RSS_p de todos los puntos con el $RSS_{cliente}$ y escoger como posición del usuario la correspondiente a la distancia euclidiana mínima.

En el método estadístico se utiliza, para el cálculo de la distancia, el teorema de Bayes, calculando la probabilidad de que el *cliente* se encuentre en el estado e_p (cada punto de captura es un estado), cuando él ha medido su observable O' .

$$P(e_p | O') = \frac{P(O' | e_p) P(e_p)}{P(O')}$$

Cuanto mayor sea la probabilidad más factible es que se encuentre el *cliente* en el estado e_p ⁴.

Tanto en uno como en el otro método, la calidad del posicionamiento depende del número de *odos satélites*, de los puntos de referencia en el mapeo y de los efectos generados por la propagación. La interferencia Bayesiana suele dar mejores resultados que el método Euclidiano, en cualquier caso son necesarias muchas medidas para que el sistema sea lo más eficaz posible.

Existen otros sistemas para el cálculo probabilístico de posiciones, desde máquinas de soporte vectorial hasta algoritmos basados en redes neuronales, pasando por funciones de densidad como el método de Kernel. Cada uno, a su manera, hay un gran número de opciones y posibilidades. Solamente la complejidad de implementación y ejecución así como la necesidad o no de tiempo de procesado y de almacenamiento determina la elección de uno u otro método.

En cuanto al método determinista más utilizado sea el KNN, K-Nearest Neighbors. Este consiste en utilizar una matriz semejante a la de la tabla 1, para obtener los puntos de la matriz más próximos a la posición del *nodo cliente*. Una vez que se obtienen, se promedian y determinan el punto más próximo y por tanto a su posición.

Posición X	Posición Y	AP-1	AP-2	AP-3	...	AP-n
X_1	Y_1	$RSSI_{1,1}$	$RSSI_{1,2}$	$RSSI_{1,3}$...	$RSSI_{1,n}$
X_2	Y_2	$RSSI_{2,1}$	$RSSI_{2,2}$	$RSSI_{2,3}$...	$RSSI_{2,n}$
...
X_n	Y_n	$RSSI_{n,1}$	$RSSI_{n,2}$	$RSSI_{n,3}$...	$RSSI_{n,n}$

Tabla 1: Intersección de señales basados en indicador de potencia (RSSI).

⁴ En el libro de Bensky [8] se explica con detenimiento esta técnica compleja del Teorema de Bayes.

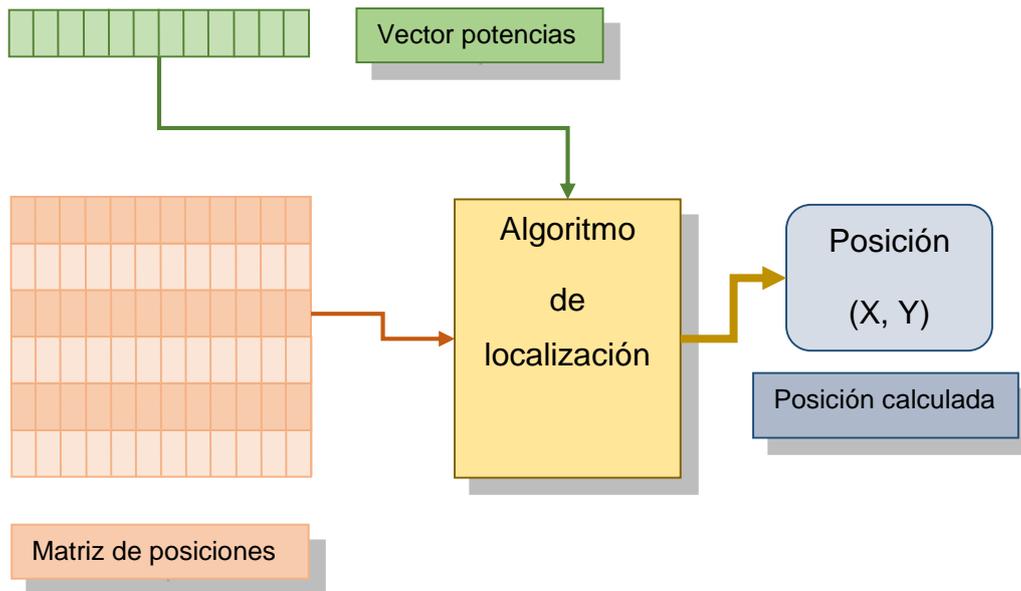


Figura 9: Obtención de la posición del *nodo cliente*.

Para estimar la posición, es necesaria la matriz de posiciones obtenida anteriormente y el vector de potencias de la posición a calcular. Por supuesto, hay que tener en cuenta que todas estas mediciones son válidas siempre que no varíen de posición los *nodos satélites* o se incorporen nuevos elementos que atenúen la señal.

Teniendo un conjunto de medidas $X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ obtenidas en un punto a determinar su posición, definimos la matriz con sus vectores de potencia tal que:

$$N = \begin{pmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} & s_{1,3} & \dots & s_{1,n} \\ s_{2,1} & s_{2,2} & s_{2,3} & \dots & s_{2,n} \\ s_{3,1} & s_{3,2} & s_{3,3} & \dots & s_{3,n} \\ s_{4,1} & s_{4,2} & s_{4,3} & \dots & s_{4,n} \end{pmatrix}$$

Donde $s_{1,1}$ es la índice de potencia (RSSI) del nodo satélite 1 en la primera posición de la matriz, donde se define el vector de potencia en la posición p como:

$$F(p) = (s_{p,1}, s_{p,2}, s_{p,3}, \dots, s_{p,n})$$

Para de esta forma poder calcular la distancia entre cada vector de potencia de la matriz $F(p)$ y el vector de potencias medio, X .

$$dist_p = \frac{1}{n} \sqrt{(x_1 - s_{p,1})^2 + (x_2 - s_{p,2})^2 + \dots + (x_n - s_{p,n})^2}$$

Una vez se han obtenido todas las distancias para todos los vectores de la matriz de posiciones se seleccionan los vectores cuya distancia euclídea al vector de potencia sea menor y por lo tanto más cercanas al *nodo cliente*. Se puede promediar usando métodos como la media aritmética o el cálculo de centro de masas (tomando como peso la inversa de la distancia calculada) de tal modo que los puntos más cercanos tengan mayor peso y nos devuelva el más cercano a la posición real del *nodo cliente*.

Es un método que no es muy complejo y los cálculos son fáciles de implementar en el sistema, pero sí hay que tener en cuenta que el tamaño de la matriz inicial influye en el tiempo de procesamiento para el cálculo de las distancias.

Triangulación y trilateración [9]

Este método para calcular distancia se basa en la trigonometría de triángulos para determinar posiciones de puntos y se ha utilizado desde la antigüedad hasta nuestros días. Actualmente se está utilizando para la localización en exteriores con los sistemas GPS, pero también se está adaptando a su versión en interiores.

La triangulación toma diversos puntos de referencia para localizar una posición desconocida. Consiste en la localización del *nodo cliente* por medio de la intersección de, mínimo de 4 esferas si hablamos de 3D o de tres circunferencias en 2D tal y como se explicará en el apartado 3.3.1.

En este proyecto se va a utilizar este método de triangulación considerando que los *odos satélites* están en posiciones conocidas y en línea perpendicular unos de otros, es decir formando un polígono de ángulos rectos, un rectángulo o un cuadrado.

La triangulación tiene varias fases o procesos:

- Con las potencias de tres *odos satélites* que le llegan al *nodo cliente* se crea un sistema de ecuaciones representando tres círculos.
- Resolución del sistema de ecuaciones obteniendo un conjunto de puntos denominado puntos de triangulación.
- Cada punto de triangulación se considera el vértice de un triángulo.
- Se forman todos los triángulos posibles y se calculan sus áreas para un proceso de comparación.
- El centro del triángulo de área más pequeña se toma como estimación de la posición del *nodo cliente*.

Esto nos va permitir facilitar el cálculo de los datos y evitar las zonas de ambigüedad que se producen cuando las zonas de potencia no coinciden exactamente en un triángulo en su intersección. Para esto se cuenta con la ayuda de la trilateración que se explicará más adelante en el apartado 3.

2.3. Tecnologías para localización en interiores

Entre las tecnologías más utilizadas para los sistemas de localización inalámbrica en interiores se encuentran las tecnologías IR, VA, US y RF. Todas ellas pueden ser utilizadas como tecnologías de posicionamiento en interiores, pero cada una de ellas tiene su ámbito y aplicación en función de parámetros tales como la precisión, el coste, el mantenimiento, etc. Y será decisión del usuario escoger una u otra.

2.3.1. Infrarrojos [10]

La radiación infrarroja o radiación IR es un tipo de radiación electromagnética de mayor longitud de onda que la luz visible (400 - 700 nm), pero menor que la de las microondas (1 nm - 100 μ m). Abarcando más de tres órdenes de magnitud, la radiación IR se encuentra aproximadamente entre los 700 nm y 300 μ m. La tecnología IR, tiene un alcance normal de 5 – 10m máximo y por tanto más que tecnología de localización, se utilizan como tecnología de proximidad. Puesto que la longitud de onda de las señales que maneja la tecnología IR es muy pequeña en comparación con el tamaño de los obstáculos que se pueden encontrar en el interior de un edificio, las señales IR se reflejan en los mismos sin llegar a pasar a través de ellos, dificultando la utilización de estas señales entre dos o más habitaciones.

La tecnología IR es muy sencilla de usar, barata, compacta y de bajo consumo, características que la hacen muy atractivas en el desarrollo de sistemas de localización inalámbrica en interiores. La desventaja de esta tecnología IR es la presencia de luz fluorescente y luz solar, que interfieren con la propia señal IR, por lo que el mercado queda restringido a áreas de interior donde se pueda garantizar una línea de visión directa entre los nodos IR. Por lo que se suele descartar en sistemas de localización interiores extenso más allá de una habitación o sala.

2.3.2. Visión Artificial [11]

La VA, o visión por ordenador, es un subcampo de la inteligencia artificial. El propósito de la visión artificial es programar un ordenador para que entienda una escena o las características de una imagen, tratando de emular con una cámara la visión de un ojo humano. Uno de los campos de aplicación de la visión artificial es la localización y guiado de personas o robots en entornos de interior, utilizando las imágenes como medida de localización en el diseño de estos sistemas.

El gran problema de este sistema de localización, es que necesitan de información sobre la geometría y medidas del entorno mediante mapas de ocupación, topológicos o a veces secuencias de imágenes para encontrar similitudes y poder estimar la posición en que se encuentra el *nodo cliente* a localizar. Esto hace que los sistemas de localización basados en VA sean poco robustos y poco fiables ante cambios del entorno.

Las tecnologías de localización basadas VA abarcan un mercado muy diferente a la propuesta de este proyecto, por lo que queda descartada al igual que la tecnología IR.

2.3.3. Ultrasonidos [12]

Estos sistemas de localización basados en US o ultrasonidos llamados también sonar, están siendo cada vez más utilizados en sistemas de localización en interiores. Su baja velocidad de propagación de la señal (340 m/s) permite realizar medidas precisas de los parámetros temporales de la señal US utilizando relojes de baja frecuencia. Pueden alcanzar precisiones de

centímetros en la localización de un *nodo cliente*. Utilizan el tiempo de vuelo de las señales US como métrica de localización en el diseño de entorno de interiores, y permite precisiones de localización entre 0,1 y 50 cm, dependiendo del sistema.

Debido a que las señales US no se propagan a través de las paredes u otros obstáculos, el sistema de localización inalámbrica debe ser instalado en cada habitación del entorno a localizar. Otro elemento a tener en cuenta es que los factores ambientales provocan cambios sustanciales en la propagación de la señal US. Éstas son unas desventajas sustanciales frente a los sistemas de localización por RF, que cubren varias habitaciones o plantas enteras con pocos *nodos satélites* y cuya propagación no se ven afectadas por factores ambientales.

Además, se necesitan más de tres *nodos satélites* US en línea de visión directa para poder garantizar un mínimo de precisión y reducir el error cometido en las medidas. La necesidad de tener una infraestructura de red US con línea de visión directa entre los *nodos satélites* US la hace inviable en entornos de interior extensos. Por otra parte contradice los requerimientos de los usuarios: bajo coste, facilidad de despliegue y mínima infraestructura.

2.3.4. RadioFrecuencia [13]

Las señales de RF son un subconjunto de la radiación electromagnética que se encuentra a 300 Hz y 3000 GHz. Este rango del espectro electromagnético se corresponde con las frecuencias de las señales eléctricas de corriente alterna usadas para producir y detectar ondas de radio. La denominación de señales RF se pueden referir tanto a oscilaciones electromagnéticas en el interior de los circuitos como a la radiación por el espacio libre, siendo estas últimas a las que se referirá en este proyecto cuando se hable de ellas.

Se han desarrollado muchas técnicas para el posicionamiento inalámbrico en entornos de interior basadas en señales RF, aunque sea complicado ajustar las métricas de localización, ya sea mediante ToA, AoA o RSS. Este último es el parámetro más sencillo de obtener con cualquier dispositivo inalámbrico convencional, al contrario que ocurre con los métodos de localización ToA y AoA que llevan asociadas modificaciones en el hardware existente como antenas, medidas de tiempo de propagación, ..., que requieren mayores inversiones en su construcción.

Aunque la tecnología de RF necesita de una fase previa de calibración del entorno, de la que se puede extraer un modelo estadístico de propagación, y del que a su vez, se pueden derivar métodos de localización basados en comparación de patrones de radiación (huellas o fingerprinting) o bayesianos y que son dependientes del entorno y un cambio en el mismo podría invalidar la precisión del método de localización, presentan varias ventajas respecto a IR, VA y US. Estas señales RF pueden cambiar su dirección de propagación por reflexión o por difracción en los obstáculos, o atravesarlos, ampliando su rango de cobertura. Aunque la precisión conseguida por los sistemas de localización inalámbrica se vea afectada por la falta de visión directa entre los *nodos satélites* existen multitud de técnicas capaces de reducir este efecto,

garantizando una localización más precisa en el *nodo cliente*. Por lo tanto, los obstáculos no suponen un inconveniente en el desarrollo de un sistema de localización basado en RF. Reduciendo así, el número de *nodos satélites* de referencia, y por tanto el coste de implantación es mucho menor. Se podrá utilizar cualquier infraestructura inalámbrica o redes de *nodos satélites* creada en los actuales edificios inteligentes como sería el caso de redes de sensores de temperatura, medidores de humos, etc...

Dentro de la RF, tecnología inalámbrica que utiliza campos electromagnéticos para transmitir datos, ha surgido una variedad de usos en campos muy diferentes, con tecnologías propias y diferenciadas en estándares:

Bluetooth

Es una tecnología de comunicación inalámbrica para dispositivos móviles en un área de extensión personal, WPAN. Además permite la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos, utilizando la banda ISM⁵ de 2,4 GHz.

Con un alcance máximo de 100 metros emitiendo a una potencia máxima de 20 dBm, se ha convertido en una tecnología mundialmente utilizada. Desde sus inicios se plantearon diferentes usos como puede ser, auriculares, manos libres, módems, transferencia de ficheros, etc.

La tecnología ha ido evolucionando y una de las características que se añadió es la posibilidad de un perfil de baja energía, Bluetooth Low Energy, el cual se ha ido incluyendo en diferentes dispositivos portátiles ya que permite desarrollar rápidamente enlaces sencillos con una considerable reducción del consumo. La mayor desventaja de este tipo de soluciones es su alto coste, ya que sería necesario un Beacon⁶ por cada zona que se quiera diferenciar, así como el mantenimiento de los mismos, ya que esos Beacons, normalmente, están alimentados de una batería interna con una duración de entre 2 y 3 años.

ZigBee

Es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de comunicación inalámbrica, basada en el estándar IEEE 802.15.4. Define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal (PAN) con bajas tasas de transmisión de datos. Las

⁵ ISM: Industrial, Scientific and Medical son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética.

⁶ Beacon es un dispositivo de bajo consumo que emite una señal broadcast, y son suficientemente pequeños para fijarse en una pared o mostrador.

principales aplicaciones de las redes ZigBee se agrupan en redes de sensores en entornos industriales, médicos y domóticas.

Las principales características de este protocolo y de la red Zigbee es su bajo consumo de energía, baterías de larga duración a causa de su poca energía de transmisión y pocos ciclos de servicio, bajas transferencias de datos y sobre todo su sistema de bajo coste. También se utilizan para aplicaciones que requieran comunicaciones seguras.

La desventaja de este sistema es que necesita de tres tipos de dispositivos diferentes que cumplen con funciones diferentes dependiendo de la posición en que se encuentran dentro de la red: coordinador ZigBee, router ZigBee y dispositivo final. El estándar 802.15.4 también define dos dispositivos según las funciones que estos pueden realizar en una red ZigBee: dispositivo de funcionalidad completa (FFD) y dispositivo de funcionalidad reducida (RFD).

Todo esto, aunque es un entorno bastante fiable, complica el despliegue de un sistema de localización que tiene que invertir en infraestructura para poner en funcionamiento a todos sus *nodos satélites*, mientras que el sistema WiFi utiliza una infraestructura ya creada y por lo tanto el coste del sistema es mínimo.

WiFi

Se basa en el estándar IEEE 802.11, el más difundido del mundo, y consiste en el envío de datos sobre redes que utilizan ondas electromagnéticas en lugar de cables. Utiliza la banda de frecuencia de 2.4 GHz y su tasa de transferencia depende del estándar que se haga uso, desde 11 MBps (IEEE 802.11b) hasta 108 Mbps (IEEE 802.11 n).

Entre sus ventajas, aparte de las altas tasas de transmisión, es la capacidad de suministrar cobertura en un rango de distancias que puede llegar a los 100 metros. Esto y su bajo coste en instalación resultan muy atractivos para elegir este sistema como base para desarrollar aplicaciones de localización en interiores. La principal desventaja está en el campo de la seguridad. Existen programas capaces de capturar paquetes enviados y calcular la contraseña de la red y de esa forma acceder a ella. En nuestro proyecto, la seguridad no es un problema porque nuestro interés es detectar los *nodos satélites* de la red para localizar al *nodo cliente* sin necesidad de tener que acceder a la red. En principio no existe la necesidad de comunicar a nadie la ubicación, pues se está desarrollando un estudio teórico del sistema de localización sin necesidad de conectarse a la red.

2.4. Estudio de mercado

Distintos fabricantes con diferentes μ Controladores pueblan el mercado que dan servicio al desarrollo de prototipos semejantes al propuesto en este proyecto. Así como empresas

dedicadas al desarrollo de herramientas privativas y colaborativas para la utilización de estos micros para la creación de sistemas de localización tanto Outdoor como Indoor.

Entre las españolas se encuentra Nebusens (<http://www.nebusens.com>) que desarrollan dos productos: *Polaris*, que implementa tecnología inalámbrica basada en el estándar ZigBee para sistemas de localización en interiores; y *n-Core*, una plataforma de desarrollo de aplicaciones sobre redes inalámbricas.

En cuanto a empresas que se dedican a sistemas de localización en tiempo real basados en WiFi está Ekahau (<http://www.ekahau.com>) un software que se basa en la calibración de la potencia de señal y las huellas digitales que emiten las radiobalizas o *nodos satélites* de la red Wireless y funciona sobre cualquier estándar 802.11.

Por el lado del software libre encontramos a Place Lab⁷, (se nombra en muchos documentos y proyectos, pero ya no se localiza su página Web en Internet), destinado para aplicaciones de cálculo de la posición de clientes tanto en interiores como en exteriores, escrito en Java y con permisos de acceso y modificación de los códigos fuente. También está Herecast⁸, (ocurre lo mismo que con Place Lab, ya no se encuentra su enlace en Internet), un sistema en pruebas que proporcionaba servicios de posición basados en WiFi. Su funcionamiento es por medio de una base de datos con la posición de todos los puntos de acceso, por lo que utiliza un algoritmo de referencia a la base de datos para la ubicación del usuario.

⁷ <https://homes.cs.washington.edu/~lamarca/pubs/pervasive-placelab-2005-final.pdf>

⁸ <http://highearthorbit.com/200/>

3. Diseño sistema posicionamiento

Este capítulo se centrará en definir algunos conceptos básicos para poder asumir el proyecto. En él se explicarán los diferentes métodos de localización y cuál es el más adecuado para este caso.

3.1. Sistema de localización basado en WIFI

Hay diversas tecnologías que debido a limitaciones de alcance y de precisión se encuentran limitadas a un entorno definido y concreto. Tenemos, por un lado a los sistemas de posicionamiento global o GPS y por otro lado, están los Identificadores de radiofrecuencia o RFID con tecnología sin hilos. El primero limitado su espacio al exterior por las dificultades de recepción en zonas de sombra e interiores, el segundo limitado por su escaso alcance comparado con los sistemas GPS y de fácil transmisión en sitios cerrados por su escasa infraestructura hace de este último que sea el candidato para el desarrollo de sistema y algoritmos de localización en interiores.

Dentro de los sistemas de RFID, por su versatilidad, su gran movilidad al minimizar las conexiones cableadas, la rápida conexión a la red Wireless, la transmisión en tiempo real y la alta velocidad de esa transmisión junto con su bajo coste hacen del sistema WIFI el preferido por la mayoría de empresas que desarrollan sistemas de localización y posicionamiento.

De entre todos estándares, el más extendido es el IEEE 802.11 en sus diversas variantes, siendo las más comerciales las versiones a, b, g, n y ac. Éstas se han ido implantando en múltiples dispositivos, desde teléfonos móviles hasta televisores, gafas inteligentes y últimamente en relojes.

Como se ha descritos en los capítulos y apartados anteriores, el proyecto a desarrollar se basa en la tecnología WIFI como medio de transmisión para desarrollar el sistema de localización en interiores, un sistema basado en la detección de etiquetas o tags para su localización. Este sistema se sustenta en la utilización de identificativos únicos como la dirección MAC (Media

Access Control) de los dispositivos o los SSID (Service Set Identifier o identificador del *nodo satélite*), que es única para su localización.

Para nuestro proyecto utilizaremos también el sistema de información que facilitan los *nodos satélites* por medio del nivel de potencia. Éstos están basados en la diferencia de la potencia de señal recibida desde el *nodo cliente*, por al menos, tres puntos de control. El software de control debe saber cuáles son los patrones de señal y la ubicación de cada uno de los *nodos satélites*. Para ello hay que hacer un estudio de cobertura de todos y cada uno de los *nodos satélites* que compone el sistema de localización.

De esta manera, el *nodo cliente*, recibiendo la información de tres o cuatro *nodos satélites*, debe ser capaz de calcular, mediante el algoritmo de triangulación (adaptación para el sistema desarrollado), su posición en un determinado mapa “virtual” previamente cargado, y sobre el cual se ha realizado el estudio de cobertura, conociendo la ubicación de todos los *nodos satélites* que forman el sistema.

3.2. Diseño aplicación

El proyecto propuesto se elaborará bajo el estándar de redes de acceso inalámbricas con estructura de red.

Los *nodos satélites* identificados como WIFI-TFC-AP-1, WIFI-TFC-AP-2, WIFI-TFC-AP-3 y WIFI-TFC-AP-4 serán los elementos que usaremos para localizar el *nodo cliente*, por medio de la información de la potencia recibida (RSSI) será capaz de determinar su localización en relación a las posiciones de los *nodos satélites* o AP's.

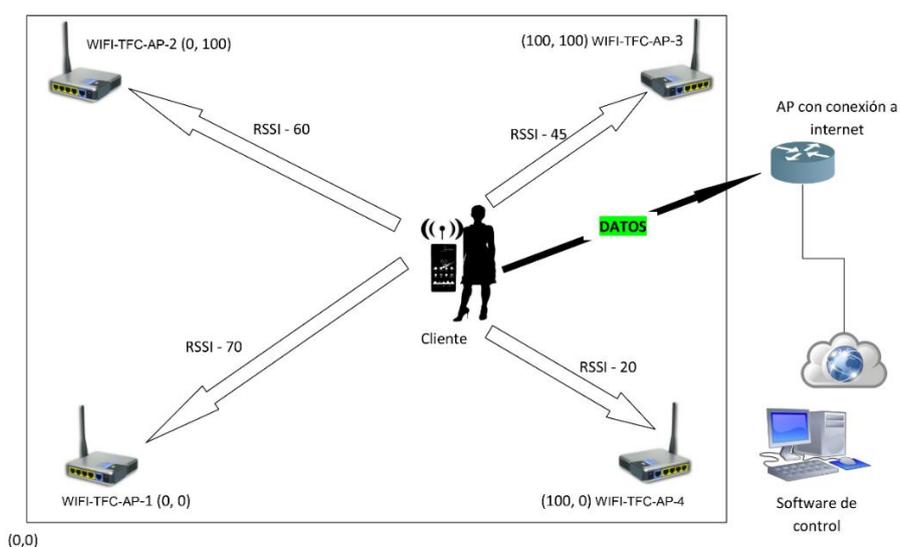


Figura 10: Estructura de la sala localizada por coordenadas

WIFI-TFC-AP-1, WIFI-TFC-AP-2, WIFI-TFC-AP-3 Y WIFI-TFC-AP-4 serían los diferentes puntos de referencia para el *nodo cliente*.

En un primer momento la posición de los *nodos satélites*, puede ser conocida por el *nodo cliente* mediante una implementación en código que los carga en memoria o también, puede recibir desde un servidor al que se haya conectado previamente, la posición de los mismos. La comunicación de la posición del *nodo cliente* quedará en manos de la posible implementación que se hiciera en un futuro dependiendo siempre del sistema embebido en el que se decidiera trabajar. Una vez se tengan los datos por medio del prototipo que se está usando, el *nodo cliente*, para facilitar la labor de escanear la red, compuesto por el sistema embebido LPC1769, el módulo WiFly y el conversor CP2102 para poder visualizar por consola algunos de los datos necesarios para el proyecto, por medio de una terminal de consola como puede ser PuTTY, y ejecutando en este caso un comando del API que tiene implementado el módulo WiFly y que es "scan". Éste devolverá el identificador y la potencia de las redes, incluyendo la de los AP's o *nodos satélites*. Con estos datos, y siguiendo las pautas del proyecto se anotarían la posición del *nodo cliente*, la distancia a los que se encuentra de cada *nodo satélite* y se procedería a la triangulación explicada más adelante para comprobar si hay error y la posición del mismo.

Pongamos por ejemplo que tenemos una sala como la del diagrama y que la sala esta cuadrículada para montar una estructura de coordenadas. Siempre tomando como referencia el (0,0), el WIFI-TFC-AP-1 está en la posición (0,0), el WIFI-TFC-AP-2 está en la posición (0,100), el WIFI-TFC-AP-3 en la posición (100,100) y el WIFI-TFC-AP-4 se fija en la posición (100,0). Por otro lado el *nodo cliente* entra y se sitúa en una posición (x, y). Con estos datos el *nodo cliente*, una vez configurado para conectarse de forma automática a la red en la que se encuentra y recibido (o previamente programado) el mapa de referencia con los *nodos satélites*, podrá una vez detectada la posición de los AP's por medio de escanear los SSDI y la potencia recibida (RSSI), saber lo lejos que están de él y podrá triangular e identificar su posición (x, y) física dentro de la habitación.

Para poder entender el sistema de triangulación desarrollado, una variante del sistema tradicional de triangulación, se explicará en el punto siguiente el método y a continuación en el siguiente apartado las especificaciones de la variante.

3.3. Método de estimación de localización basado en RSSI

En entornos de interiores (indoor), el número de componentes que afectan a la señal principal es mucho mayor que en otros entornos, lo que origina una mayor variabilidad de la señal. Como es posible la localización basada en la lectura de las potencias de las señales recibidas por parte de los *nodos satélites* se han desarrollado algunos métodos o técnicas diferentes: la localización por reconocimiento de patrones (fingerprinting), desarrollado anteriormente y la triangulación que pasaremos a explicar con detalle puesto que será una variante de ésta la que utilizaremos para nuestro proyecto.

3.3.1. Triangulación

El método de triangulación funciona de forma similar a los mencionados ToA y DToA, puesto que asimilan potencia recibida a distancia. Sin embargo al no ser asimilable esta relación en interiores, se obtienen unos resultados un poco precisos.

La localización se basa en la suposición de que las antenas generan un patrón de radiación en forma de esfera con centro en la propia antena. Con tres de estas esferas, cada una con un radio establecido en base a la potencia recibida de cada una de ellas, se puede obtener la estimación de la localización al intersecar las tres esferas.

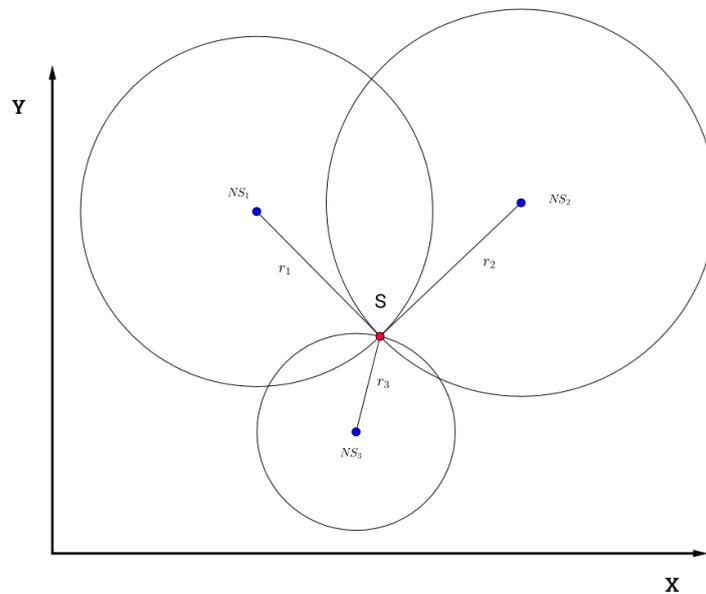


Figura 11: Estimación de la localización por medio de triangulación.

En realidad, las antenas reales no generan un patrón de radiación esférico sino en forma de donut o toroide. Lo normal es que los *nodos satelitales* tengan instaladas antenas omnidireccionales.

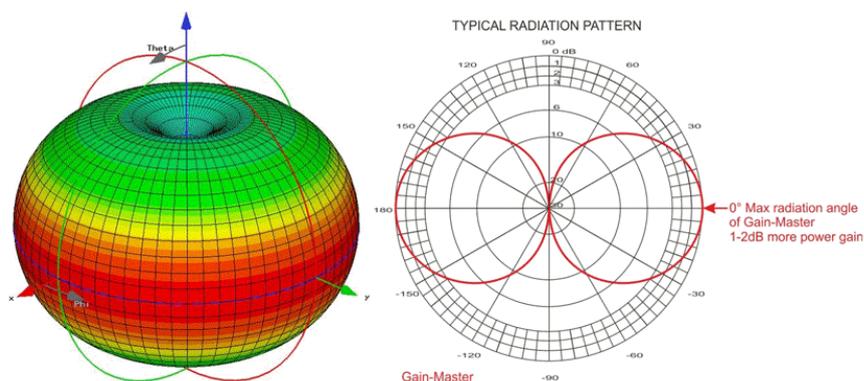


Figura 12: diagrama de radiación en 3D y su sección.

Con estas antenas, se puede controlar el plano donde se coloca el toroide, el plano se pone paralelo a la horizontal, por lo que la aproximación anterior es válida si el *nodo cliente* se sitúa en la misma planta que el *nodo satélite* o en sus proximidades.

La ventaja de este método es que es aplicación directa en cualquier entorno, siempre y cuando el modelo empleado se ajuste a la propagación real. Si difiere mucho de la teórica se obtendrá un modelo adaptado del entorno por lo que la generalidad se pierde. El inconveniente de este método es que al tratar RSSI como distancia, no se tiene en consideración los obstáculos, ni las refracciones ni difracciones con lo que hay que calcular un factor de ponderación o desfase para reducir el error al mínimo.

Las coordenadas (x, y) de la posición donde se encuentra el *nodo cliente* $S(x, y)$ se estimarán mediante la técnica de multilateración propuesta en [14].

En dos dimensiones, la técnica de multilateración se define como el método para determinar la intersección de N circunferencias ($N \geq 3$) con centro en la posición de los *nodos satélites* o balizas (NS_{xi}, NS_{yi}) , y radio la distancia estimada del *nodo cliente* a localizar a cada uno de los *nodos satélites* de referencia \hat{r}_i , donde en ambos casos $i = 1, 2, \dots, S$.

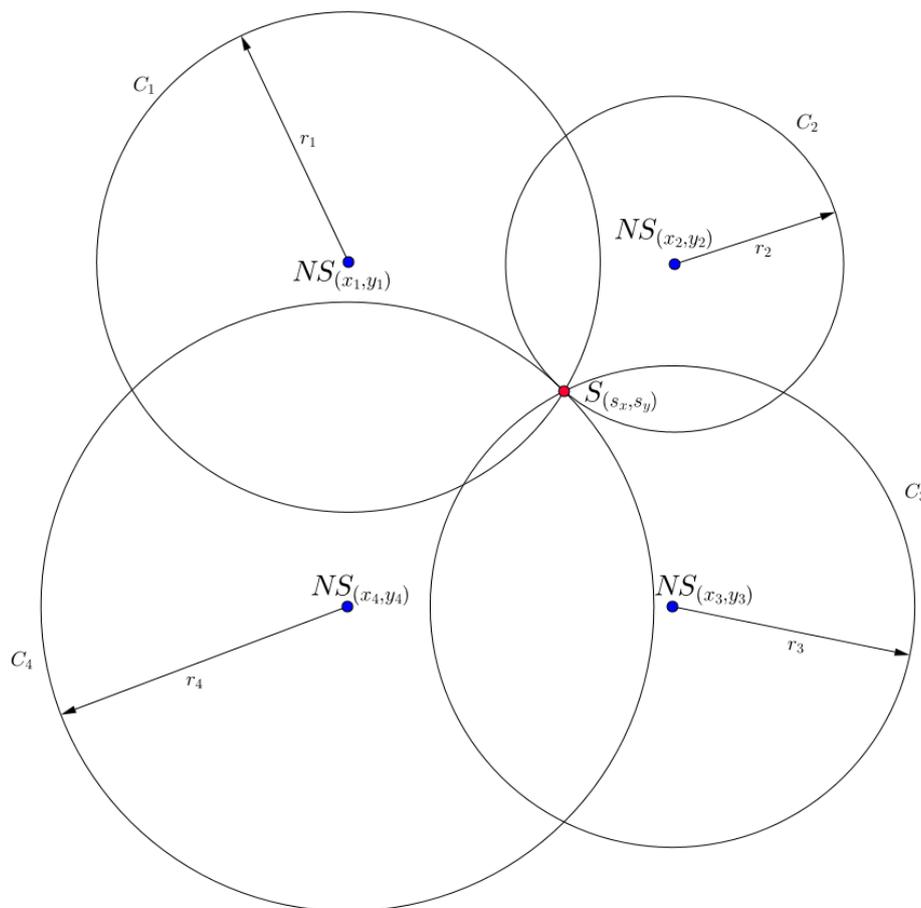


Figura 13: Resolución gráfica del sistema de ecuaciones formado por cuatro circunferencias cuando las estimaciones de distancia \hat{r}_i , son precisas.

Dado por hecho que el número de *nodos satélites* dentro del rango de cobertura del *nodo cliente* a localizar es mayor del mínimo requerido, en dos dimensiones el número de *nodos satélites* tiene que ser mayor o igual a tres y en tres dimensiones tiene que ser mayor o igual a cuatro, entonces se debe resolver un sistema de ecuaciones cuadráticas determinado, es decir, aquellas que definen analíticamente las n circunferencias. Como se puede observar en la figura anterior ($n > 3$), si todas las estimaciones de distancia fueran precisas, las n circunferencias con centro (NS_{xi}, NS_{yi}) , y radio \hat{r}_i , se cortarían en único punto $S(x, y)$. Sin embargo, debido a que \hat{r}_i estará afectada por errores, será difícil que coincida con la distancia real. Estos errores se deben a que la distancia \hat{r}_i se calcula a partir de los niveles de potencia RSSI recibidos por el *nodo cliente* y en los cuales influyen las atenuaciones y el medio, como se ha explicado anteriormente. En consecuencia, las n circunferencias no se cortarían en un único punto, motivo por el cual se buscará la solución del sistema determinado de n ecuaciones cuadráticas en el sentido de mínimos cuadrados. Por tanto, la posición del *nodo cliente* $S = [x, y]^T$, puede ser estimada encontrando el valor de $\hat{S} = [\hat{x}, \hat{y}]^T$ que satisfaga:

$$\hat{S} = \arg \min \sum_{i=1}^n \left[\sqrt{(NS_{xi} - x)^2 + (NS_{yi} - y)^2} - \hat{r}_i \right]^2$$

La resolución de \hat{S} es compleja y difícil de analizar. Por tanto, en lugar de usar circunferencias como ecuaciones para determinar la posición del *nodo cliente* a localizar, se utilizarán los ejes radicales resultado de combinar, sin repetición, todos los pares de las n ecuaciones de circunferencias. De esta forma el problema tan complejo representado en la ecuación anterior se reduce a resolver $\frac{n(n-1)}{2}$ ecuaciones lineales por mínimos cuadrados, estando éstas definidas por los ejes radicales er_{ij} .

El eje radical o línea geométrica de la potencia respecto de dos circunferencias dadas es el lugar geométrico de los puntos con igual potencia geométrica respecto de ambas. Es decir, la longitud de los segmentos tangente a las dos circunferencias desde cada punto del eje radical es la misma. Siempre y cuando las dos circunferencias no sean concéntricas, hecho que nunca va a suceder ya que no hay dos *nodos satélites* en el mismo punto, el eje radical es una línea recta perpendicular a la línea que une los centros de las dos circunferencias y estará más próximo al centro de la circunferencia de menor radio.

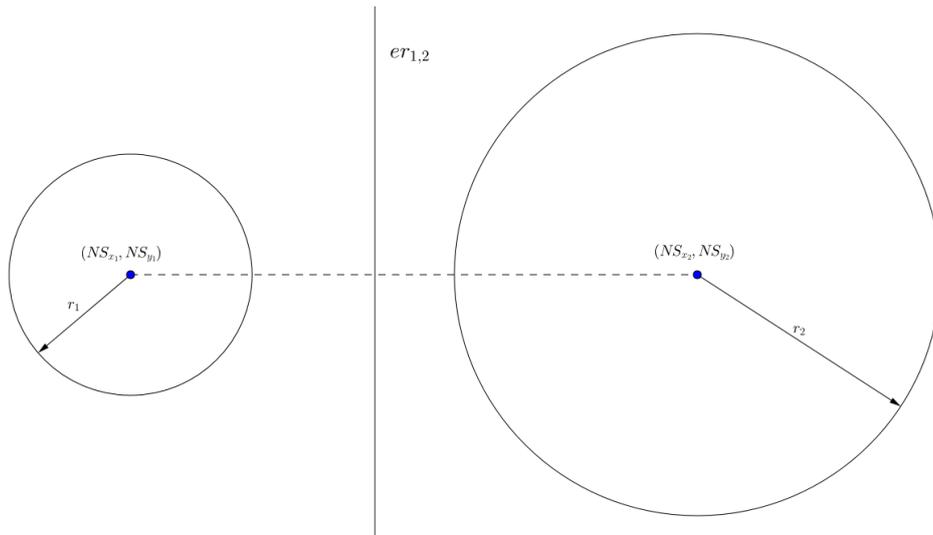


Figura 14: Propiedades del eje radical.

En la figura anterior se aprecia cómo solo una circunferencia con centro en cualquier punto del eje radical, corta perpendicularmente a las dos circunferencias involucradas en el cálculo del eje radical.

Analíticamente la ecuación del eje radical er_{ij} se obtiene a partir de la resta de las ecuaciones correspondientes a las dos circunferencias involucradas. Así por ejemplo, dadas las ecuaciones de dos circunferencias:

$$(x - NS_{x1})^2 + (y - NS_{y1})^2 = \widehat{r_1^2}$$

$$(x - NS_{x2})^2 + (y - NS_{y2})^2 = \widehat{r_2^2}$$

La ecuación correspondiente a su eje radical er_{ij} quedaría:

$$er_{1,2} \rightarrow 2x(NS_{x2} - NS_{x1}) + 2y(NS_{y2} - NS_{y1}) = \widehat{r_1^2} - \widehat{r_2^2} - (NS_{x2}^2 - NS_{x1}^2) - (NS_{y2}^2 - NS_{y1}^2)$$

La potencia geométrica de un punto con respecto a una circunferencia es un número real que representa la distancia relativa del punto a la circunferencia. Por lo tanto, la potencia geométrica de un punto respecto de una circunferencia será cero si el punto pertenece a la circunferencia, negativa si el punto es interior a la circunferencia o positiva si es exterior. Entonces, n circunferencias se cortarán en un único punto si, y sólo si, existe un punto cuya potencia geométrica respecto de todas las circunferencias es cero. En consecuencia, n circunferencias se cortarán en un único punto, si los $\frac{n(n-1)}{2}$ ejes radicales, obtenidos a partir de todas las posibles combinaciones de pares de circunferencias sin repetición, se cortan en un único punto y este punto pertenece a las n circunferencias.

Veamos un supuesto, sea $Ax = B$ un sistema de ecuaciones lineales (se suponen 4 *nodos satélites*) con:

$$A = \begin{pmatrix} (NS_{x1} - NS_{x2}) & (NS_{y1} - NS_{y2}) \\ (NS_{x1} - NS_{x3}) & (NS_{y1} - NS_{y3}) \\ (NS_{x2} - NS_{x3}) & (NS_{y2} - NS_{y3}) \\ (NS_{x2} - NS_{x4}) & (NS_{y2} - NS_{y4}) \\ (NS_{x1} - NS_{x4}) & (NS_{y1} - NS_{y4}) \\ (NS_{x3} - NS_{x4}) & (NS_{y3} - NS_{y4}) \end{pmatrix}$$

$$X = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} d^2_1 - d^2_2 - (NS^2_{x1} - NS^2_{x2}) - (NS^2_{y1} - NS^2_{y2}) \\ d^2_1 - d^2_3 - (NS^2_{x1} - NS^2_{x3}) - (NS^2_{y1} - NS^2_{y3}) \\ d^2_2 - d^2_3 - (NS^2_{x2} - NS^2_{x3}) - (NS^2_{y2} - NS^2_{y3}) \\ d^2_2 - d^2_4 - (NS^2_{x2} - NS^2_{x4}) - (NS^2_{y2} - NS^2_{y4}) \\ d^2_1 - d^2_4 - (NS^2_{x1} - NS^2_{x4}) - (NS^2_{y1} - NS^2_{y4}) \\ d^2_3 - d^2_4 - (NS^2_{x3} - NS^2_{x4}) - (NS^2_{y3} - NS^2_{y4}) \end{pmatrix}$$

Donde NS_{xi} y NS_{yi} son las coordenadas de los centros de las circunferencias; la matriz A con 6 filas y 2 columnas, y el vector B con 1 columna con 6 componentes, son el resultado de combinar las circunferencias de dos en dos sin repetición. Si todos los ejes radicales er_{ij} se cortan en un único punto, el sistema de ecuaciones lineales tendrá una única solución y ésta coincidirá con la posición del *nodo cliente* a localizar $S(x, y)$. Pero normalmente, dado que el vector B depende de las estimaciones de distancia r y éstas del nivel de potencia RSSI, y este suele estar afectado por atenuaciones del medio y demás objetos que se encuentran por el camino, los n ejes radicales er_{ij} no se cortarán en un único punto. En consecuencia, la solución del sistema de ecuaciones lineales $A * x = B$ será aquella que minimice las distancias de los n ejes radicales er_{ij} , y se puede expresar como $\hat{S} = [\hat{x}, \hat{y}]^T$, donde:

$$\hat{S} = (A^T * A)^{(-1)} * A^T * B$$

Como se observa en la ecuación, en una situación real las estimaciones de distancia \hat{r}_i no coinciden con los valores reales y por tanto los n ejes radicales er_{ij} no se cortan en un único punto. Una vez obtenida la región que delimitan los n ejes radicales er_{ij} , según Bahillo la solución óptima es el punto que minimiza la suma de las distancias al cuadrado a cada uno de los ejes radicales.

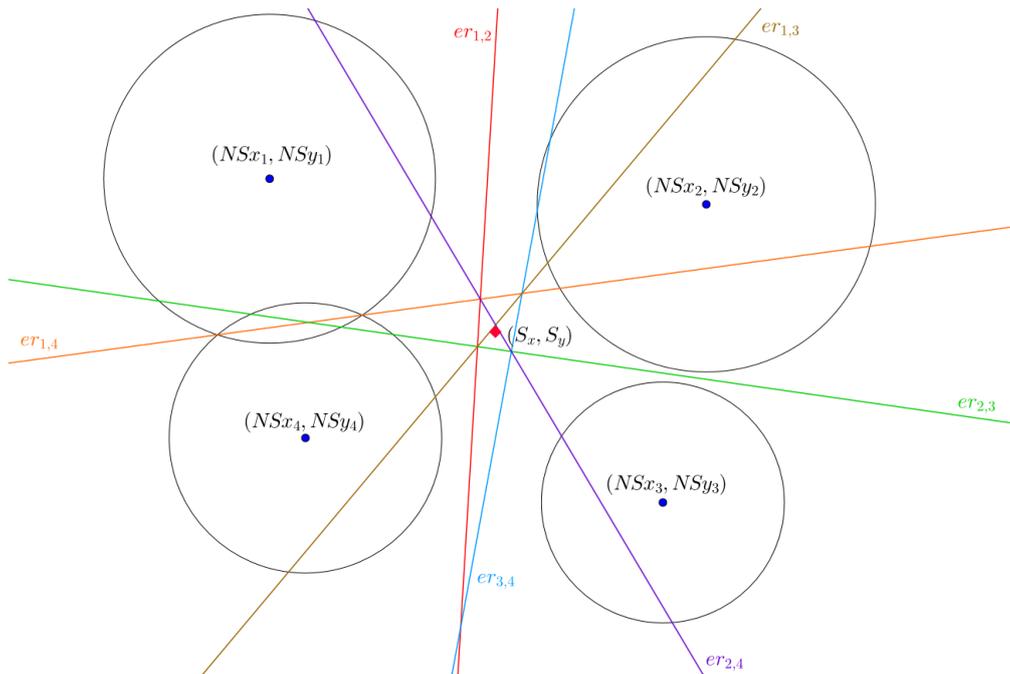


Figura 15: Resolución gráfica del sistema de ecuaciones de cuatro circunferencias cuando las estimaciones de distancia \hat{r}_i , tienen error.

Para el proyecto que se está desarrollando se ha simplificado el sistema para facilitar entender la solución propuesta⁹. Aunque esta solución no es válida para todas las posibles topologías de *nodos satélites*, si cumple para los *nodos* que forman un rectángulo (ángulos de 90°) y simplificando un poco más, la posición de uno de los *nodos satélites* estaría en la posición (0,0) del eje de referencia. Todo quedaría reducido a una cuadrícula de 10 x 10. El sistema propuesto, basado en el sistema de triangulación explicado anteriormente, consiste en encontrar el punto medio de cruce de las circunferencias. Las circunferencias son los *nodos satélites* y el radio la potencia recibida. Una vez encontrados los 4 puntos medios, se calculará la intersección como la media entre los puntos. Se explicará más detenidamente en el apartado 4 pruebas de campo, donde se buscará solución al factor de ponderación o de desfase y el factor de conversión de potencia a metros.

3.4. Diagrama de bloques

Funcionamiento general de la aplicación y diagrama de bloques:

⁹ <http://mathworld.wolfram.com/Circle-CircleIntersection.html>

Sistema conceptual del proceso de localización

Esquema simplificado donde se muestra el proceso de localización según las fases principales:

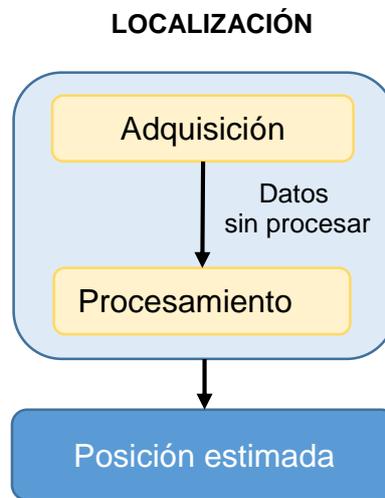


Figura 16: Diagrama conceptual del proyecto.

El sistema utiliza cualquier dispositivo de conexión a la red como por ejemplo el WiFly RN-171 que se ha utilizado para el trabajo de campo y que proporciona conexión sin hilos a la red. Este se deberá comunicar con el sistema embebido y dependiendo del tipo elegido se conectará de una forma o de otra (conexión cableada, con zócalo,...) para hacer la transferencia de las coordenadas de los *nodos satélites* con el sistema de detección y localización de los *nodos satélites* que contendrá el sistema embebido, para su posicionamiento dentro de la sala en estudio.

Este modelo usado en el proyecto (WiFly RN-171), se encuentra capacitado para trabajar con redes WiFi b/g hasta 54 Mbit/sec (configurado a 24 Mbit/sec) y con autenticación segura WEP-128, WPA-PSK y WPA2-PSK. También soporta autoconexión, característica que podría preverse en el diseño del sistema embebido para su incorporación futura de comunicación a una posible estación base.

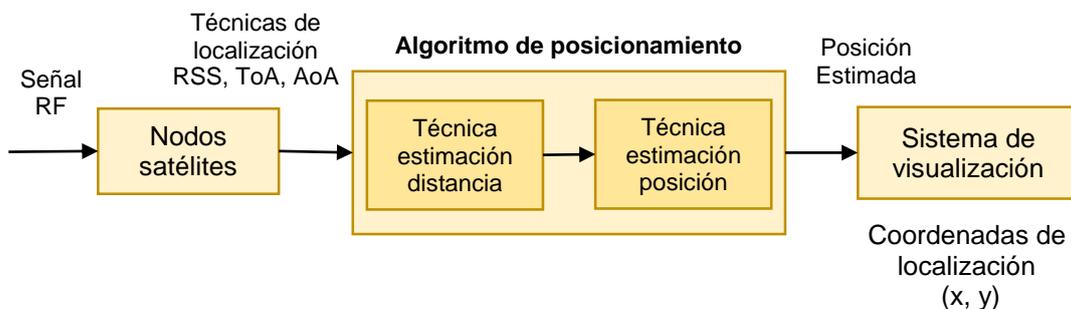


Figura 17: Aproximación a la Metodología final.

Diagrama de Bloques y esquema

Diagrama de un sistema embebido genérico conectado en nuestro caso al WiFly y al CP2102 necesario para nuestra comunicación con la red y recogida de datos. Se ha ampliado para una posible conexión a un centro de datos, alejado de nuestro proyecto, pero posible.

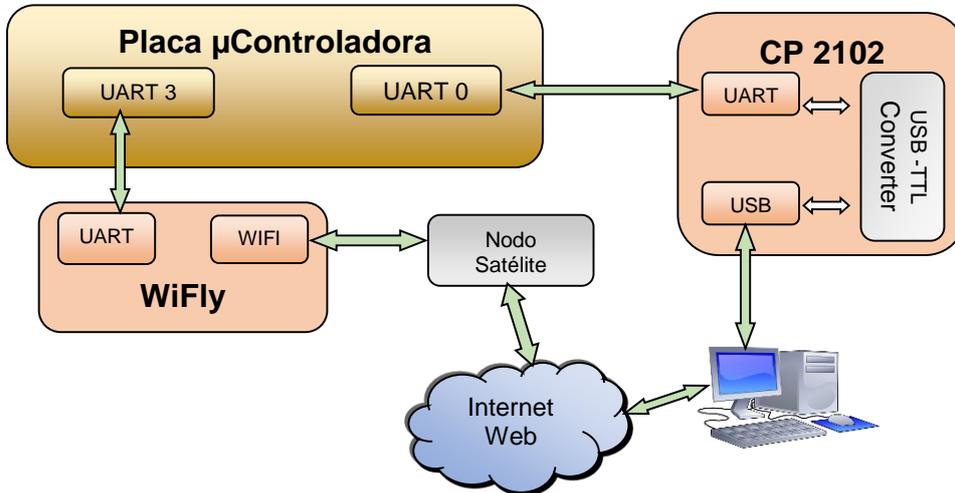


Figura 18: Diagrama de bloques del sistema embebido para pruebas.

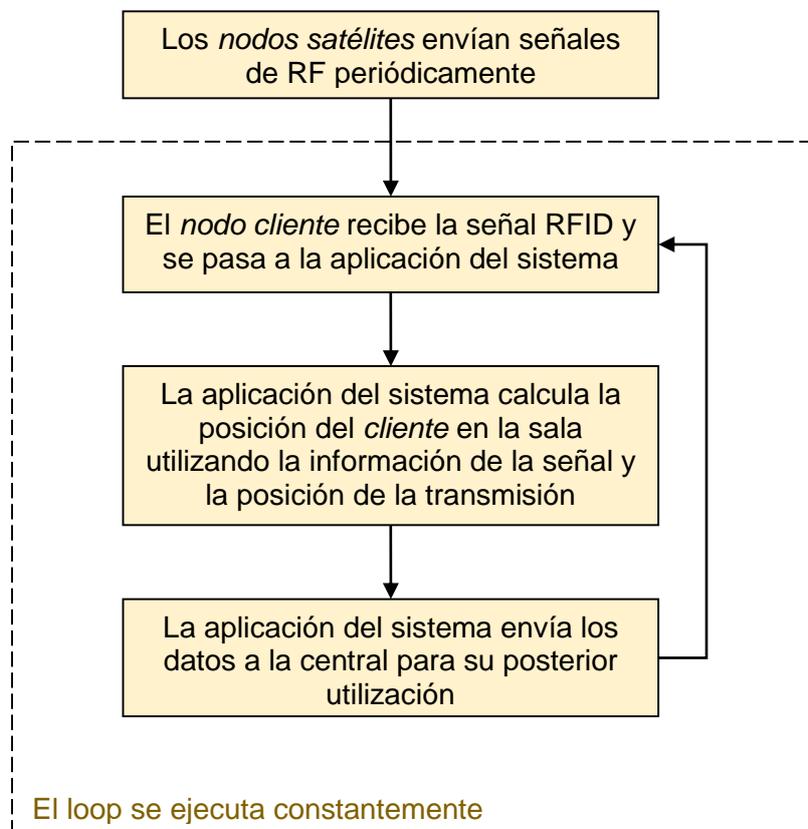


Figura 19: Modelo general del sistema de localización en interiores

4. Pruebas de campo

Una vez se ha informado del diseño del sistema de posicionamiento general del proyecto, pasamos al desarrollo de las pruebas de campo adentrándonos primero en la parte hardware en la que se apoyan estas pruebas del proyecto, pasando en segundo lugar al desarrollo teórico y explicación del sistema de triangulación, adaptación de la técnica general, y un ejemplo práctico del mismo. Este capítulo es, probablemente el más importante debido a que es donde se encuentran los detalles más técnicos del desarrollo y para una posible implementación en un sistema embebido.

4.1. Módulo de comunicaciones

El módulo encargado de las comunicaciones es el módulo WiFly RN-171-XV de la compañía Microchip (anteriormente Rovin Networks) [2]. Es un dispositivo standalone embebido para acceso a LAN's inalámbricas usando tan sólo 4 pines de conexión (POWER, TX, RX y GND), y que da interconectividad 802.11 b/g al sistema embebido, en este caso por ser facilitada por la universidad, a la placa LPC1769 mostrada en el apartado 1.6 anterior.

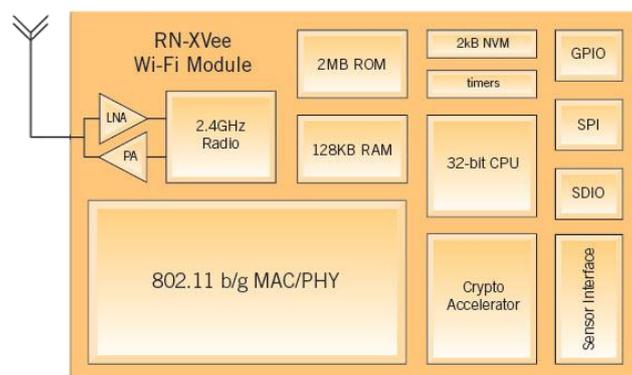


Figura 20: Diagrama de bloques del WiFly RN-XV

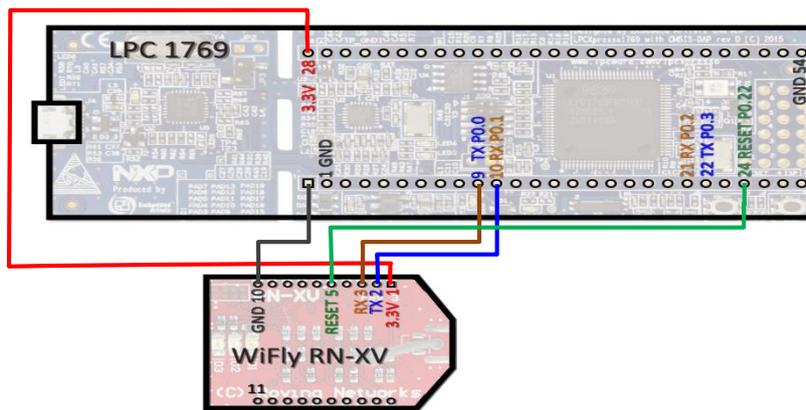


Figura 21 Conexionado LPC + WiFly

4.2. Modulo conversor USB- TTL CP2102

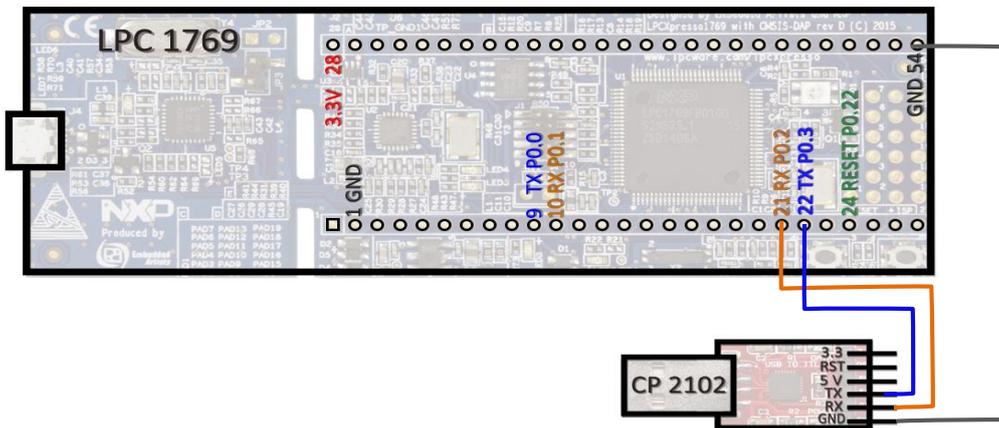


Figura 22. Conexionado LPC+ CP 2102.

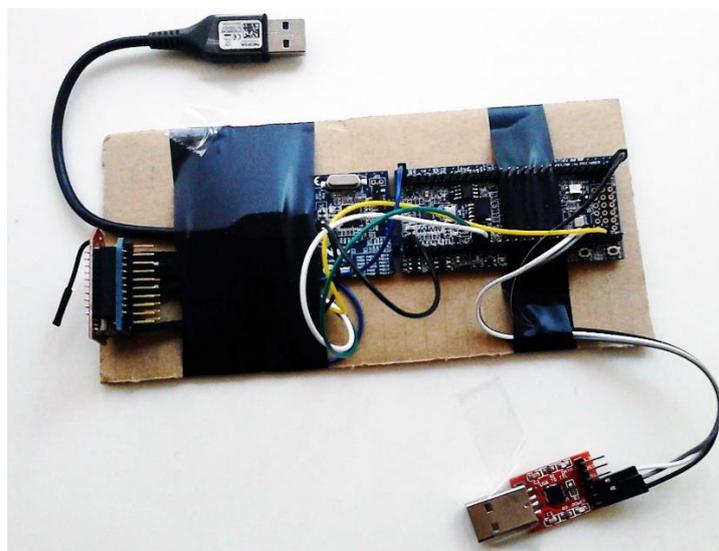


Figura 23. Sistema embebido para ayuda de la práctica.

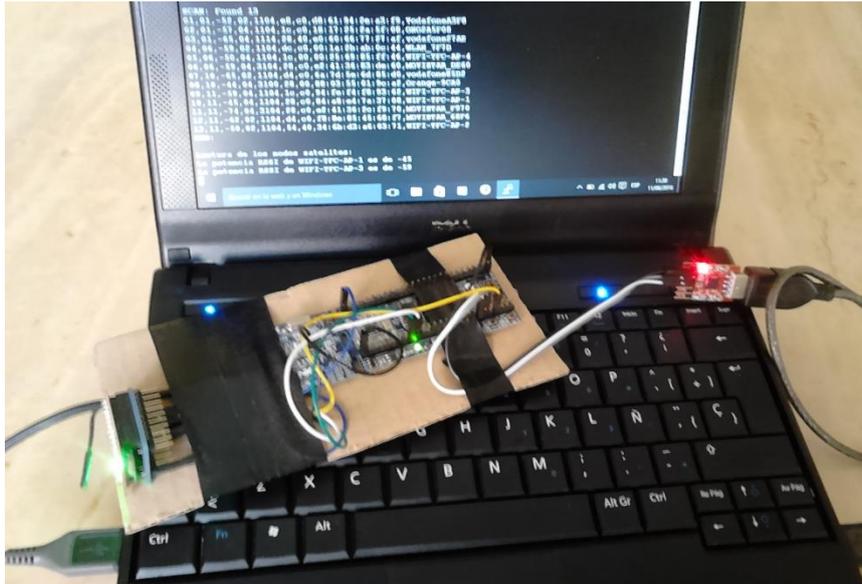


Figura 24: Verificación de funcionamiento del sistema.

4.3. Preparación del entorno

El primer paso del proyecto es crear la infraestructura de los *nodos satélites*. Se han distribuido los router y se han conformado tal y como se explicó en los capítulos anteriores. Se han configurado como AP's de la red principal con los SSID identificados claramente por las siglas WIFI-TFC-AP-x, siendo la x el valor de 1 a 4 que corresponden a los *nodos satélites* 1, 2, 3 y 4 tal y como se dispone el diseño expuesto en el apartado 3.2.

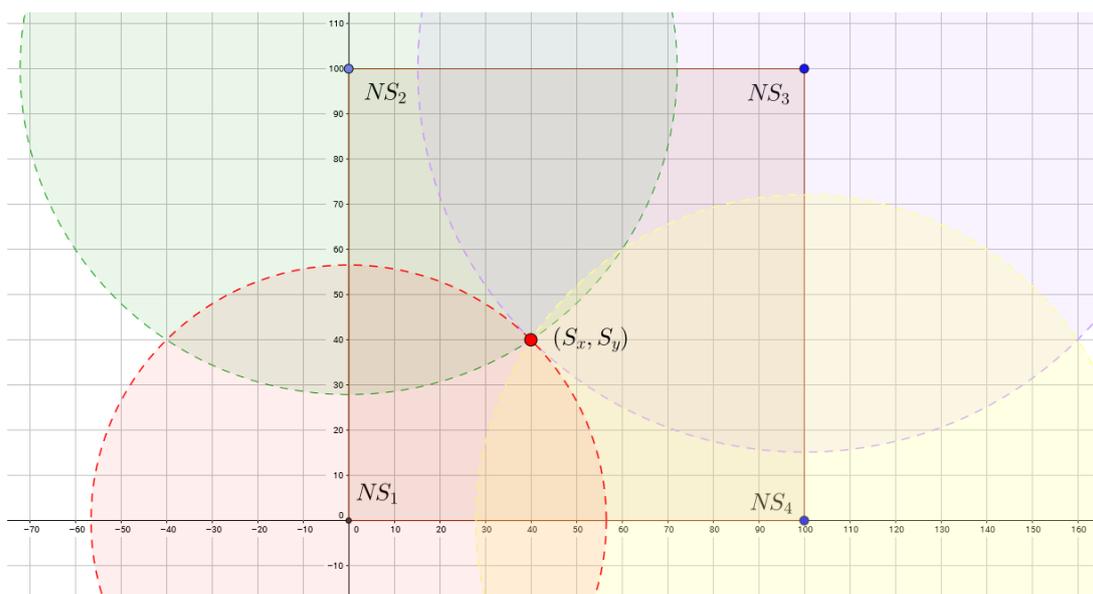
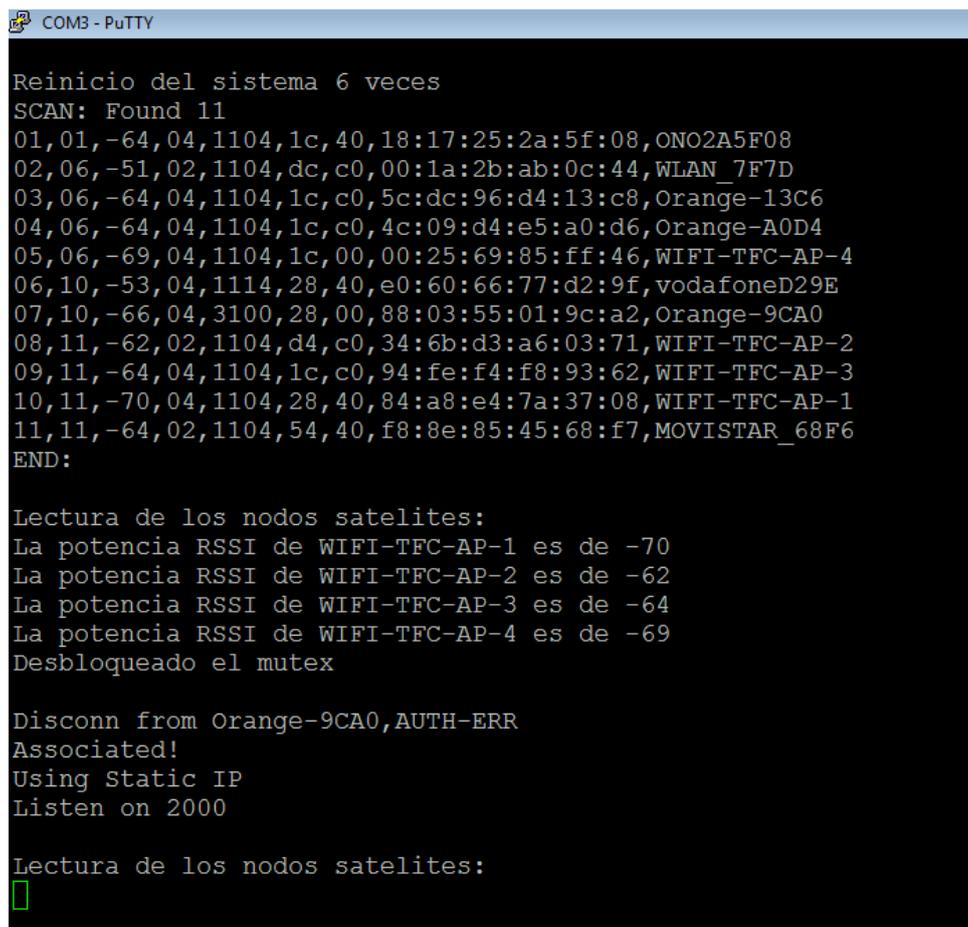


Figura 25. Sala con los *nodos satélites* (NS_x) y el *nodo cliente* S. (simulación).

El segundo paso en este proceso ha sido crear el *nodo cliente*. Para ello hemos ensamblado tal y como aparecen en los esquemas de conexiones de las figuras anteriores, la placa embebida y los módulos RN-171 y el CP2102. Se ha conectado el módulo WiFly con la placa LPC1769, facilitada por la universidad y que podría igualmente haber sido otra distinta, como por ejemplo, una placa arduino. A su vez, conectamos el conversor USB-TTL CP2102 con la LPC1769 para poder visualizar los *nodos satelites*, identificarlos y conocer la potencia RSSI a la que están emitiendo en funcion de la distancia a que se encuentran respecto del *nodo cliente*. El proceso de conexionado, librerias, drivers, etc., es interesante pero no viene al caso comentarlo, pues, este proyecto se sirve de este sistema embebido para poder llevar a cabo la elaboración de este proyecto teorico sobre localización en interiores vía WiFi, por lo tanto, el sistema embebido es el medio, no es el fin de este proyecto.

Una vez instalado el sistema y comprobado que podemos conectarnos por consola a través del terminal PuTTY empezamos las pruebas para identificar los *nodos satélites*.



```
COMB - PuTTY
Reinicio del sistema 6 veces
SCAN: Found 11
01,01,-64,04,1104,1c,40,18:17:25:2a:5f:08,ONO2A5F08
02,06,-51,02,1104,dc,c0,00:1a:2b:ab:0c:44,WLAN_7F7D
03,06,-64,04,1104,1c,c0,5c:dc:96:d4:13:c8,Orange-13C6
04,06,-64,04,1104,1c,c0,4c:09:d4:e5:a0:d6,Orange-A0D4
05,06,-69,04,1104,1c,00,00:25:69:85:ff:46,WIFI-TFC-AP-4
06,10,-53,04,1114,28,40,e0:60:66:77:d2:9f,vodafoneD29E
07,10,-66,04,3100,28,00,88:03:55:01:9c:a2,Orange-9CA0
08,11,-62,02,1104,d4,c0,34:6b:d3:a6:03:71,WIFI-TFC-AP-2
09,11,-64,04,1104,1c,c0,94:fe:f4:f8:93:62,WIFI-TFC-AP-3
10,11,-70,04,1104,28,40,84:a8:e4:7a:37:08,WIFI-TFC-AP-1
11,11,-64,02,1104,54,40,f8:8e:85:45:68:f7,MOVISTAR_68F6
END:

Lectura de los nodos satelites:
La potencia RSSI de WIFI-TFC-AP-1 es de -70
La potencia RSSI de WIFI-TFC-AP-2 es de -62
La potencia RSSI de WIFI-TFC-AP-3 es de -64
La potencia RSSI de WIFI-TFC-AP-4 es de -69
Desbloqueado el mutex

Disconn from Orange-9CA0,AUTH-ERR
Associated!
Using Static IP
Listen on 2000

Lectura de los nodos satelites:
█
```

Figura 26. Escaneado de la red por el *nodo cliente* a través del terminal PuTTY.

Una vez que hemos comprobado que el *nodo cliente* recibe la señal de la red y la detección de los *odos satélites* con la potencia a la que emiten, se pasa a colocar al *nodo cliente* dentro de la sala a estudiar, en una posición determinada y hacer una nueva lectura.

Una vez tenemos la posición marcada y la lectura de la potencia de los *odos satélites*, y antes de proceder a hacer los cálculos, vamos a pasar a la explicación del modelo teórico desarrollado para la localización del *nodo cliente* respecto de los *odos satelites* en la sala, donde los *odos satélites* se ha colocado formando un rectangulo de ángulos rectos (90°), donde el *nodo satélite* WIFI-TFC-AP1 se ha colocado en la posición (0, 0) de una rejilla virtual de medidas 10 x10 hasta el *nodo satélite* WIFI-TFC-AP3 que estará en la posición (100, 100) en sentido contrario a las agujas del reloj.

4.4. Caso particular de triangulación

Para el proyecto que hemos desarrollando vamos a utilizar un sistema de localización que es una variación al tradicional sistema de triangulación usado por los sistemas de posicionamiento global o GPS y tampoco es exactamente el llamado trilateración de otros sistemas más complejos. Dadas las características de nuestro diseño y la colocación de los *odos satélites* en ángulos rectos se simplificarán muchos de los cálculos de estos sistemas para facilitar el tiempo de procesado y de memoria necesario para no utilizar en exceso la capacidad de la placa LPC1769.

Lo primero de todo hacemos una transformación de variables para poder trabajar matemáticamente. Para simplificar el desarrollo, a los *odos satélites* WIFI-TFC-AP-1, WIFI-TFC-AP-2, WIFI-TFC-AP-3 Y WIFI-TFC-AP-4 los consideramos en este apartado como A, B, C y D.

Suponemos los *odos satélites* en forma de rectángulo y el satélite A en la posición (0,0). Sean, pues:

$A=(a_x, a_y)$	$X_{AD} = (x_{AD}, 0)$ vector horizontal
$B=(b_x, b_y)$	$X_{BC} = (x_{BC}, 0)$ vector horizontal
$C=(c_x, c_y)$	$X_{AB} = (0, x_{AB})$ vector vertical
$D=(d_x, d_y)$	$X_{DC} = (0, x_{DC})$ vector vertical

Las componentes de los vectores posición de los vértices coinciden con las coordenadas de los vértices.

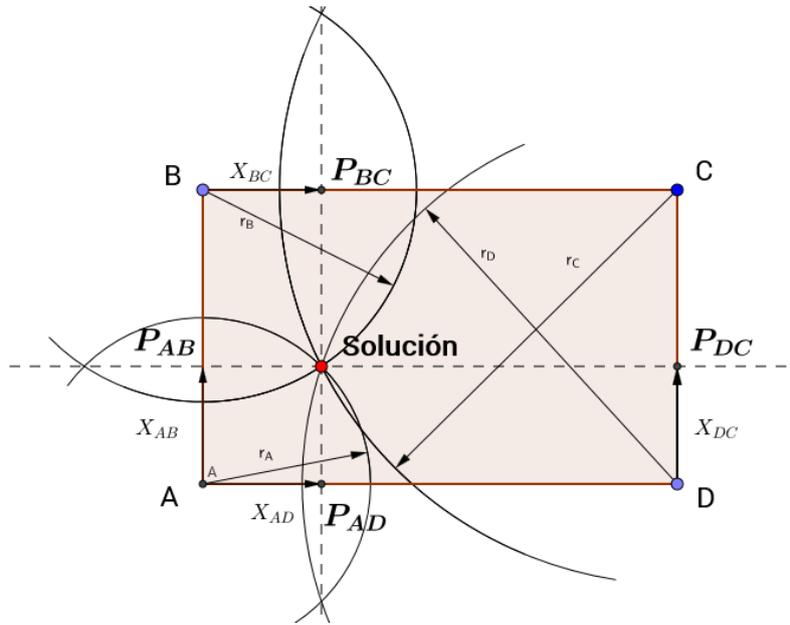


Figura 27: Cliente en la intersección de las circunferencias cuyos centros son los satélites.

Tratamos de encontrar las coordenadas de los puntos: P_{AB} , P_{DC} , P_{AD} y P_{AC} .

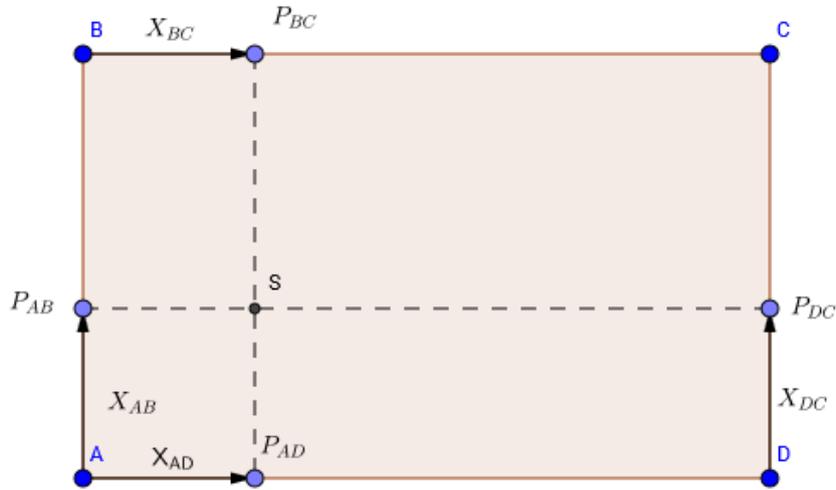


Figura 28: Punto S intersección de las secantes de las circunferencias.

$$P_{AD} = A + X_{AD} = (a_x + x_{AD}, a_y)$$

$$P_{AB} = A + X_{AB} = (a_x, a_y + x_{AB})$$

$$P_{BC} = B + X_{BC} = (b_x + x_{BC}, b_y)$$

$$P_{DC} = D + X_{DC} = (d_x, d_y + x_{DC})$$

Estos puntos los obtendremos como las distancias medias de los cruces de dos circunferencias.

Cómo calcular la distancia media entre dos circunferencias

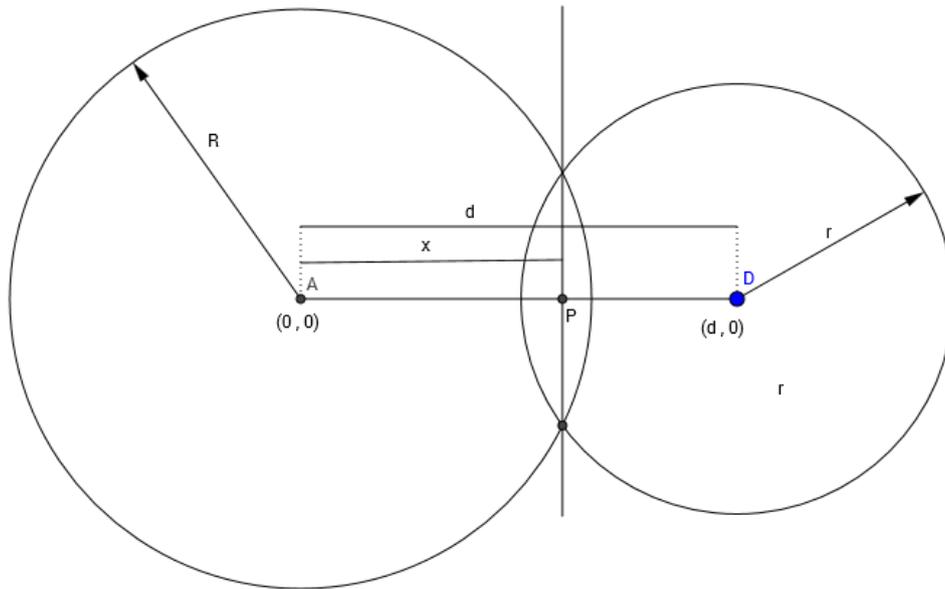


Figura 29: Distancia media entre circunferencias secantes.

$$\left. \begin{array}{l} (x-d)^2 + y^2 = r^2 \\ x^2 + y^2 = R^2 \end{array} \right\} \rightarrow (x-d)^2 - x^2 = r^2 - R^2$$

$$x^2 - 2dx + d^2 - x^2 = r^2 - R^2 \rightarrow -2dx + d^2 = r^2 - R^2$$

$$x = \frac{d^2 - r^2 + R^2}{2d}$$

Aplicamos las fórmulas a nuestro caso:

$$x_{AD} = \frac{d_x^2 - r_D^2 + r_A^2}{2d_x}$$

$$x_{AB} = \frac{b_y^2 - r_B^2 + r_A^2}{2b_y}$$

$$x_{BC} = \frac{d_x^2 - r_C^2 + r_B^2}{2d_x}$$

$$x_{DC} = \frac{b_y^2 - r_C^2 + r_D^2}{2b_y}$$

Por tanto obtenemos

$$P_{AD} = A + X_{AD} = \left(a_x + \frac{d_x^2 - r_D^2 + r_A^2}{2d_x}, a_y \right)$$

$$P_{AB} = A + X_{AB} = \left(a_x, a_y + \frac{b_y^2 - r_B^2 + r_A^2}{2b_y} \right)$$

$$P_{BC} = B + X_{BC} = \left(b_x + \frac{d_x^2 - r_B^2 + r_A^2}{2d_x}, b_y \right)$$

$$P_{DC} = D + X_{DC} = \left(d_x, d_y + \frac{b_y^2 - r_C^2 + r_D^2}{2b_y} \right)$$

Teniendo en cuenta que $\overline{AB} = \overline{DC} = b_y$ y que $\overline{AD} = \overline{BC} = d_x$ al estar dispuestos los satélites en los vértices de un rectángulo y A (0, 0).

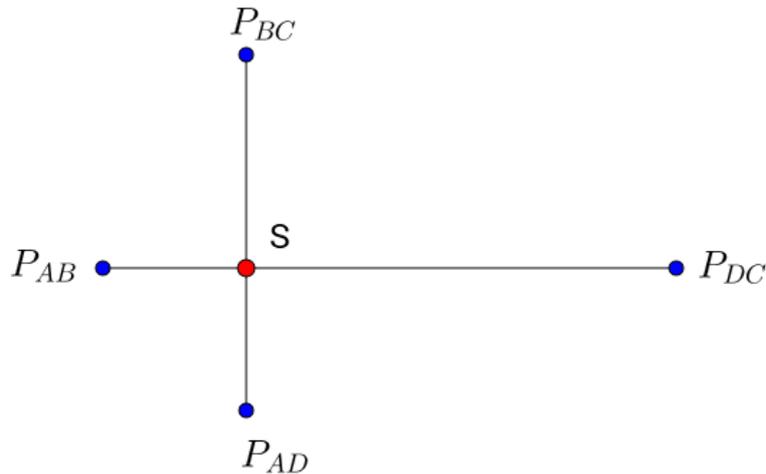


Figura 30: Situación ideal.

Tenemos, entonces cuatro puntos.

Si las medidas fueran perfectas tendríamos que

$$P_{AB_y} = P_{DC_y}$$

$$P_{AD_x} = P_{BC_x}$$

Pero seguramente tendremos algún desfase, así que cogemos la media para minimizarlo:

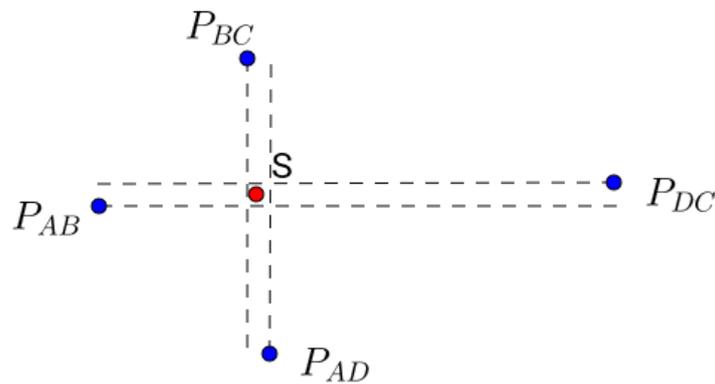


Figura 31: Desfase en el cálculo de S.

$$s_x = \frac{P_{ADx} + P_{BCx}}{2}$$

$$s_y = \frac{P_{ABy} + P_{DCy}}{2}$$

Estas, serán las coordenadas del punto que daremos.

Así pues debemos encontrar el radio de cada una de las circunferencias para poder hacer el cálculo de la posición. El radio lo calcularemos a partir de las potencias recibidas por los satélites:

$$Radio = RSSI * factor$$

Este factor de conversión saldrá de tomar varias medidas de la potencia de cada *nodo satélite* cada cierta distancia fijada de antemano y haciendo la media aritmética de las medidas tomadas así como del factor de conversión para tener uno por cada *nodo satélite* ya que son distintos.

Este factor, para cada *nodo satélite*, junto con la RSSI de recepción de los mismos, nos permitirá calcular el radio de cada una de las circunferencias y, como se ha explicado anteriormente, poder dar las coordenadas de nuestro punto S (solución) que no es más ni menos que la posición del *nodo cliente*.

4.5. Experimentación

Para comprobar el funcionamiento del método de forma empírica, vamos a realizar unas mediciones reales, sobre el terreno y comprobar si hay error en la localización.

Primero se estimará la distancia entre *nodos satélites*, que ocupan posiciones conocidas, y del *nodo cliente* que irá recogiendo las diferentes medidas de potencia. Se utilizará el algoritmo desarrollado que debería llevarnos a la solución del problema, la localización del *nodo cliente*.

Las leyes de propagación establecen una relación entre la distancia recorrida por la señal y los parámetros de las antenas transmisoras y receptoras. Como se ha comentado anteriormente la señal en un espacio cerrado puede ser absorbida, reflejada o dispersada por obstáculos y esto hace modificar dicha relación. Esta relación se ha simplificado tomando muestras cada metro de las potencias emitidas por cada uno de los *nodos satélites* y hallando la media aritmética para conseguir el factor de conversión entre potencia y distancia.

Como disponemos de dos modelos de satélites hemos tomado medidas de cada uno de ellos a distintas distancias. Nos han salido valores distintos para una misma distancia, por lo que hemos cogido cinco medidas en cada distancia, hemos hallado la media y ésta es la medida que hemos considerado.

Para cada medida hemos hallado su factor de conversión y posteriormente hemos hecho la media, asignando ese valor al factor de conversión para cada uno de los *nodos satélites*.

Se muestran los resultados en la tabla 2:

SAGEM			HUAWEI		
Distancia (m)	Medida (dB)	Factor (m/dB)	Distancia (m)	Medida (dB)	Factor (m/dB)
1	-37	-0,02702703	1	-42	-0,02380952
2	-42	-0,04761905	2	-42	-0,04761905
3	-43	-0,06976744	3	-44	-0,06818182
4	-44	-0,09090909	4	-46	-0,08695652
5	-38	-0,13157895	5	-50	-0,1
6	-44	-0,13636364	6	-52	-0,11538462
7	-47	-0,14893617	7	-48	-0,14583333
8	-55	-0,14545455	8	-50	-0,16
9	-61	-0,14754098	9	-52	-0,17307692
10	-57	-0,1754386	10	-53	-0,18867925

factor =	-0,11206355 m/dB	factor =	-0,1109541 m/dB
----------	------------------	----------	-----------------

Tabla 2: Tabla factor de conversión de los nodos satélites obtenidos experimentalmente.

A continuación se han tomado mediciones de los *nodos satélites* a lo largo de varios días y en horas distintas y se ha comprobado que existen variaciones en la potencia de emisión durante el proceso de recogida de datos. Se han hecho varias mediciones (entre 4 y 5) por cada posición fijada dentro de la rejilla 10 x 10 a lo largo de varias sesiones (mañana, tarde y noche) en días distintos y habiéndose encontrado con medidas dentro de la misma posición en la misma sesión y en el mismo día, de varios dBm de diferencia por lo que se ha optado por hacer una media aritmética de los datos para poder seguir avanzando en la solución del problema.



Figura 32: Creación de la rejilla 10 x 10.



Figura 33: Recogida de datos para muestreo.

Hemos visto que la potencia es muy cambiante y más aún cuando se ve afectada por obstáculos. Las pruebas que se han realizado demuestran que la señal RSS varía también dependiendo de altura. Hemos probado a recoger datos encima de una mesa y en el suelo y se han encontrado un margen de diferencia de entre 4 y 5 dBm, probablemente como consecuencia de posibles reflexiones de la señal, por lo que hemos optado por hacer todas las medidas a una misma altura, a ras del suelo, para intentar disminuir alguno de los valores diferenciadores de la lectura del

RSSI. Así mismo los *nodos satélites* se han colocado a la misma altura con un mismo tipo de soporte, un taburete. Hay que tener presente en todo momento que las características del entorno influirán en las medidas adquiridas y afectando a los resultados de las posiciones del *nodo cliente*.

Se mostrarán a continuación los resultados del cálculo de la posición, mediante una distribución de puntos de acceso determinada y utilizando los algoritmos anteriormente diseñados. El objetivo es determinar experimentalmente la exactitud obtenida en el posicionamiento en el entorno de trabajo. Se establecen las condiciones iniciales para el cálculo de la posición como son: la creación de la rejilla de metro en metro y el número de iteraciones en las lecturas que será de 4 (representativas de unas 40 muestras de cada *nodo satélite*).

PUNTO	NS1	NS2	NS3	NS4
A (4,1)	-52	-68	-61	-42
B (4,2)	-63	-61	-58	-54
C (4,3)	-56	-69	-55	-51
D (4,4)	-70	-56	-44	-53
E (4,5)	-71	-55	-37	-65
F (3,5)	-73	-53	-42	-59
G (3,0)	-57	-72	-67	-45
H (4,0)	-42	-67	-63	-39

Tabla 3: Media aritmética de las medidas detectadas en cada uno de los puntos.

	X	Y	X	Y
REAL	4	1	4	2
OBTENIDO	3,56658452	0,08933831	3,29022021	2,37134951
DIFERENCIA	0,43341548	0,91066169	0,70977979	0,37134951
	X	Y	X	Y
REAL	4	3	4	4
OBTENIDO	3,82829154	1,23351183	4,46704213	4,1339879
DIFERENCIA	0,17170846	1,76648817	0,46704213	0,1339879
	X	Y	X	Y
REAL	4	5	3	5
OBTENIDO	3,95241109	5,53424644	4,21587129	5,12928719
DIFERENCIA	0,04758891	0,53424644	1,21587129	0,12928719
	X	Y	X	Y
REAL	3	0	4	0
OBTENIDO	3,60063549	-0,23824616	2,9017388	0,71447666
DIFERENCIA	0,60063549	0,23824616	1,0982612	0,71447666

Tabla 4: Errores cometidos en los puntos de referencia.

En esta tabla se han mostrado las diferentes posiciones del *nodo cliente* con sus coordenadas reales y la posición calculada proporcionada por el método desarrollado. El error se muestra por coordenadas.

Se van a tomar diez lecturas del *nodo cliente* en dos posiciones aleatorias y se va a desarrollar todo el proceso para calcular su posición según la técnica desarrollada para después medir la localización real y compararlas:

NODO CLIENTE POSICIÓN I					NODO CLIENTE POSICIÓN J			
Num. muestra	NS1	NS2	NS3	NS4	NS1	NS2	NS3	NS4
1	-40	-56	-71	-58	-54	-62	-57	-62
2	-41	-57	-70	-57	-54	-62	-58	-64
3	-42	-58	-67	-58	-55	-62	-58	-64
4	-41	-57	-70	-58	-54	-62	-58	-65
5	-42	-56	-69	-58	-54	-62	-58	-56
6	-41	-57	-70	-57	-55	-62	-58	-64
7	-41	-58	-72	-57	-55	-66	-58	-65
8	-42	-58	-71	-57	-55	-68	-58	-64
9	-42	-56	-69	-57	-56	-67	-58	-64
10	-42	-58	-70	-57	-55	-67	-58	-65
Media	-41	-57	-70	-57	-55	-64	-58	-63

Tabla 5: Muestras de las dos posiciones aleatorias con sus medias.

POSICIÓN I	X	Y	POSICIÓN J	X	Y
OBTENIDO	0,41776066	0,49814967	OBTENIDO	2,27878631	2,22064274
REAL	0,55	1,20	REAL	1,65	2,83
DIFERENCIA	0,13223934	0,70185033	DIFERENCIA	0,62878631	0,60935726

Tabla 6: Errores cometidos en el cálculo de las dos posiciones.

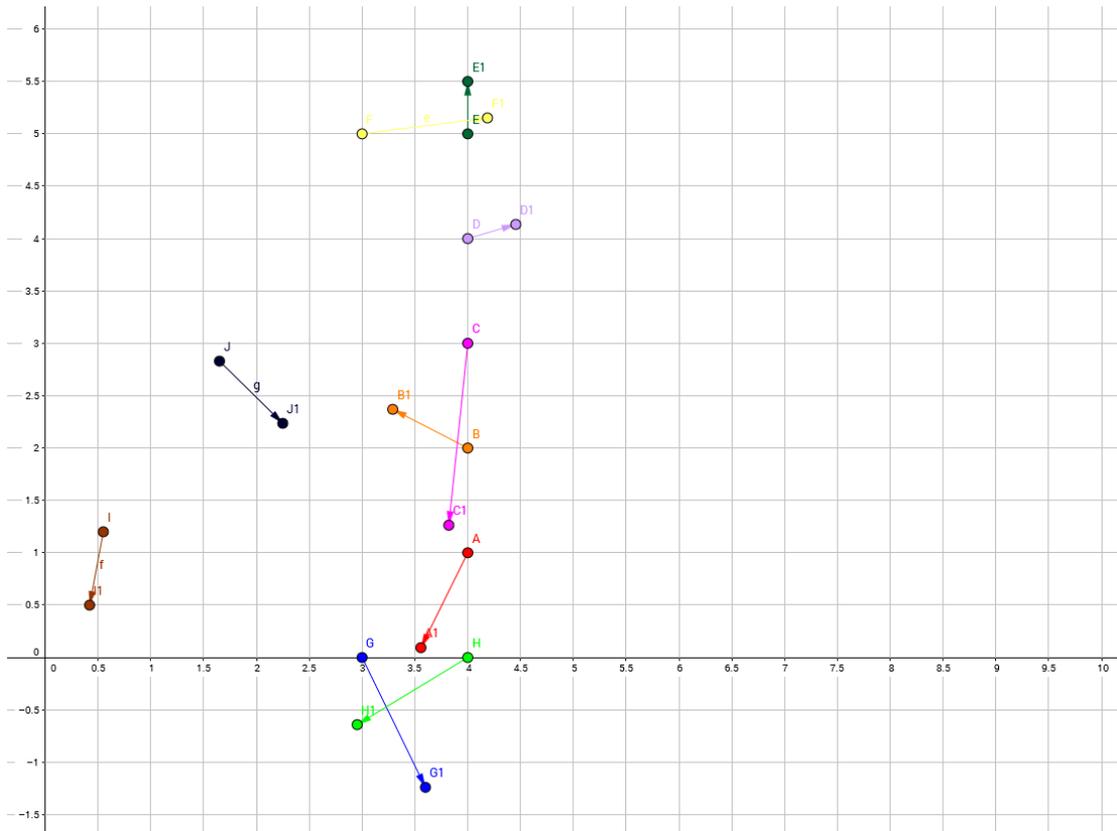


Figura 34: Representación gráfica de los resultados.

5. Viabilidad técnica

Desde hace un tiempo la localización en interiores viene siendo objeto de estudios e investigaciones. Hasta ahora no se ha conseguido obtener resultados tan satisfactorios como los obtenidos por los sistemas GPS. Las razones de esta diferencia son tanto técnicas (la implementación es más complicada), como económicas porque se requieren un gran número de puntos de acceso, sensores, terminales, etcétera.

Para el estudio de viabilidad se ha contado con una preparación previa en el entorno de trabajo. También se ha contado con las tecnologías actuales sobre localización estándar en RF, que se desarrolló anteriormente en la memoria, y que han decidido el uso de tecnología WiFi por el coste real del material, pues prácticamente junto al material enviado por la universidad no se ha tenido que comprar nada más; puesto que los nodos satélites se han conseguido mediante el reciclado de material en desuso.

En este estudio de viabilidad se ha utilizado para la recepción de información de la red la placa LPC1769 con el módulo RN-XV WiFi y el convertor de USB a TTL CP2102, en conjunto y por separado, haciendo las pruebas de comunicación correspondientes. Se podría haber hecho con el equipo informático directamente, pero al ofrecer desde la universidad este sistema embebido ha facilitado la portabilidad del *nodo cliente* mejor que no teniendo que trasladar el equipo informático estacionario por la sala.

En general, y viendo los resultados favorables del proyecto con la desviación mínima de error fácilmente asumible, y por otro lado comprobando que hay empresas en el mercado con productos similares en cuanto a la forma de operar, y por supuesto, con mejores equipamientos en software y hardware debemos concluir que el proyecto es viable técnicamente.

6. Valoración económica

Se mostrará a continuación una valoración aproximada del desarrollo del proyecto teniendo en cuenta que es un proyecto académico por lo que la inversión en tiempo para la investigación del desarrollo no puede compararse con un proyecto semejante hecho por una empresa del sector.

La lista de materiales utilizados se presenta en la tabla 3:

Producto	Unidades	Precio /unidad	Importe
LPCXpresso 1769	1	30	30
Wifly RN- 171	1	25	25
Adaptador Xbee a DIP	1	5	5
CP2102	1	5	5
Cable USB mini	1	3	3
Routers / nodos	4	0	0
Horas desarrollo proyecto	297	15	4.455
Instalación, puesta en marcha (horas)	10	25	250
Coste Total			4.773

Tabla 7: Tabla aproximativa del coste económico del TFC

7. Conclusiones

7.1. Conclusiones.

A la vista del resultado se puede decir que se han conseguido los objetivos parciales marcados, porque se ha adquirido una experiencia considerable en el entorno del desarrollo de los sistemas de localización mediante WiFi, y se ha desarrollado una variación del algoritmo de triangulación para nodos satélites conocidos y colocados en ángulos rectos unos respecto de otros.

En cuanto a los resultados de las pruebas de campo hay que concluir que el algoritmo utilizado en este proyecto y que utiliza como parámetro principal de medida la RSS, se ha comprobado que el comportamiento de esta señal sufre bastante variaciones (difracción, reflexión y dispersión) y ésto ha afectado en gran medida al cálculo de posición del *nodo cliente*. Tal y como se ha podido comprobar claramente en los resultados obtenidos de la posición en el interior de la sala destinada al este estudio con errores de menos de 1 metro de media. Para zonas amplias como una planta de edificio podría considerarse como aceptable, pero para una habitación de 5 metros cuadrados un error de 1 metro no sería aceptable.

Los resultados obtenidos empíricamente muestran que la técnica utilizada, triangulación no es muy útil para aplicaciones que se encuentren en interiores. Se han obtenido resultados no muy precisos, posiblemente por la pequeña base de datos empleada (posiciones conocidas de los AP's), pero sí viable para algunas aplicaciones que no requieran de equipamiento costoso ni de infraestructuras de propósito específico.

Se ha observado que la distribución de los puntos de acceso ha influido en gran medida en el resultado del posicionamiento. Finalmente, se ha podido diseñar un sistema de posicionamiento económico que posiblemente obtiene mejores resultados en exteriores porque es fuera donde menos obstáculos encontramos y la reflexión y refracción es mínima.

7.2. Autoevaluación

El redactor de esta memoria se encuentra satisfecho del trabajo realizado, y piensa que el trabajo tiene una calidad aceptable, a pesar de las carencias que presenta. Cree que se ha enriquecido mucho en un tema que había estado mucho tiempo en el punto de mira de su interés y que, a pesar de que no piensa dedicarse profesionalmente, sabe que va a convertirse en una de sus aficiones más importantes.

De destacar una parte de este proyecto, sería el uso de un protocolo de comunicaciones muy extendido y la posibilidad de Integración en cualquier sistema embebido del mercado puesto que como se ha mencionado en el proyecto, el método no se ha desarrollado para ningún sistema determinado.

En cuanto a las carencias de este proyecto, una posible solución para mejorar los resultados en el posicionamiento en el interior del edificio, es utilizar el método de fingerprinting. Al realizar previamente un mapeo de la superficie, se obtiene una base de datos mucho más elevada que en el caso de este proyecto, por este motivo el resultado en la posición será más preciso aunque el tiempo de procesado para la solución sea más elevado debido al aumento de información.

Otra de las ventajas del fingerprinting es que no se ve tan afectado por la variación de los efectos de la señal RSS que el método de triangulación. Es por ello que tanto el fingerprinting por el método de búsqueda del vecino más cercano como por el método estadístico serían aconsejables para mejorar el sistema de posicionamiento en interiores.

7.3. Líneas de trabajo futuro

Las líneas de trabajo futuras y que han quedado pendientes podrían englobarse en un proyecto más amplio que quedaría marcado por el diseño más completo de un sistema capaz de gestionar la localización de una persona dentro de un edificio, haciendo uso de los medios que ya se encuentren instalados como la red WiFi del edificio, evitando así realizar grandes inversiones en el montaje de una nueva infraestructura para la red inalámbrica.

8. Glosario

A

AoA – Angle of Arrival. Método para determinar la dirección de propagación de una onda de radiofrecuencia en una red de antenas

AP – Access Points. Dispositivo de red que interconecta equipos de comunicación inalámbricos para formar una red de dispositivos móviles o tarjetas de red inalámbricas

API – Application Programming Interface

B

BSS – Base Station Subsystem

BSSID – Basic Service Set Identifier. Nombre de identificación único de todos los paquetes de una red inalámbrica (Wi-Fi).

D

DToA – Differential Time of Arrival. Diferencia en tiempos de llegada

DSP – Digital Signal Processor. Procesador digital de señal

E

ESS – Extended Service Set

ESSID – Extended Service Set Identifier

E/S – Sistema de comunicación Entrada/Salida entre la CPU y el exterior

F

FreeRTOS – Sistema operativo libre en tiempo real. Encargado de la planificación de la CPU, así como de la sincronización multitarea.

G

GPS – Global Position System

I

I2C – Bus de comunicaciones en serie.

IEEE – Institute Engineers Electronic and Electrical

ILS – Indoor Location System

IP, Dirección IP – Etiqueta numérica que identifica, de manera lógica y jerárquica, a un interfaz de un dispositivo dentro de una red que utilice el protocolo IP del modelo TCP/IP

L

LAN – Local Area Networks. Red de área local

LPC1769 – Micro-controlador Cortex-M3 para uso de aplicaciones en dispositivos empotrados.
De coste y consumo de energía bajos

LPS – Local Position System

M

MMU – Memory management unit

O

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing

P

PuTTY – Programa para realizar comunicaciones por consola

RTSP – Protocolo multimedia de flujo en tiempo real

RS-232 – Protocolo de comunicaciones por puerto serie

R

RF – Radio Frequency

RFID – Radio Frequency Identification

RSS – Received Signal Strength

RSSI – Received Signal Strength Indicator. Escala de referencia para medir la potencia de las señales recibidas por un dispositivo en redes WIFI

RTof – Round Trip Time of Flight

RTOS – Real Time Operating System. Sistema operativo en tiempo real

S

SSID – Service Set Identifier

T

TDMA – Time Division Multiplexing Access

ToA – Time of Arrival. Tiempo de llegada

U

UART – Universal Asynchronous Receiver/Transmitter. Dispositivo que controla los puertos y dispositivos serie

USB – Universal Serial Bus

W

WEP – Wired Equivalent Privacy

WIFI – Tecnología de transmisión de redes de área local sin cables.

WIFLY RN-171-XV – Módulo receptor/emisor que permite la conexión a redes Wireless compatibles con 802.11b/g.

WLAN – Wireless Local Area Network

WMAN – Wireless Metropolitan Area Network

WPAN – Wireless Personal Area Network

WIRELESS, WDS – Wireless Distribution System. Sistema de Distribución Inalámbrico que permite la interconexión sin cable, de puntos de acceso en una red IEEE 802.11

9. Bibliografía y recursos Web

9.1. Bibliografía

- [1] Apple, «About iBeacon on your iPhone, iPad, and iPod touch,» 2016. [En línea]. Available: <https://support.apple.com/en-gb/HT202880>. [Último acceso: 06 2016].
- [2] Google, «Mark up the world using beacons,» 2016. [En línea]. Available: <https://developers.google.com/beacons/>. [Último acceso: 05 2016].
- [3] Consejería de Fomento. Junta de Castilla y León., «Sistemas de localización e información geográfica,» ORSI, 2009.
- [4] J. S. a. J. K. M. Hazas, «Location-Aware computing comes of age,» *Computer*, nº 37, 2004.
- [5] Wikipedia, «Wikipedia,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Tiempo_de_llegada. [Último acceso: 4 2016].
- [6] Andrés Felipe García, Cristina Gómez, Tibusay Sánchez, Alfredo David Redondo, Leonardo Betancur, Roberto Carlos Hincapié, «Universidad surcolombiana. Revista Ingeniería y Región,» 2015. [En línea]. Available: <http://journalusco.edu.co/index.php/IngenieriaYRegion/article/view/872/1872>. [Último acceso: 05 2016].

- [7] Wikipedia, «Wikipedia,» 2016. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Tiempo_de_llegada. [Último acceso: 4 2016].
- [8] A. Bensky, *Wireless positioning: Technologies and applications*, Boston: Artech House, 2008.
- [9] Wikipedia, «Wikipedia,» 01 2016. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Triangulaci%C3%B3n>. [Último acceso: 6 2016].
- [10] W. R. infrarroja, «Wikipedia.,» 2016. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_infrarroja. [Último acceso: 5 2016].
- [11] G. D. & A. Kak, «Vision for Mobile Robot Navigation,» de *Vision for Mobile Robot Navigation: A Survey, IEEE Trans.on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, pp. 237- 267.
- [12] S. F. Arcones, «Posicionamiento 2D5 en interiores mediante comunicaciones inalámbricas RF,» Trabajo Fin de Grado, Universidad de Alcalá, 2012.
- [13] Wikipedia, «Radiofrecuencia,» 2016. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Radiofrecuencia>. [Último acceso: 6 2016].
- [14] A. B. Martínez, «Sistema de localización inalámbrica en entornos de interior mediante el uso del retardo temporal y el nivel de potencia de las señales de radiofrecuencia,» Tesis doctoral, 2009.
- [15] UOC, «Sistemas Empotrados».
- [16] Euroresidentes, «<https://www.euroresidentes.com/>,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.euroresidentes.com/tecnologia/avances-tecnologicos/redes-de-sensores-sin-cable-2>. [Último acceso: 5 04 2016].
- [17] R. Barry, *Using the FreeRTOS Real Time Kernel - ARM Cortex- M3 Edition*, Real Times Ingeniers, 2010.

- [18] R. Barry, The FreeRTOS Reference Manual. API functions and configuration Options, Real Time Engineers Ltd., 2015.
- [19] Laia Descamps-Vila, A. Pérez-Navarro, Jordi Conesa, «Jornadas SIG Libre,» SIGTE, Universitat de Girona , 2016. [En línea]. Available: http://www.sigte.udg.edu/jornadassiglibre2013/uploads/articulos_13/a29.pdf. [Último acceso: 10 03 2016].
- [20] S. Laboratories, «Spark fun Electronics,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets/IC/cp2102.pdf>. [Último acceso: 03 2016].
- [21] C. Tracer, «www. OpenExpo.es,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.openexpo.es/noticias/hardware-libre-blog/custodium-tracker-localizacion-y-seguimiento-gps-libre-y-accesible>. [Último acceso: 6 2016].
- [22] HereCast, «HighEarthOrbit,» 05 2005. [En línea]. Available: <http://highearthorbit.com/200/>. [Último acceso: 06 2016].
- [23] E. W. Weisstein, «Wolfram MathWorld,» 2016. [En línea]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/Circle-CircleIntersection.html>. [Último acceso: 05 2016].
- [24] C. M. Uhart, «monografias.com,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos93/estudio-sistemas-y-tecnicas-posicionamiento-interiores-traduccion/estudio-sistemas-y-tecnicas-posicionamiento-interiores-traduccion.shtml>. [Último acceso: 5 2016].
- [25] NXP, «NXP.com,» 2016. [En línea]. Available: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10360.pdf. [Último acceso: 3 2016].

9.2. Recursos Web

Todas las visitas se han producido entre Febrero y Junio del 2016.

LPC1769 NXP

http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10360.pdf

https://www.embeddedartists.com/products/lpcxpresso/lpc1769_cmsis_xpr.php

IniciCortexM3

<http://cv.uoc.edu/app/mediawiki14/wiki/IniciCortexM3>

NXP

<http://www.nxp.com/>

<http://www.nxp.com/products/software-and-tools/software-development-tools/software-and-tools-for-lpc-mcus:LPC-SW-TOOLS>

LPCXpresso

<https://www.lpcware.com/lpcxpresso/download>

Roving Networks

<http://www.mouser.es/microchip/>

Módulo WiFly

<https://www.sparkfun.com/products/10822>

http://www.rovingnetworks.com/resources/download/93/wifly_user_manual

<https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Wireless/WiFi/WiFly-RN-XV-DS.pdf>

FreeRTOS

<http://www.freertos.org/>

The FreeRTOS Reference Manual.

http://shop.freertos.org/FreeRTOS_API_and_Configuration_Reference_s/1822.htm

http://shop.freertos.org/FreeRTOS_Tutorial_Book_Generic_Cortex_M3_Edition_p/pdf_cortex-m3_tutorial_book.htm

Consultas Wikis

<http://cv.uoc.edu/app/mediawiki14/wiki/IniciCortexM3>

<https://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Portada>

https://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

Todos los graficos se han hecho con Geogebra

<https://www.geogebra.org/m/h7Vq2G4g>

Apéndice A

GNU Free Documentation License

Version 1.3, 3 November 2008

Copyright © 2000, 2001, 2002, 2007, 2008 Free Software Foundation, Inc. <<http://fsf.org/>>

Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies of this license document, but changing it is not allowed.

0. PREAMBLE

The purpose of this License is to make a manual, textbook, or other functional and useful document "free" in the sense of freedom: to assure everyone the effective freedom to copy and redistribute it, with or without modifying it, either commercially or noncommercially. Secondly, this License preserves for the author and publisher a way to get credit for their work, while not being considered responsible for modifications made by others.

This License is a kind of "copyleft", which means that derivative works of the document must themselves be free in the same sense. It complements the GNU General Public License, which is a copyleft license designed for free software.

We have designed this License in order to use it for manuals for free software, because free software needs free documentation: a free program should come with manuals providing the same freedoms that the software does. But this License is not limited to software manuals; it can be used for any textual work, regardless of subject matter or whether it is published as a printed book. We recommend this License principally for works whose purpose is instruction or reference.

1. APPLICABILITY AND DEFINITIONS

This License applies to any manual or other work, in any medium, that contains a notice placed by the copyright holder saying it can be distributed under the terms of this License. Such a notice

grants a world-wide, royalty-free license, unlimited in duration, to use that work under the conditions stated herein. The "Document", below, refers to any such manual or work. Any member of the public is a licensee, and is addressed as "you". You accept the license if you copy, modify or distribute the work in a way requiring permission under copyright law.

A "Modified Version" of the Document means any work containing the Document or a portion of it, either copied verbatim, or with modifications and/or translated into another language.

A "Secondary Section" is a named appendix or a front-matter section of the Document that deals exclusively with the relationship of the publishers or authors of the Document to the Document's overall subject (or to related matters) and contains nothing that could fall directly within that overall subject. (Thus, if the Document is in part a textbook of mathematics, a Secondary Section may not explain any mathematics.) The relationship could be a matter of historical connection with the subject or with related matters, or of legal, commercial, philosophical, ethical or political position regarding them.

The "Invariant Sections" are certain Secondary Sections whose titles are designated, as being those of Invariant Sections, in the notice that says that the Document is released under this License. If a section does not fit the above definition of Secondary then it is not allowed to be designated as Invariant. The Document may contain zero Invariant Sections. If the Document does not identify any Invariant Sections then there are none.

The "Cover Texts" are certain short passages of text that are listed, as Front-Cover Texts or Back-Cover Texts, in the notice that says that the Document is released under this License. A Front-Cover Text may be at most 5 words, and a Back-Cover Text may be at most 25 words.

A "Transparent" copy of the Document means a machine-readable copy, represented in a format whose specification is available to the general public, that is suitable for revising the document straightforwardly with generic text editors or (for images composed of pixels) generic paint programs or (for drawings) some widely available drawing editor, and that is suitable for input to text formatters or for automatic translation to a variety of formats suitable for input to text formatters. A copy made in an otherwise Transparent file format whose markup, or absence of markup, has been arranged to thwart or discourage subsequent modification by readers is not Transparent. An image format is not Transparent if used for any substantial amount of text. A copy that is not "Transparent" is called "Opaque".

Examples of suitable formats for Transparent copies include plain ASCII without markup, Texinfo input format, LaTeX input format, SGML or XML using a publicly available DTD, and standard-conforming simple HTML, PostScript or PDF designed for human modification. Examples of transparent image formats include PNG, XCF and JPG. Opaque formats include proprietary formats that can be read and edited only by proprietary word processors, SGML or XML for which the DTD and/or processing tools are not generally available, and the machine-generated HTML, PostScript or PDF produced by some word processors for output purposes only.

The "Title Page" means, for a printed book, the title page itself, plus such following pages as are needed to hold, legibly, the material this License requires to appear in the title page. For works in formats which do not have any title page as such, "Title Page" means the text near the most prominent appearance of the work's title, preceding the beginning of the body of the text.

The "publisher" means any person or entity that distributes copies of the Document to the public.

A section "Entitled XYZ" means a named subunit of the Document whose title either is precisely XYZ or contains XYZ in parentheses following text that translates XYZ in another language. (Here XYZ stands for a specific section name mentioned below, such as "Acknowledgements", "Dedications", "Endorsements", or "History".) To "Preserve the Title" of such a section when you modify the Document means that it remains a section "Entitled XYZ" according to this definition.

The Document may include Warranty Disclaimers next to the notice which states that this License applies to the Document. These Warranty Disclaimers are considered to be included by reference in this License, but only as regards disclaiming warranties: any other implication that these Warranty Disclaimers may have is void and has no effect on the meaning of this License.

2. VERBATIM COPYING

You may copy and distribute the Document in any medium, either commercially or noncommercially, provided that this License, the copyright notices, and the license notice saying this License applies to the Document are reproduced in all copies, and that you add no other conditions whatsoever to those of this License. You may not use technical measures to obstruct or control the reading or further copying of the copies you make or distribute. However, you may accept compensation in exchange for copies. If you distribute a large enough number of copies you must also follow the conditions in section 3.

You may also lend copies, under the same conditions stated above, and you may publicly display copies.

3. COPYING IN QUANTITY

If you publish printed copies (or copies in media that commonly have printed covers) of the Document, numbering more than 100, and the Document's license notice requires Cover Texts, you must enclose the copies in covers that carry, clearly and legibly, all these Cover Texts: Front-Cover Texts on the front cover, and Back-Cover Texts on the back cover. Both covers must also clearly and legibly identify you as the publisher of these copies. The front cover must present the full title with all words of the title equally prominent and visible. You may add other material on the covers in addition. Copying with changes limited to the covers, as long as they preserve the title of the Document and satisfy these conditions, can be treated as verbatim copying in other respects.

If the required texts for either cover are too voluminous to fit legibly, you should put the first ones listed (as many as fit reasonably) on the actual cover, and continue the rest onto adjacent pages.

If you publish or distribute Opaque copies of the Document numbering more than 100, you must either include a machine-readable Transparent copy along with each Opaque copy, or state in or with each Opaque copy a computer-network location from which the general network-using public has access to download using public-standard network protocols a complete Transparent copy of the Document, free of added material. If you use the latter option, you must take reasonably prudent steps, when you begin distribution of Opaque copies in quantity, to ensure that this Transparent copy will remain thus accessible at the stated location until at least one year after the last time you distribute an Opaque copy (directly or through your agents or retailers) of that edition to the public.

It is requested, but not required, that you contact the authors of the Document well before redistributing any large number of copies, to give them a chance to provide you with an updated version of the Document.

4. MODIFICATIONS

You may copy and distribute a Modified Version of the Document under the conditions of sections 2 and 3 above, provided that you release the Modified Version under precisely this License, with the Modified Version filling the role of the Document, thus licensing distribution and modification of the Modified Version to whoever possesses a copy of it. In addition, you must do these things in the Modified Version:

A. Use in the Title Page (and on the covers, if any) a title distinct from that of the Document, and from those of previous versions (which should, if there were any, be listed in the History section of the Document). You may use the same title as a previous version if the original publisher of that version gives permission.

B. List on the Title Page, as authors, one or more persons or entities responsible for authorship of the modifications in the Modified Version, together with at least five of the principal authors of the Document (all of its principal authors, if it has fewer than five), unless they release you from this requirement.

C. State on the Title page the name of the publisher of the Modified Version, as the publisher.

D. Preserve all the copyright notices of the Document.

E. Add an appropriate copyright notice for your modifications adjacent to the other copyright notices.

F. Include, immediately after the copyright notices, a license notice giving the public permission to use the Modified Version under the terms of this License, in the form shown in the Addendum below.

G. Preserve in that license notice the full lists of Invariant Sections and required Cover Texts given in the Document's license notice.

H. Include an unaltered copy of this License.

I. Preserve the section Entitled "History", Preserve its Title, and add to it an item stating at least the title, year, new authors, and publisher of the Modified Version as given on the Title Page. If there is no section Entitled "History" in the Document, create one stating the title, year, authors, and publisher of the Document as given on its Title Page, then add an item describing the Modified Version as stated in the previous sentence.

J. Preserve the network location, if any, given in the Document for public access to a transparent copy of the Document, and likewise the network locations given in the Document for previous versions it was based on. These may be placed in the "History" section. You may omit a network location for a work that was published at least four years before the Document itself, or if the original publisher of the version it refers to gives permission.

K. For any section Entitled "Acknowledgements" or "Dedications", Preserve the Title of the section, and preserve in the section all the substance and tone of each of the contributor acknowledgements and/or dedications given therein.

L. Preserve all the Invariant Sections of the Document, unaltered in their text and in their titles. Section numbers or the equivalent are not considered part of the section titles.

M. Delete any section Entitled "Endorsements". Such a section may not be included in the Modified Version.

N. Do not retitle any existing section to be Entitled "Endorsements" or to conflict in title with any Invariant Section.

O. Preserve any Warranty Disclaimers.

If the Modified Version includes new front-matter sections or appendices that qualify as Secondary Sections and contain no material copied from the Document, you may at your option designate some or all of these sections as invariant. To do this, add their titles to the list of Invariant Sections in the Modified Version's license notice. These titles must be distinct from any other section titles.

You may add a section Entitled "Endorsements", provided it contains nothing but endorsements of your Modified Version by various parties—for example, statements of peer review or that the text has been approved by an organization as the authoritative definition of a standard.

You may add a passage of up to five words as a Front-Cover Text, and a passage of up to 25 words as a Back-Cover Text, to the end of the list of Cover Texts in the Modified Version. Only one passage of Front-Cover Text and one of Back-Cover Text may be added by (or through arrangements made by) any one entity. If the Document already includes a cover text for the same cover, previously added by you or by arrangement made by the same entity you are acting on behalf of, you may not add another; but you may replace the old one, on explicit permission from the previous publisher that added the old one.

The author(s) and publisher(s) of the Document do not by this License give permission to use their names for publicity for or to assert or imply endorsement of any Modified Version.

5. COMBINING DOCUMENTS

You may combine the Document with other documents released under this License, under the terms defined in section 4 above for modified versions, provided that you include in the combination all of the Invariant Sections of all of the original documents, unmodified, and list them all as Invariant Sections of your combined work in its license notice, and that you preserve all their Warranty Disclaimers.

The combined work need only contain one copy of this License, and multiple identical Invariant Sections may be replaced with a single copy. If there are multiple Invariant Sections with the same name but different contents, make the title of each such section unique by adding at the end of it, in parentheses, the name of the original author or publisher of that section if known, or else a unique number. Make the same adjustment to the section titles in the list of Invariant Sections in the license notice of the combined work.

In the combination, you must combine any sections Entitled "History" in the various original documents, forming one section Entitled "History"; likewise combine any sections Entitled "Acknowledgements", and any sections Entitled "Dedications". You must delete all sections Entitled "Endorsements".

6. COLLECTIONS OF DOCUMENTS

You may make a collection consisting of the Document and other documents released under this License, and replace the individual copies of this License in the various documents with a single copy that is included in the collection, provided that you follow the rules of this License for verbatim copying of each of the documents in all other respects.

You may extract a single document from such a collection, and distribute it individually under this License, provided you insert a copy of this License into the extracted document, and follow this License in all other respects regarding verbatim copying of that document.

7. AGGREGATION WITH INDEPENDENT WORKS

A compilation of the Document or its derivatives with other separate and independent documents or works, in or on a volume of a storage or distribution medium, is called an "aggregate" if the copyright resulting from the compilation is not used to limit the legal rights of the compilation's users beyond what the individual works permit. When the Document is included in an aggregate, this License does not apply to the other works in the aggregate which are not themselves derivative works of the Document.

If the Cover Text requirement of section 3 is applicable to these copies of the Document, then if the Document is less than one half of the entire aggregate, the Document's Cover Texts may be

placed on covers that bracket the Document within the aggregate, or the electronic equivalent of covers if the Document is in electronic form. Otherwise they must appear on printed covers that bracket the whole aggregate.

8. TRANSLATION

Translation is considered a kind of modification, so you may distribute translations of the Document under the terms of section 4. Replacing Invariant Sections with translations requires special permission from their copyright holders, but you may include translations of some or all Invariant Sections in addition to the original versions of these Invariant Sections. You may include a translation of this License, and all the license notices in the Document, and any Warranty Disclaimers, provided that you also include the original English version of this License and the original versions of those notices and disclaimers. In case of a disagreement between the translation and the original version of this License or a notice or disclaimer, the original version will prevail.

If a section in the Document is Entitled "Acknowledgements", "Dedications", or "History", the requirement (section 4) to preserve its Title (section 1) will typically require changing the actual title.

9. TERMINATION

You may not copy, modify, sublicense, or distribute the Document except as expressly provided under this License. Any attempt otherwise to copy, modify, sublicense, or distribute it is void, and will automatically terminate your rights under this License.

However, if you cease all violation of this License, then your license from a particular copyright holder is reinstated (a) provisionally, unless and until the copyright holder explicitly and finally terminates your license, and (b) permanently, if the copyright holder fails to notify you of the violation by some reasonable means prior to 60 days after the cessation.

Moreover, your license from a particular copyright holder is reinstated permanently if the copyright holder notifies you of the violation by some reasonable means, this is the first time you have received notice of violation of this License (for any work) from that copyright holder, and you cure the violation prior to 30 days after your receipt of the notice.

Termination of your rights under this section does not terminate the licenses of parties who have received copies or rights from you under this License. If your rights have been terminated and not permanently reinstated, receipt of a copy of some or all of the same material does not give you any rights to use it.

10. FUTURE REVISIONS OF THIS LICENSE

The Free Software Foundation may publish new, revised versions of the GNU Free Documentation License from time to time. Such new versions will be similar in spirit to the present

version, but may differ in detail to address new problems or concerns. See <http://www.gnu.org/copyleft/>.

Each version of the License is given a distinguishing version number. If the Document specifies that a particular numbered version of this License "or any later version" applies to it, you have the option of following the terms and conditions either of that specified version or of any later version that has been published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document does not specify a version number of this License, you may choose any version ever published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document specifies that a proxy can decide which future versions of this License can be used, that proxy's public statement of acceptance of a version permanently authorizes you to choose that version for the Document.

11. RELICENSING

"Massive Multiauthor Collaboration Site" (or "MMC Site") means any World Wide Web server that publishes copyrightable works and also provides prominent facilities for anybody to edit those works. A public wiki that anybody can edit is an example of such a server. A "Massive Multiauthor Collaboration" (or "MMC") contained in the site means any set of copyrightable works thus published on the MMC site.

"CC-BY-SA" means the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 license published by Creative Commons Corporation, a not-for-profit corporation with a principal place of business in San Francisco, California, as well as future copyleft versions of that license published by that same organization.

"Incorporate" means to publish or republish a Document, in whole or in part, as part of another Document.

An MMC is "eligible for relicensing" if it is licensed under this License, and if all works that were first published under this License somewhere other than this MMC, and subsequently incorporated in whole or in part into the MMC, (1) had no cover texts or invariant sections, and (2) were thus incorporated prior to November 1, 2008.

The operator of an MMC Site may republish an MMC contained in the site under CC-BY-SA on the same site at any time before August 1, 2009, provided the MMC is eligible for relicensing.

ADDENDUM: How to use this License for your documents

To use this License in a document you have written, include a copy of the License in the document and put the following copyright and license notices just after the title page:

```
Copyright (C) YEAR YOUR NAME.  
Permission is granted to copy, distribute  
and/or modify this document under the terms of  
the GNU Free Documentation License, Version 1.3
```

or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.

A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".

If you have Invariant Sections, Front-Cover Texts and Back-Cover Texts, replace the "with ... Texts." line with this:

with the Invariant Sections being LIST THEIR TITLES, with the Front-Cover Texts being LIST, and with the Back-Cover Texts being LIST.

If you have Invariant Sections without Cover Texts, or some other combination of the three, merge those two alternatives to suit the situation.

If your document contains nontrivial examples of program code, we recommend releasing these examples in parallel under your choice of free software license, such as the GNU General Public License, to permit their use in free software.