



Sistema de localización mediante tecnología RFID

Sergio Díaz Molinera

Master en Ingeniería de Telecomunicación UOC –URL

Raúl Parada Medina

18/01/2016



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

Licencias alternativas (elegir alguna de las siguientes y sustituir la de la página anterior)

A) Creative Commons:



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](#)



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual [3.0 España de Creative Commons](#)



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial [3.0 España de Creative Commons](#)



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](#)



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-CompartirIgual [3.0 España de Creative Commons](#)



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento [3.0 España de Creative Commons](#)

B) GNU Free Documentation License (GNU FDL)

Copyright © AÑO TU-NOMBRE.

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".

C) Copyright

© (el autor/a)

Reservados todos los derechos. Está prohibido la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la impresión, la reprografía, el microfilme, el tratamiento informático o cualquier otro sistema, así como la distribución de ejemplares mediante alquiler y préstamo, sin la autorización escrita del autor o de los límites que autorice la Ley de Propiedad Intelectual.

FICHA DEL TRABAJO FINAL

Título del trabajo:	Sistema de localización mediante tecnología RFID
Nombre del autor:	Sergio Díaz Molinera
Nombre del consultor:	Raúl Parada Medina
Fecha de entrega (mm/aaaa):	MM/AAAA
Área del Trabajo Final:	Sistemas de comunicación
Titulación:	Master en Ingeniería de Telecomunicación UOC –URL
Resumen del Trabajo (máximo 250 palabras):	
<p>Este trabajo pretende definir y simular un sistema de localización de objetos, que contengan etiquetas electrónicas RFID UHF.</p> <p>Los sistemas RFID se basan en etiquetas capaces de almacenar y recuperar datos mediante tecnología inalámbrica. La información que almacenan estas etiquetas se transmite, generalmente bajo demanda, vía inalámbrica a uno o varios receptores.</p> <p>Dentro de los sistemas RFID hay diferentes variantes. Una de ellas es el tipo RFID UHF Gen2, basado en etiquetas pasivas que se caracterizan por trabajar en la banda de 860 a 960 MHz.</p> <p>El uso más común de las etiquetas RFID UHF Gen2, dado que las etiquetas poseen un identificador único de 96 bits, es el poder identificar objetos, gestionar inventarios o evitar falsificaciones.</p> <p>Estas etiquetas son capaces de capturar datos de bajo nivel, como la potencia de la señal recibida o la fase de dicha señal. Aprovechando esta funcionalidad, en este trabajo se implementará un sistema que permita localizar la posición de las etiquetas RFID en base a estos dos parámetros concretos: potencia y fase de la señal recibida.</p> <p>El trabajo constará del diseño de un escenario de pruebas con una serie de etiquetas distribuidas aleatoriamente, y dos antenas emisoras. Se desarrollará en lenguaje R las funciones necesarias para estimar la posición de las etiquetas a partir de datos de RSSI y fase obtenidos previamente.</p> <p>Se analizarán los datos recogidos, la fiabilidad de los métodos de posicionamiento implementados, así como cuál de estos métodos parece ser más fiable.</p>	

Abstract (in English, 250 words or less):

This work attempts to define and simulate an object location system, using RFID UHF tags.

RFID systems are based on tags that can store and retrieve data using wireless technology. This information stored in these tags is transmitted, usually on demand and wirelessly to one or more receivers.

In RFID systems, there are different types. One of these types is RFID UHF Gen2, based in passive tags that work in 860-960 MHz band.

Because the labels have a unique identifier of 96 bits, the most common use of Gen2 UHF RFID tags is identify objects, manage inventories or prevent forgeries.

These tags can capture low level data, as signal power or signal phase. Using this functionality, in this work a it will be developed a system that allows to locate the position of RFID tags based on these two specific parameters: received signal power and received signal phase.

The work consists in a design of a test scenario with a number of randomly distributed tags, and two antennas. It will be developed in R language all functions necessary to estimate the position of tags, using data of RSSI and phase previously obtained.

It will be analyzed collected data, the reliability of the implemented positioning methods and what method is more reliable.

Palabras clave (entre 4 y 8):

RFID, etiquetas, distancia, posicionamiento, potencia, fase, triangulación, búsqueda.

Índice

1. Introducción.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Enfoque y método seguido.....	3
1.4 Planificación del Trabajo	4
1.5 Breve resumen de productos obtenidos	5
1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria.....	5
2. Estado del Arte.....	7
2.1 Principios del RFID.....	7
2.2 El estándar Electronic Product Code Class 1 Generation	8
2.3 Características RFID utilizables para la localización	10
2.4 Algunos antecedentes	13
3. Memoria	17
3.1 Definición del entorno de test	17
3.2 Localización mediante RSSI.....	18
3.2.1 Estrategias para cálculo de posición en base a la RSSI	28
3.2.2 Proceso de calibrado del modelo de cálculo por RSSI	29
3.2.3 Proceso de cálculo de distancia a partir del nivel de RSSI	32
3.2.4 Proceso de cálculo de mediana de la distancia de cada etiqueta.....	34
3.2.5 Estimación de posición mediante triángulos	37
3.2.6 Cálculo de la mediana de los valores RSSI por etiqueta y antena.....	41
3.2.7 Cálculo de matriz de estimación de RSSI por posición.....	43
3.2.8 Función para acotar la dimensión de la cuadrícula donde buscar	46
3.2.9 Encontrar posición en cuadrícula por RSSI estimada.....	48
3.3 Localización mediante fase	51
3.3.1 Proceso de cálculo de distancia a partir de la fase	52
3.3.2 Reutilización de las funciones de distancia media y triángulo.....	53
3.4 Análisis de resultados.....	54
3.3.1 Estimación de distancia a las antenas	54
3.3.2 Estimación de posición de las etiquetas	57
4. Conclusiones.....	59
5. Glosario	61
6. Bibliografía	62

Lista de figuras

Figura 1: Diagrama de Gantt del proyecto	5
Figura 2: Diagrama de radiación de la antena RFID.....	17
Figura 3: Entorno de trabajo de donde se han obtenido las medidas de test	18
Figura 4: Esquema del entorno de test	18
Figura 5: Gráfica de evolución de la RSSI respecto a la distancia, tomando $n = 2$	20
Figura 6: Descripción del diagrama de cajas	21
Figura 7: Esquema de colocación de las etiquetas y la antena #1	22
Figura 8: Diagrama de caja y mediana para frecuencia 866,061 MHz según distribución de Figura 7	22
Figura 9: Diagrama de caja y mediana para frecuencia 867,341 MHz según distribución de Figura 7	23
Figura 10: Esquema de colocación de las etiquetas y la antena #2.....	23
Figura 11: Diagrama de caja y mediana para frecuencia 865,549 MHz según distribución de Figura 10	24
Figura 12: Diagrama de caja y mediana para frecuencia 866,829 MHz según distribución de Figura 10	24
Figura 13: RSSI teórica antena #1 y puntos de valor RSSI vs distancia de etiquetas (tabla 1) .	25
Figura 14: RSSI teórica antena #2 y puntos de valor RSSI vs distancia de etiquetas (tabla 1) .	26
Figura 15: RSSI teórica antena #1 utilizando coeficiente $n = 3.5$ y puntos de valor RSSI vs distancia de etiquetas (tabla 1)	26
Figura 17: Triángulo para estimación de posición	28
Figura 18: Esquema de relaciones de las funciones para cálculo de posición mediante valores de RSSI. Muestra su orden y dependencias.....	29
Figura 19: Algoritmo del proceso de calibrado.....	30
Figura 20: Variables para calibrado	30
Figura 21: Constantes para calibrado	30
Figura 22: Cálculo de la longitud de onda de la muestra.....	30
Figura 23: Cálculo de los coeficientes n dependiendo del ID de antena.....	31
Figura 24: Cálculo de los coeficientes n de cada antena	31
Figura 25: Ejecución de calibrado	31
Figura 26: Algoritmo de la función de cálculo de distancias	32
Figura 27: Encabezado de la función para cálculo de distancias	32
Figura 28: Fórmula de cálculo de la distancia.....	33
Figura 29: Almaceamiento de distancia por muestra.....	33
Figura 30: Lista resultado del cálculo de distancias.....	33
Figura 31: Captura parcial de los resultados de ejecutar la función de cálculo de distancias ...	34
Figura 32: Algoritmo cálculo de mediana de distancias.....	35
Figura 33: Cabecera calculo mediana distancias	35
Figura 34: Cálculo de las medianas por etiqueta	35
Figura 35: Búsqueda de etiquetas que no tengan distancia calculada	36
Figura 36: Las etiquetas sin distancia calculada se les pone distancia 0	36
Figura 37: Listado de etiquetas y mediana de la distancia de cada una, clasificadas por antena	37
Figura 38: Esquema del algoritmo para calcular posición utilizando trigonometría de triángulos	38
Figura 39: Cabecera función calculo de posición por ángulos	38
Figura 40: Esquema de triángulo entre antenas y etiqueta	38
Figura 41: Cálculo de los cosenos de los ángulos.....	39
Figura 42	39
Figura 43: Cálculo de las coordenadas en base a ángulos	40

Figura 44: Ejecución de prueba la función de triangulación	40
Figura 45: Distancia ejemplo.....	41
Figura 46: Esquema del algoritmo para cálculo de las medianas de valores RSSI	41
Figura 47: Cabecera de la función para calculo de medianas RSSI	42
Figura48: Filtrado por etiqueta y luego por antena	42
Figura 49: Cálculo de la mediana RSSI.....	42
Figura 50: Ejecución función calculo mediana RSSI	43
Figura 51: Esquema del algoritmo del cálculo de la cuadrícula.....	44
Figura 52: Cabecera de la función de calculo de cuadrícula	44
Figura 53:Cálculo de las posiciones del punto.....	44
Figura 54:Cálculo de la RSSI estimada	45
Figura 55:Corrección de RSSI en 4 dB.....	45
Figura 56: Cuadrícula calculada a modo de ejemplo.....	45
Figura 57: Esquema algoritmo función para acortar cuadrícula	46
Figura 58: Cabecera de la función para acotar la parte de cuadrícula donde buscar	46
Figura 59: Representación de los límites de búsqueda	47
Figura 60: Representación de los límites de búsqueda con diferencias de distancias > 4cm ...	47
Figura 61: Representación de los límites de búsqueda cuando sólo se tiene distancia a una antena.....	48
Figura 62: Ejecución de la función para acotar la cuadrícula	48
Figura 63: Esquema del algoritmo para buscar la celda con una RSSI más aproximada.....	49
Figura 64: Cabecera de la función de búsqueda de posición en la cuadrícula	49
Figura 65: Se comprueba que la celda está en los límites de acotación.....	49
Figura 66: Se comprueba que la nueva diferencia de RSSI sea menor que la guardada y entonces se sustituye.....	50
Figura 67: Repetición del proceso sin utilizar los límites de acotación.....	50
Figura 68: Resultado de la función búsqueda en la cuadrícula	50
Figura 69: Dos periodods de onda RFID	51
Figura 70: Esquema de relaciones de las funciones para cálculo de posición mediante valres de fase. Muestra su orden y dependencias.	51
Figura 71: Algoritmo de la función de cálculo de distancias por medio de la fase	52
Figura 72: Encabezado de la función para cálculo de distancias por medio de la fase	52
Figura 73: Fórmula de cálculo de la distancia utilizando la fase.....	53
Figura 74: Los valores de fase inferiores a 15° se transforman a 180°	53
Figura 75: Cálculo de posición a partir de datos de fase.....	54

1. Introducción

1.1 Motivación

La radiocomunicación fue definida de forma teórica entre los años 1886 y 1888 por los físicos James Clerk Maxwell y Heinrich Rudolf Hertz. Se cree que fue el científico Nicola Tesla el primer inventor de un sistema radio, aunque no fue él quien lo llevó a la práctica, sino que fue el ingeniero Guillermo Marconi, quien en el año 1901 realizó la primera transmisión radioeléctrica transatlántica utilizando, eso sí, los diseños del propio Nicola Tesla. Desde entonces hasta ahora, muchos han sido los usos de las radiocomunicaciones. Cabe destacar los siguientes:

- Radiodifusión: distribución de contenidos a través del espectro radioeléctrico.
- Radio ayuda: distribución de señales radioeléctricas para guiar naves (barcos, aviones, etc.).
- Redes inalámbricas: comunicación de nodos informáticos o de telecomunicaciones a través de ondas electro magnéticas, sin necesidad de utilizar redes cableadas entre ellos.
- Telefonía móvil: sistema de telefonía sin hilos que permite a los usuarios realizar llamadas, videollamadas o conexiones de datos sin necesidad de realizarlo desde una ubicación determinada.
- Sistemas de geolocalización: sistemas que permiten la localización de una persona u objeto en cualquier punto del planeta, utilizando para ello sistemas satelitales y/o estaciones radio terrestres.

Como se puede ver, el uso de los sistemas de radiocomunicaciones ha sido muy amplio desde que se comenzaron a utilizar hasta nuestros días. Sin embargo, también se puede observar que todos estos sistemas nombrados anteriormente son sistemas orientados al ámbito de la media y larga distancia.

Con la evolución de Internet y de los sistemas de comunicación, surge la posibilidad, y con ello la necesidad, de conectar cualquier dispositivo de ámbito cotidiano. Cualquier dispositivo doméstico se puede conectar: electrodomésticos, sistemas de climatización, etc., haciendo así la vida más cómoda a las personas. Pero no sólo el ámbito doméstico se ve beneficiado por esta nueva tendencia, sino que el mundo empresarial también tiende a adoptar este tipo de soluciones, con la diferencia de que no busca tanto el confort sino la eficiencia o la optimización. Es aquí donde aparece la necesidad o la oportunidad que trata de cubrir este trabajo. La tecnología RFID es una de estas nuevas tecnologías en la evolución del Internet de las cosas siendo su uso eminentemente empresarial. Su principal uso actualmente es identificar objetos a distancia sin contacto y sin hilos, es decir mediante el uso de radiofrecuencia: unas etiquetas provistas radiantes son capaces de recibir y responder a peticiones de radiofrecuencia de un interrogador RFID y, como cada etiqueta tiene un código único de 96 bits, se podrá identificar de forma única el objeto que la contiene. Pero en este trabajo no se pretende utilizar principalmente esta capacidad, sino que tratará de aprovechar que estos dispositivos también guardan datos de bajo

nivel, como la potencia de la señal recibida por las etiquetas o la fase de dicha señal, para a partir de estos diseñar o trasladar un sistema de geolocalización a un entorno cerrado y de corta distancia. Este sistema puede aportar interesantes beneficios orientados a las ya nombradas eficiencia y optimización. Así por ejemplo, este sistema podría permitir conocer la ubicación en tiempo real de todas las unidades del stock de un determinado producto en un almacén.

La ubicación y localización de los stock de productos es un problema relevante en el almacenamiento ya que suele provocar por ejemplo descuadre de stocks, especialmente cuando es un stock de larga duración, cuando se hacen recolocaciones de almacén o cuando se colocan de modo equivocado determinadas unidades. Del mismo modo, en grandes superficies de comercio, suele ser un problema en determinadas ocasiones el encontrar productos con muy bajo stock, debido, principalmente a que los restos que quedan en el stock han sido descolocados por los clientes. Por último, siguiendo esta misma línea, se podría citar otro problema al que el sistema que tiene como objeto este trabajo podría ayudar a solucionar. Se trata de facilitar la colocación de productos: en base a este sistema se puede conocer de forma rápida la colocación de todas las unidades de un determinado producto, de tal manera que los recolocadores de los estantes pueden colocar de forma rápida los productos al no tener que ir buscándolos uno a uno. En definitiva, este sistema trata de facilitar labores que hasta el momento se realizan manualmente, como son el control de inventario o la búsqueda de unidades descolocadas de un determinado elemento, de tal manera que se hagan de manera más eficiente, menos laboriosa y más exacta.

Como se viene describiendo, el sistema que se diseña en este trabajo permitirá evolucionar el control de stocks de productos, al poder ubicar cada una de las unidades de manera muy exacta y en tiempo real, evitando descuadres, pérdidas, facilitando recolocaciones de almacén y permitiendo una rápida colocación de unidades descolocadas. Como se ha dicho en varias ocasiones la importancia radica en una mejora de la eficiencia y optimización de los recursos.

El problema de la localización mediante etiquetas RFID no es un problema nuevo. Es un tema sobre el que se ha investigado ampliamente y no únicamente con el fin de determinar la posición de objetos sino incluso para localizar personas. Principalmente, el método utilizado para la localización ha sido, históricamente, mediante medida de la potencia RSSI recibida por las etiquetas. Para realizar este cálculo, se necesitan al menos dos antenas emitiendo en diferente localización. El motivo de ello es que, idealmente, se puede trazar una circunferencia con un determinado nivel de potencia recibida. Al emitir por dos antenas, también idealmente, la posición vendrá determinada por la intersección de las circunferencias de potencia de ambas antenas. El principal problema de este método puede ser que la potencia emitida por una antena llegue al receptor atenuada y/o modificada, al encontrarse con objetos del entorno (paredes, mobiliario, personas), que pueden absorber o modificar la trayectoria de toda o parte de la señal, de modo que la potencia recibida, no sea la teóricamente esperada. Por este motivo, es de suponer que cuanto mayor número de antenas emisoras haya, mayor podrá ser la precisión. Otro método utilizado, aunque menos,

es el cálculo por fase de la señal recibida. Los inconvenientes principales son similares a los vistos con el método de la potencia. Por lo tanto, otro de los objetivos de este estudio será el comprobar si ambos métodos son igual de efectivos, si pueden ser complementarios o si por el contrario su información es redundante, si uno de los dos funciona mejor en determinadas condiciones de espacio, número de antenas y demás.

1.2 Objetivos

- Conocer y profundizar en el denominado Internet de las Cosas (IoT) y en la tecnología RFID: posibilidades que tiene, utilidades, limitaciones, variantes, así como estado de madurez de esta tecnología.
- Definir y simular un método de localización fiable mediante un sistema de etiquetas RFID UHF Gen2 utilizando datos de módulo y fase de la señal recibida por las etiquetas.
- Extrapolar un modelo de un sistema de geolocalización a un entorno PAN, reducido y cerrado.
- Comprobar la eficacia que podría tener el sistema de posicionamiento espacial mediante etiquetas RFID.
- Realizar una simulación del sistema de posicionamiento mediante RFID para determinar su exactitud
- Definir los beneficios prácticos, fundamentalmente a la empresa, que puede aportar un sistema de posicionamiento por etiquetas.

1.3 Enfoque y método seguido

Para desarrollar este trabajo, lo primero que se realizará es un estudio de la tecnología RFID, para conocer mejor sus características, posibilidades, limitaciones, etc. Este estudio quedará plasmado en el capítulo dedicado al *estado del arte*. En este estudio se realizará un repaso de la tecnología, sus tipologías en función del tipo de etiqueta utilizada (etiquetas activas, etiquetas pasivas y etiquetas semipasivas), sus tipologías en función del espectro frecuencial utilizado, sus estándares y sus evoluciones. Se realizará un resumen a modo de presentación de las etiquetas RFID UHF Gen2 y el estándar que las define, el *EPC Class 1 Generation 2*. Con posterioridad se realizará un repaso histórico de estudios previos realizados para solventar el problema de localización mediante etiquetas RFID. Algunos de ellos están basados en la fase de la señal recibida, otros en la potencia de la señal recibida y otros en una combinación de ambos parámetros.

Una vez analizada la tecnología de manera teórica, comenzará la parte práctica. Para ello, lo primero será desarrollar un escenario de pruebas sobre el cual se desarrollará el diseño del estudio. Consistirá en crear un contorno con unas dimensiones determinadas y en colocar dentro de él una serie de antenas RFID. Se tendrán que analizar las características de dichas antenas para su mejor colocación, determinar su número y posteriormente realizar la simulación. Las características fundamentales

a analizar de estas antenas serán ganancia de antena y diagrama de radiación. También se estudiarán similares características de las etiquetas RFID. Se crearán varios diagramas de test, que consistirán en colocar las etiquetas en situaciones diferentes para luego poder realizar varios casos de simulación.

Cuando ya esté establecido el escenario de test, se pasará al desarrollo del programa de simulación. Con tal fin se utilizará el sistema de programación R, un potente software de cálculo estadístico, con el que se pretende simular el comportamiento del sistema centrándose en la capa física y en la capa de enlace.

Lo más novedoso del sistema es el ámbito donde se desarrollará (entorno indoor de corto alcance) y la tecnología que lo soportará (tecnología RFID), ya que existen sistemas de posicionamiento muy desarrollados y extendidos como los sistemas radar, el sistema GPS, etc., pero todos ellos están destinados a áreas externas y abiertas. Por lo tanto, el sistema aquí desarrollado intentará trasladar estos sistemas a un entorno mucho más reducido, cerrado y utilizando una tecnología de corto alcance.

Una vez desarrollado el sistema se realizarán las correspondientes simulaciones para poder comparar los datos con los esperados, comprobando así su eficacia real.

1.4 Planificación del Trabajo

Para la realización del trabajo, las principales fuentes de información se obtendrán de la Red. En particular, predominará la información sobre RFID obtenida del IEEE: especificaciones de la tecnología, artículos relacionados, estudios, etc. Otras referencias principales en relación a la tecnología RFID serán:

- <http://www.rfid-asia.info>
- <https://www.transcore.com/literature>
- <http://www.rfidjournal.com>

Además, para el desarrollo del trabajo, se empleará el entorno de programación “R”. Como documentación principal de este lenguaje se utilizarán las siguientes fuentes:

- <http://www.rstudio.com/products/rstudio/>
- <http://data-mining.business-intelligence.uoc.edu/r-language/the-basics-of-r>
- <http://cran.r-project.org/manuals.html>
- <http://cran.r-project.org/other-docs.html#nenglish>

En relación a las tareas a realizar, el trabajo se estructurará en los siguientes bloques:

- Estudio teórico de la tecnología RFID. Este estudio se realizará en el capítulo dedicado al *estado del arte*. Se centrará en un estudio a fondo de la tecnología RFID y, en concreto, principalmente, en la variante de RFID Pasivo en UHF (estándar EPC Gen2).
- Diseño del escenario de test sobre el que luego se construirá y probará el diseño en el que se centra el trabajo.

- Fase de diseño del sistema así como de su programación.
- Fase de simulaciones y pruebas.
- Conclusiones.

Diagrama de Gantt:

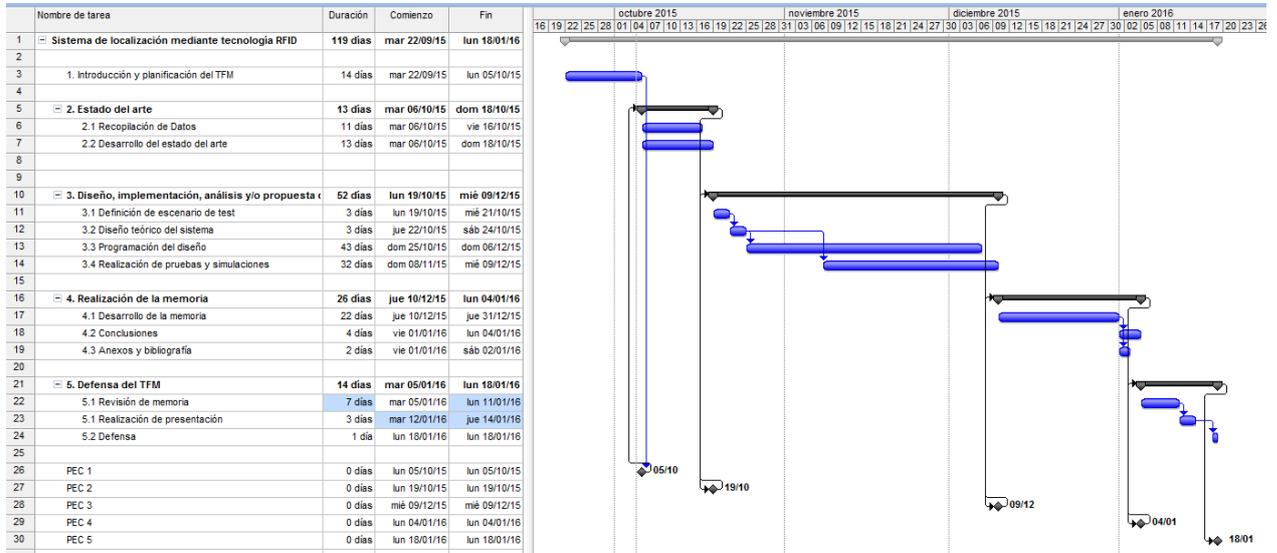


Figura 1: Diagrama de Gantt del proyecto

1.5 Breve resumen de productos obtenidos

- Se han generado 10 funciones en lenguaje de programación R para el cálculo de distancia a etiquetas RFID utilizando estimación por valores de RSSI y estimación por valores de fase. También servirán para calcular el posicionamiento de la etiqueta en unos ejes X e Y mediante dos métodos, método de triángulos y por búsqueda en una cuadrícula. Estas funciones se almacenan en un script R denominado “Funciones_localizacion.r”
- Se ha generado un script para la entrada de datos en dichas funciones y obtención de los resultados a partir de los ficheros de test, denominado “entrada_datos.r”
- Se ha generado un fichero de texto denominado “resultados.txt” que almacena la salida de resultados de las funciones para su posterior análisis

1.6 Breve descripción de los otros capítulos de la memoria

- En el capítulo de Introducción se describe de forma general que es lo que se quiere hacer, se quiere comprobar como de efectiva es la localización de objetos en entornos indoor utilizando etiquetas RFID, describiéndose también de manera genérica la tecnología RFID. Además, se presenta la planificación del trabajo, cómo se realizará y las herramientas a utilizar.

- En el capítulo del Estado del Arte, se hace un repaso más amplio a la tecnología RFID y al estándar EPC Gen2. Además se repasan diversos estudios sobre la misma temática que este trabajo, la localización en entornos indoor a partir de etiquetas RFID con diversos métodos. Esto servirá de base para el desarrollo del trabajo.
- En el capítulo Memoria se aborda el desarrollo del trabajo. Consta de varias partes:
 - Una definición del entorno de test: cómo es el entorno, dimensiones, cuántas etiquetas se van a colocar, cuántas antenas hay, de qué tipo y modelo son, cómo se van a situar, etc.
 - Se entra a describir la primera estrategia, el cálculo en base a valores de RSSI. Se analiza el modelo de cálculo y como adaptarlo en base a una serie de datos obtenidos en campo. Luego, se describen las funciones programadas en R para tratar los datos e intentar obtener distancia y posición. Así mismo se muestra que resultados generan dichas funciones.
 - Se describe, aunque más brevemente, la otra estrategia de cálculo basada en valores de fase. Se describen las funciones desarrolladas en R para el tratamiento de datos y los resultados que generan.
 - Por último, con los resultados obtenidos, se trata de analizar si los métodos son validos, cual puede ser mejor y los problemas que presentan.
- En el capítulo de Conclusiones se exponen las conclusiones generales del trabajo, lo qué se ha podido aprender al realizarlo, se realiza un examen de los logros realizados frente a los objetivos, se analiza si se ha seguido la planificación y se proponen puntos de mejora.

2. Estado del Arte

2.1 Principios del RFID

Las siglas RFID, cuyo significado es Radio Frequency IDentification se utilizan para referirse a un sistema inalámbrico de transferencia, almacenamiento y recuperación de datos, cuyo uso principal es el de identificar y trazar objetos mediante dispositivos denominados etiquetas o tags RFID. Estas etiquetas almacenan información que puede ser recuperada remotamente por parte de los denominados interrogadores RFID.

Las etiquetas RFID se suelen utilizar principalmente para identificar objetos, suponiendo una evolución de los sistemas de códigos de barras, ya que incorporan una serie de ventajas como la lectura sin línea de vista, la posibilidad de leer varios códigos de forma simultánea y su bajo coste.

En este tipo de sistemas tradicionales de códigos de barras, los códigos se leen mediante un lector de rayos infrarrojos a una corta distancia y con visión directa. En comparación, los sistemas RFID aportan ventajas importantes como por ejemplo que las ondas no son direccionales y pueden atravesar obstáculos. Además, se pueden intentar realizar lecturas simultáneas de datos, para lo cual los sistemas RFID implementan mecanismos de detección de colisiones.

Los sistemas RFID pueden trabajar en distintas bandas frecuenciales. A continuación se presenta una clasificación por esta tipología:

- 125 KHz: Tiene un alcance limitado a centímetros, siendo la banda en la que los sistemas RFID tienen menor alcance. Su uso más común es el de identificación de animales o el uso para los mandos de arranque de los coches.
- Banda HF: su banda de frecuencia de uso a nivel internacional es la de 13,56 MHz. Tiene un alcance de lectura de hasta 1,5 m, aunque esta distancia depende del tamaño de la etiqueta. Sus usos principales suelen ser para tarjetas de acceso a edificios o para etiquetas antirrobo en comercios, bibliotecas, etc. Como principales ventajas se pueden citar que tienen una alta fiabilidad, que no afecta a su uso la orientación de la etiqueta, que son resistentes a interferencias eléctricas, que se puede variar el tamaño de las etiquetas o que se puede aumentar el tamaño de las antenas lectoras.
- Banda UHF: Utiliza la banda de 868 MHz en Europa y la banda de 915 MHz en Estados Unidos. Tiene un alcance de unos 5 m. Sus usos principales suelen ser la identificación de objetos, cajas, palés, etc. Además de su mayor rango de distancia de lectura, su otra gran ventaja es su bajo coste.

Además de por sus rangos frecuenciales, los sistemas RFID también se pueden clasificar por el tipo de etiquetas que utilizan. Principalmente las etiquetas pueden ser:

- Etiquetas activas: este tipo de etiquetas poseen su propia fuente de alimentación, bien sea por medio de una batería o bien a través de una conexión eléctrica. Esta fuente de alimentación se emplea para activar los circuitos de la etiqueta y enviar señales a la antena lectora. Como ventajas, se pueden citar su mayor capacidad de memoria (unos 32 KB), mayor distancia de alcance (hasta 100 m en algunos casos) o mayor capacidad de lectura y escritura. No obstante, poseen algunos inconvenientes que impiden su uso masivo al nivel de las etiquetas pasivas, como son su mayor coste, su mayor tamaño o una vida útil mucho más limitada.
- Etiquetas pasivas: su principal característica es que no disponen de alimentación eléctrica ni de batería. La energía necesaria para su funcionamiento la obtienen de la propia energía RF que reciben del emisor RFID, es decir, se activan al estar en las proximidades de un emisor RFID en funcionamiento. Esta forma de funcionar tiene ciertas limitaciones relacionadas, como es obvio, con el consumo de energía: la distancia de lectura es menor, la señal de respuesta tiene un tiempo más corto o su capacidad de memoria es más reducida. A cambio, aportan una serie de ventajas en comparación de las etiquetas activas, como el menor coste, el menor tamaño (debido fundamentalmente a una menor capacidad de memoria) o una vida útil mucho más prolongada que las etiquetas activas.
- Etiquetas semipasivas: estas etiquetas incorporan una pequeña batería, empleada para activar los circuitos internos de la etiqueta. Sin embargo, la energía necesaria para la comunicación con el interrogador se genera de la misma manera que en las etiquetas pasivas, es decir, se obtiene de la energía de RF generada por el emisor RFID.

2.2 El estándar Electronic Product Code Class 1 Generation

Como se indicó en la introducción, el objeto de estudio de este trabajo se realizará utilizando el estándar Electronic Product Code Class 1 Generation 2 (EPC Gen2), del que a continuación veremos sus características generales.

Las siglas EPC vienen de Electronic Product Code, que es un código único destinado a la identificación inequívoca de un objeto, persona, etc. y que está contenido en las etiquetas RFID. Este código es universal y está compuesto por 24 dígitos, de los cuales, los 9 últimos están destinados a la identificación del objeto. Además, este código puede almacenar otras propiedades como la fecha de fabricación, fabricante, tamaño, fecha de caducidad, etc.

La EPCglobal es la organización que lidera de manera global el desarrollo de los estándares del EPC soportado por los sistemas RFID. Fue fundada en 2003 como sucesora de la organización perteneciente al MIT (Massachusetts Institute of Technology) Auto-ID Center. Los estándares EPC pueden ser de cuatro clases:

- Clase 0: etiquetas que se pueden programar sólo una vez pero se pueden leer muchas veces (WORM – Write Once Read Many). La programación se realiza en el proceso de fabricación. Esta clase también es conocida como Class 1 Generation 1.
- Clase 1: son etiquetas pasivas con una memoria no volátil. Dependiendo del tipo, pueden ser WORM, es decir, solo se puede programar una vez pero leer muchas veces, o pueden ser WMRM (Write Many Read Many), es decir, se pueden leer y escribir muchas veces.
- Clase 2: tienen características similares a las etiquetas de clase 1 Gen2, pero además añaden algunas funcionalidades como el uso extendido de memoria, control de acceso por autenticación, etc.
- Clase 3: aún no está definida, pero incorporará características para etiquetas semipasivas usando la banda UHF.
- Clase 4: son etiquetas activas que pueden comunicarse tanto con lectores como con otras etiquetas.

La EPC Class 1 Generation 2 se comenzó a definir en octubre del año 2002 por parte de la Auto-ID Center y finalizada en diciembre de 2004 por la EPCglobal a quién fueron traspasados todos los procesos de desarrollo de los estándares tras su fundación. Sus propósitos fueron los de mejorar las características de la generación 1, añadiendo nuevas funcionalidades y perfeccionamiento, además de anticipando posibles aplicaciones futuras, establecer una única especificación en la banda UHF o realizar un desarrollo global dirigido a los reguladores de las diversas regiones mundiales.

En cuanto a las principales características de la EPC Class 1 Generation 2 podemos citar las siguientes:

- Los interrogadores pueden transmitir utilizando tres tipos de modulación DBS-ASK (double-sideband amplitude shift keying), SSB-ASK (single-sideband amplitude shift keying) o PR-ASK (phase-reversal amplitude shift keying) utilizando un formato PIE (pulse-interval encoding), que consiste en un formato de representación en el que para representar un “1” lógico utiliza un pulso largo transmitido de manera ininterrumpida, seguido de un pulso corto sin transmitir, mientras que para un “0” lógico utiliza un pulso corto transmitido de manera ininterrumpida, seguido de un pulso corto sin transmitir.
- Los sistemas RFID podrán comunicarse utilizando frecuencias comprendidas entre 860 y 960 MHz. La elección de la frecuencia a utilizar por parte del interrogador dependerá de la normativa regional así como del entorno radioeléctrico local.
- Dense-Interrogator channelized signaling: el estándar de la EPC Class 1 Generation 2 incorpora un método que soporta múltiples lectores minimizando la interferencia entre ellos. Permite tres modos de operación: single reader mode para un solo lector, multiple reader mode para múltiples lectores y dense reader mode para un entorno con alta densidad de lectores.

En el entorno de un solo lector, este transmite y espera la respuesta de la etiqueta sin transmitir temporalmente. En los entornos densos o de múltiples lectores, la transmisión y la respuesta se separan en diferentes canales frecuenciales. Al variar la regulación europea con respecto a la normativa americana, el ancho de banda dedicado no es el mismo en los dos territorios. Mientras los sistemas europeos dispondrán de 10 canales en la banda UHF dedicada a RFID, los sistemas americanos disponen de 50 canales. Además, como en proporción, los lectores transmiten mucha más energía que las etiquetas (unos seis órdenes de magnitud), existe la posibilidad de introducir una máscara de rebaja en la transmisión de los lectores, que atenúe la energía en los canales adyacentes.

- Mayores velocidades de transmisión: mientras la Gen1 utilizaba velocidades entre 70 y 149 Kbps, la Gen2 permite velocidades entre 80 y 640 Kbps.
- El EPC de las etiquetas de la Gen2 es de 256 bits, mientras que en la generación anterior era de 96 bits.

2.3 Características RFID utilizables para la localización

El funcionamiento típico de un sistema basado en EPC Gen 2 es el siguiente: Cuando una etiqueta se introduce en el ámbito del campo electromagnético de un lector, adquiere la energía para comenzar a funcionar. En el proceso de inicio, el lector envía una instrucción a las etiquetas dentro de rango para que generen un número aleatorio. Una vez las etiquetas generan dicho número, la etiqueta que genera el número cero es direccionada y el lector puede comenzar a enviarla comandos. Si el lector quiere leer otra etiqueta, envía una orden a todas las etiquetas para que decrementen su número generado y, cuando otra etiqueta tenga como número el cero, el lector podrá interrogar a esta nueva etiqueta. Para obtener información de una etiqueta, el lector lanza un comando. A continuación, el lector comienza a transmitir una portadora RF no modulada a la vez que escucha una respuesta reflejada o retrodispersada (backscattered). Las etiquetas comunican información mediante reflejo modulando la amplitud y/o fase de la portadora RF.

Si se compara la fase de la onda portadora transmitida de manera continua por el lector y la fase de la respuesta retrodispersada por la etiqueta, estas no son iguales. Los motivos son diversos, pero los principales son tres: la impedancia de la etiqueta, la cadena de transmisión del lector y la distancia entre el lector y la etiqueta.

Existe un método para realizar el cálculo de distancia de objetos, utilizado en los sistemas de geolocalización, que es conocido como medición por diferencia de fases. Este método utiliza una frecuencia de referencia generada por un oscilador que controla el receptor. Esta señal se compara con la señal demodulada obtenida del usuario u objeto del que se quiere conocer la distancia con respecto al receptor. Esta señal se obtiene por correlación, por el método de cuadratura o por retrodispersión. Dado que la fase de la señal emitida por el receptor es conocida, lo que se hace es calcular el desfase entre

las dos señales, lo que se conoce como desfase. Este desfase variará según varíe la distancia entre el receptor y el objeto.

Cuando la señal llega al receptor desde el objeto, esta habrá recorrido una distancia que, en principio, es la distancia entre el objeto y el receptor. Dicha distancia se puede descomponer en un número entero de longitudes de onda de la señal, conocido como ambigüedad, más una fracción de longitud de onda. La longitud de onda puede variar entre 0° y 360° y, cuando llega a 360° , la ambigüedad aumenta en una unidad.

Como se puede ver, este método es aplicable al entorno EPC Gen2 ya que el lector actuaría como receptor y la frecuencia de referencia sería la portadora no modulada que lanza un lector cuando quiere obtener una respuesta de una etiqueta, siendo la señal retrodispersada la señal a comparar.

Uno de los principales problemas para aplicar este método en el entorno EPC Gen2 es el rango frecuencial que utilizan estos sistemas. Al utilizar frecuencias de la banda UHF (entre 860 y 960 MHz) y además en entorno indoor, es muy frecuente que se produzca efecto multicamino. Este efecto consiste en que una señal puede llegar a la antena receptora siguiendo diferentes trayectorias y en diferente tiempo, debido a que dicha señal se refleja en diferentes estructuras o superficie. De esta manera, el camino que recorre la señal es mayor que si siguiera una trayectoria recta entre emisor y receptor. Además del multicamino existen otros efectos que pueden afectar al cálculo de la distancia en entornos cerrados debido a los obstáculos, como son la reflexión, la difracción o la atenuación. Para evitar estos problemas o minimizarlos en la medida de lo posible, se pueden implementar diversas soluciones:

- Colocar etiquetas de referencia: se distribuyen etiquetas cuya ubicación es conocida. Como dicha etiqueta de referencia sufrirá los mismos efectos que las etiquetas objetivo, al conocer su distancia, se puede estimar la distancia de las etiquetas objetivo.
- Calibración del sistema: La idea es similar a la anterior. Se ponen una serie de etiquetas de referencia con ubicación conocida, de tal manera que las medidas sobre estas etiquetas sirven para calibrar el sistema. La principal diferencia entre este método y el anterior es que, en este caso, las etiquetas de referencia sólo se utilizan en la fase inicial de instalación del sistema, eliminándose posteriormente, mientras que en el caso del método de etiquetas de referencia, las etiquetas están siempre presentes por lo que se hará un calibrado en cada medida. Por lo tanto, el principal inconveniente de este segundo método es que si las condiciones de entorno cambian, el calibrado inicial puede quedar obsoleto.
- Por último como complemento y no como opción excluyente de las dos anteriores, está el uso de algoritmos de triangulación. Consiste en realizar medidas desde varios lectores situados en distintas posiciones del entorno. En primer lugar se miden las distancias a la etiqueta objetivo desde todos los lectores, guardando dichas medidas en un array. A continuación se realizan las medidas de distancia desde todos los lectores a una etiqueta de referencia. Por último se calculan las distancias euclídeas entre las distancias de la etiqueta objetivo y las distancias de las etiquetas de referencia.

Otra característica interesante y aprovechable para el objeto de este trabajo es la RSSI (Received Signal Strength Indication). LA RSSI es una medida de potencia transmitida o recibida. En este caso la medida de RSSI que resultará útil será la de la señal retrodispersada por la etiqueta, ya que en función de esta potencia es posible calcular la distancia a la que se encuentra. Hay que resaltar que, en este caso, el entorno tiene una gran influencia en los resultados. Aunque en general se puede indicar con bastante certeza qué etiqueta está más cercana que otra en función de que su RSSI sea mayor o menor, para obtener una distancia concreta a una etiqueta es necesario realizar primero un análisis del entorno. Los principales factores de entorno que pueden afectar a las medidas de RSSI son:

- Bloqueo de la señal por objetos.
- Orientación relativa del lector y de la etiqueta.
- Materiales que causan efectos no esperados en la señal, como absorción, reflexión, difracción, etc.

Para realizar un análisis del entorno se pueden utilizar una serie de métodos, en general complementarios y, en ningún caso, excluyentes: En primer lugar, se puede realizar un modelado teórico como el modelo Path-Loss:

$$RSSI = P_0 - \left(10N \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \right)$$

Siendo N el exponente Path-Loss, cuyos valores están comprendidos entre 2,7 y 4,3, X_σ en una variable aleatoria expresada en dB, d_0 es la distancia de referencia que será generalmente 1 metro y P_0 la RSSI de referencia tomada, generalmente a 1 metro.

Para calcular la RSSI de referencia (P_0), se utiliza la fórmula de Friis:

$$P_0 = W_t + G_t + G_r + 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)$$

Donde W_t es la potencia transmitida por el lector, G_t es la ganancia de la antena del transmisor (el lector), G_r es la ganancia de la antena del receptor y λ la longitud de onda de la señal.

Una vez transformadas estas ecuaciones se puede obtener una ecuación de distancia en base a este modelo:

$$d = 10^{\frac{P_0 - X_\sigma - RSSI - 10N \log(f) - 30N - 32,44}{10N}}$$

Otro método que también se suele emplear es la utilización de etiquetas de referencia. De manera similar que en el cálculo de distancia mediante variación de fase, se utilizan etiquetas de referencia para calibrar las medidas.

También en el cálculo de distancia por RSSI suele ser necesario utilizar varios lectores para poder calcular de manera más exacta la distancia, utilizando técnicas como la triangulación. Además, es frecuente utilizar la técnica de cálculo de distancias por RSSI junto con la técnica de cálculo de distancia por

diferencia de fase, con el objetivo de minimizar los errores producidos por el entorno y aumentar la precisión.

2.4 Algunos antecedentes

Para finalizar, citaremos algunos ejemplos de proyectos que guardan relación con el objeto de este trabajo, la localización en espacios indoor basadas en la tecnología EPC Class1 Rev2 [1]:

- Estudio realizado en el año 2010 para la identificación espacial de etiquetas UHF RFID EPC Gen2, basándose en la fase [2]. La técnica está basada en PDOA (Phase Difference of Arrival) y en este estudio se plantean 3 posibles técnicas:
 - TD-PDOA (Time Domain Phase Difference of Arrival): utilizando una frecuencia fija y suponiendo que las fases de offset y backscatter no cambian, se mide la fase de la señal de la etiqueta en dos momentos de tiempo, pudiendo estimar la proyección del vector velocidad (V_r) de la etiqueta:
 - FD-PDOA (Frequency. Domain Phase Difference of Arrival): Permite estimar la distancia de la etiqueta RFID al lector, midiendo la fase a diferentes frecuencias y derivando la fase con respecto a la frecuencia, suponiendo como en el método anterior que las fases de offset y backscatter no cambian.
 - SD-PDOA (Spatial Domain Phase Difference of Arrival): permite obtener el ángulo de entrada o la dirección a la etiqueta, midiendo la fase de la señal enviada por la etiqueta sobre un array de antenas.

Los experimentos realizados en este estudio concluyen principalmente que la técnica TD-PDOA es la más robusta ante el problema de propagación multicamino, dejando abierto el reto de mejorar el comportamiento de las otras dos técnicas (FD-PDOA y SD-PDOA) en entornos arbitrarios.

- Presentación de un modelo para el trazo de etiquetas RFID y seguimiento de un elemento móvil equipado con un lector RFID [3]. En este estudio, utilizando también tecnología UHF RFID EPC Gen2, se presenta una solución empleando cálculos por intensidad de RSSI complementado por el número de detecciones de etiquetas. En este modelo la principal novedad es que el lector RFID es un lector móvil con 2 antenas. A partir del nivel de RSSI se puede calcular la distancia relativa de cada etiqueta y conforme se conoce las posiciones de unas etiquetas se puede ir conociendo la posición absoluta del resto. Con una distribución de etiquetas cada dos metros, se obtuvo una desviación media de 29 cm. Otra utilidad de este sistema puede ser la localización del elemento móvil que lleva incorporado el lector RFID. Para ello se realizó una distribución de 350 etiquetas en un supermercado, con una separación aproximada de 1 metro.

- Estudio realizado en el año 2013 para localización 2D de etiquetas UHF RFID EPC Gen2, utilizando medidas de fase [4]. Se basa en calcular la distancia entre una antena y una etiqueta RFID a partir de las medidas de fase de la señal de backscatter devuelta por la etiqueta a la antena. A partir de calcular dicha distancia a tres antenas diferentes, se puede calcular la posición de dicha etiqueta por triangulación. El principal problema que aparece es el habitual en estos casos, la arbitrariedad del entorno debida a la alta propagación multicamino. Como alternativa a este problema se utiliza el algoritmo KNN (K-Nearest Neighbor), que consiste en utilizar etiquetas de referencia, cuya distancia a las antenas es conocida. Se realiza un cálculo de distancia entre una etiqueta de referencia y las antenas, almacenándose en un vector. Lo mismo se hace con la etiqueta cuya distancia se quiere conocer. La distancia estimada resultará de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las diferencias de distancias entre las distancias de la etiqueta a calcular y las distancias de la etiqueta conocida. En este estudio se aplica este algoritmo para realizar el cálculo utilizando tanto fase como intensidad de señal (RSSI).

Se concluye principalmente que:

- Utilizando medidas de fase con varias frecuencias diferentes es posible estimar la posición.
 - Existe un alto nivel de error debido principalmente a la propagación multicamino.
 - La estimación de localización mediante el algoritmo KNN presenta menos error utilizando medidas de fase que utilizando medidas RSSI.
- Estudio para localización en tiempo real, usando un sistema de etiquetas pasivas UHF RFID [5] realizado en el año 2014. El estudio presenta dos posibles modelos para poder posicionar las etiquetas:
 - Modelo basado en valores de RSSI: se basa en la intensidad de señal que reciben las antenas al leer las etiquetas. Como principales limitaciones de este sistema se citan la necesidad de tener 4 antenas superpuestas para la lectura y que las antenas del mercado tienen aproximadamente un radio de 5 metros de alcance.
 - Modelo usando ratios de lectura: se basa en el ratio de lecturas que realiza una antena sobre una etiqueta y usa serie de etiquetas de referencia para calibrar el sistema y poder realizar un trazo de la ubicación de las etiquetas. Como principales inconvenientes de este método se citan el coste del despliegue de las etiquetas de referencia y el alto coste de procesamiento.

Este estudio plantea el utilizar ambas métricas. Tras realizar el experimento se pudo deducir que utilizando zonas de lectura pequeñas y con una distribución de antenas no simétrica se reducía el número de etiquetas de referencia necesarias.

- Nuevas técnicas para la localización de etiquetas UHF RFID [6]. En este estudio se plantea abordar el problema de la localización de etiquetas RFID mediante métodos de intensidad de señal RSSI reflejada. Plantea que los métodos tradicionales tienen su principal problema en las condiciones de propagación en entornos interiores, que complican en gran manera la estimación. Para superar estas limitaciones se propone una nueva arquitectura con un único lector transmitiendo una consulta. La etiqueta responde a los tres lectores simultáneamente de manera casi igual, ya que la potencia incidente es la misma para todos los enlaces lector-etiqueta, variando únicamente la dirección. La ventaja de esta arquitectura consiste en limitar las grandes variaciones.

También existen proyectos que intentan resolver el problema de localización utilizando sistemas RFID activos (en lugar de RFID UHF pasivos como en el caso de este trabajo). Podemos destacar dos:

- Estudio realizado en el año 2013 sobre el posicionamiento local de personas utilizando sistemas RFID activos [7]. Este sistema utiliza la localización bayesiana, donde se estima la probabilidad de la posición del individuo en un determinado instante de tiempo $p(x_t)$ a partir de las intensidades de las potencias recibidas en la etiqueta RFID de dicho individuo, de las diferentes balizas RFID. El posicionamiento se obtiene en dos etapas, una de predicción, donde se obtiene la posición actual a partir de la posición anterior, aplicando un modelo de movimiento, y la etapa de corrección, que mide la correspondencia entre la posición estimada y las recibidas experimentalmente. Como conclusiones del experimento se considera que es un sistema barato y escalable, siendo su precisión similar o superior a otros sistemas de localización local basados en tecnologías más comunes. Como puntos a mejorar se destaca el aumento de la precisión media obtenida (2.1 metros), mejorando el modelo de observación y/o utilizando dispositivos de mayor coste.
- Proyecto de investigación para proporcionar servicios de guiado en espacios interiores a personas mayores e invidentes [8]. Utiliza un sistema RFID activo y el método se basa en la medida de los niveles de RSSI (potencia de la señal recibida), sabiendo que los niveles de RSSI pueden tomar rangos entre 70 y 140 y que el alcance máximo del lector RFID, en condiciones ideales es de 140 metros. En el estudio se concluye que pese a que en exterior es fácil predecir los niveles de RSSI, en interiores es más complicado, al existir mucha propagación multicamino y distorsiones debido a los objetos situados entre emisor y receptor. Para solucionar este problema, se utilizan etiquetas de calibrado de las que se sabe previamente su posición. Como conclusión principal, el experimento fue efectivo con una precisión de 2.1 metros para una superficie de 500 m² y 30 etiquetas de calibración.

En conclusión, de estos y otros estudios consultados se puede afirmar, que:

- Los métodos más utilizados para localización de etiquetas RFID son mediante medidas de intensidad de señal reflejada por las etiquetas (RSSI) y mediante medidas de fase de la señal reflejada en las etiquetas.
- Entre el método de cálculo por medidas de RSSI y el método por medidas de fase, en los estudios examinados suele mostrar mejores resultados en cuanto a precisión el método por medidas de fase.
- Existe un problema en los entornos indoor que complica el cálculo de la distancia con respecto a entornos abiertos. Este es el de la propagación multicamino debido a los objetos que puede haber entre el lector RFID y las etiquetas. Este es el principal reto a resolver.
- Se hace necesaria la instalación de etiquetas de referencia con distancia conocida a las antenas, para poder calibrar el sistema y poder así trabajar en entornos arbitrarios con alta propagación multicamino.
- Existe algún método de cálculo de localización alternativo aunque menos usado, como por ejemplo el cálculo por ratios de lectura de una antena sobre una etiqueta.

3. Memoria

3.1 Definición del entorno de test

El entorno de test estará formado por un entorno indoor de reducidas dimensiones. Hablamos de un entorno rectangular de menos de un metro cuadrado, que simularía una estantería de un almacén, por ejemplo. Dicho entorno ha sido propuesto por los consultores de la UOC y sobre él se han realizado una serie de medidas reales.

El entorno está compuesto por:

- Dos antenas RFID UHF marca Keonn, modelo Advantenna-p11, situadas una al lado de la otra. Se trata de una antena cuadrada de 13,7 cm de lado, que trabaja a frecuencias entre 865 y 868 MHz y con una ganancia máxima de 3,2 dBi. El diagrama de radiación es el siguiente.

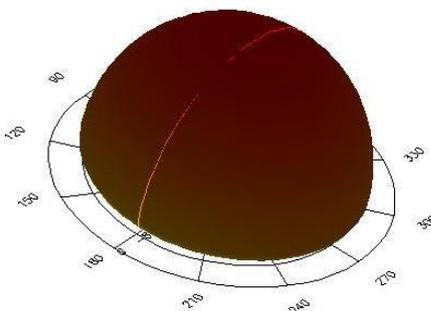


Figura 2: Diagrama de radiación de la antena RFID

- Varios objetos con una etiqueta RFID cada uno. Primero se simulará con tres objetos (tres etiquetas) y posteriormente con seis objetos (seis etiquetas).
- Se trata de un rectángulo de 40 cm de largo y sin fondo. Es decir, los objetos se pueden desplazar un máximo de 40 cm longitudinalmente. De ancho tiene unos 80 cm. Es decir, los objetos se podrían desplazar lateralmente unos 40 cm a cada lado desde el centro. El lateral es de madera. La altura del habitáculo se obvia, ya que las simulaciones se realizarán en 2D. Las antenas se sitúan en parte posterior al habitáculo.

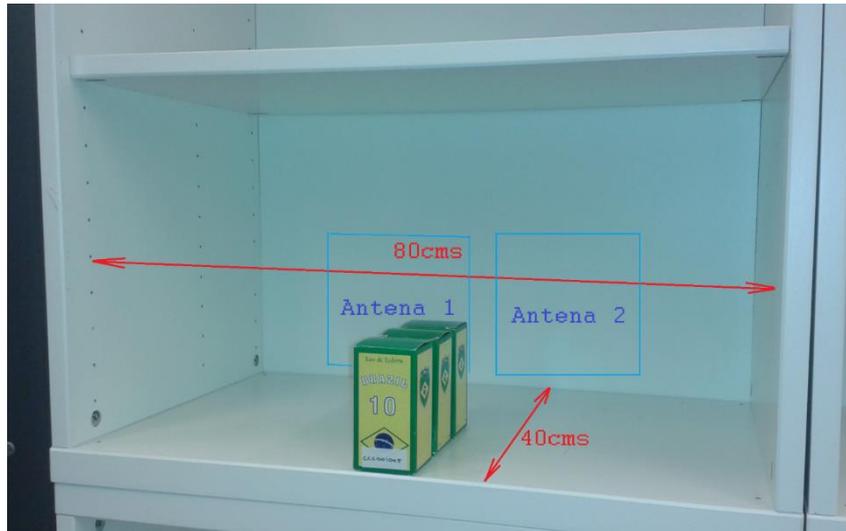


Figura 3: Entorno de trabajo de donde se han obtenido las medidas de test

Por último, éste es el esquema de distribución del entorno de test:

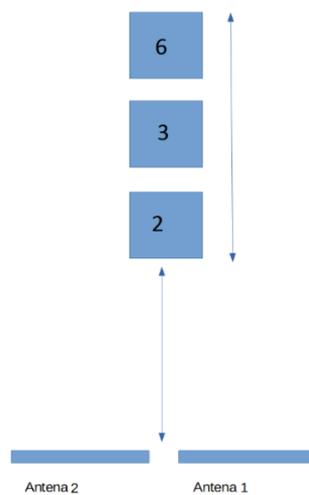


Figura 4: Esquema del entorno de test

3.2 Localización mediante RSSI

RSSI (Received Signal Strength Indication), es la potencia de señal recibida en el receptor. Esta potencia diferirá de la potencia emitida por el transmisor debido a diversos factores. El principal de ellos es el definido por las leyes de propagación que determinan que la señal al propagarse en espacio libre, su potencia se atenúa. Dicha atenuación de potencia en espacio libre será proporcional a la distancia que recorre, es decir, a mayor distancia habrá mayor atenuación de la señal.

El modelo de cálculo de pérdidas en espacio libre viene determinado por la ecuación de Friis:

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R}{L} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^n$$

Fórmula 1

Donde:

- P_R es la potencia de señal recibida en el receptor, es decir, lo que antes hemos denominado como RSSI.
- G_T es la ganancia de la antena transmisora, mientras que G_R es la ganancia de la antena del receptor.
- λ corresponde con la longitud de onda de la señal.
- d determina la distancia en línea recta entre antena emisora y antena receptora.
- n es un parámetro empírico que depende diversos factores como el medio, las diferencias alturas o la distancia entre emisor y recepción en comparación con la longitud de onda. El valor típico para espacio libre es $n = 2$, pero como se verá, este valor puede variar en entornos indoor y en rangos de distancias pequeñas, siendo determinante para poder aproximarnos a un modelo fiable en el cálculo de la distancia
- Por último, L se refiere a las pérdidas del sistema no relacionadas con la propagación de la señal.

La anterior ecuación está expresada en unidades lineales de potencia (vatios, miliwatios...). Si se transforma la ecuación a escala logarítmica (dBW, dBm...) se obtendrá la siguiente expresión:

$$P_R = P_T + G_T + G_R - L - 10n \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

Fórmula 2

Como se vio anteriormente, las etiquetas RFID pasivas UHF Gen2 trabajan en frecuencias entre 860 y 960 MHz. En concreto, en las pruebas realizadas en laboratorio y con las que se va a caracterizar este estudio, se han utilizado dos frecuencias distintas para cada antena: las frecuencias 865,549 MHz y 866,061 MHz en la que emite la antena #1 y las frecuencias 865,549 MHz y 866,829 MHz en la que emite la antena #2. Las longitudes de onda para las frecuencias empleadas $\lambda = c/f$ serán:

- Para la antena 1:

$$\lambda_{12} = \frac{3 \cdot 10^8}{866,061 \cdot 10^6} = 0,3464 \text{ m} \quad \lambda_{12} = \frac{3 \cdot 10^8}{867,341 \cdot 10^6} = 0,3459 \text{ m}$$

Fórmula 3

- Para la antena 2:

$$\lambda_{21} = \frac{3 \cdot 10^8}{865,549 \cdot 10^6} = 0,3466 \text{ m} \quad \lambda_{22} = \frac{3 \cdot 10^8}{866,829 \cdot 10^6} = 0,3461 \text{ m}$$

Fórmula 4

Las pruebas se realizaron utilizando una potencia de transmisión (P_R) en el transmisor RFID de -31,5 dBm. Suponiendo una ganancia de antena en el receptor (G_R) de 0 dBi y una ganancia máxima de la antena transmisora (G_T) de 3,2 dBi. El parámetro L que cuantifica las pérdidas no relacionadas con la señal se obvia. Con estos datos se pueden obtener las ecuaciones del modelo de propagación en espacio libre para cada una de las dos antenas:

$$P_{R11} = -31.5 + 3.2 - 10n \log\left(\frac{4\pi d}{0,3464}\right) \quad P_{R12} = -31.5 + 3.2 - 10n \log\left(\frac{4\pi d}{0,3459}\right)$$

Fórmulas 5 y 6

$$P_{R21} = -31.5 + 3.2 - 10n \log\left(\frac{4\pi d}{0,3466}\right) \quad P_{R22} = -31.5 + 3.2 - 10n \log\left(\frac{4\pi d}{0,3461}\right)$$

Fórmulas 7 y 8

Tomando un valor de $n = 2$, la gráfica de RSSI teórica resultante sería:

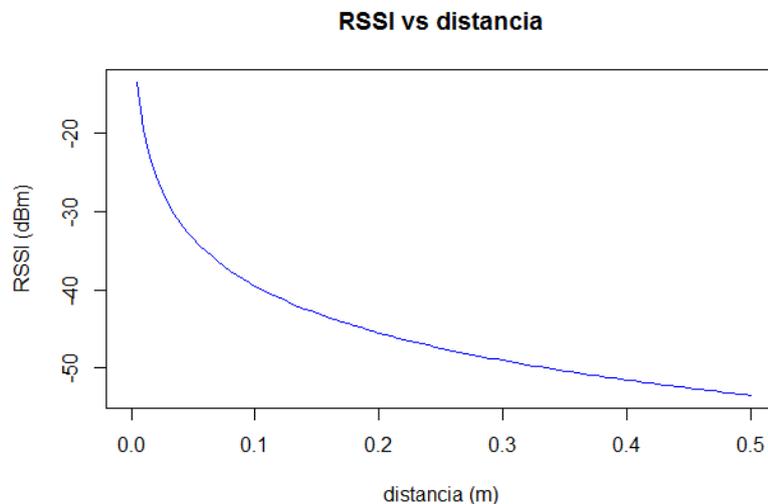


Figura 5: Gráfica de evolución de la RSSI respecto a la distancia, tomando $n = 2$

Nótese que al ser tan similar la longitud de onda de las cuatro frecuencias utilizadas (apenas 0,7 mm entra la menor y la mayor longitud de onda), las gráficas se superponen.

A continuación se comienzan a estudiar los datos obtenidos en campo para poder saber cuánto se parecen con lo calculado por el modelo de pérdidas y si es o no válido el modelo. Como se avanzó anteriormente, tenemos una serie de simulaciones con diferentes distribuciones y distancias de los elementos. En concreto, tenemos 7 simulaciones diferentes.

En primer lugar, se va a estudiar simulaciones en las que las etiquetas se encuentren enfrente de una antena (azimut respecto a la antena tendiendo a 0) y sólo con esa antena, de tal manera que los elementos queden dentro del diagrama de radiación de la antena transmisora y la ganancia sea máxima. Se van a representar los datos obtenidos de muestrear varias veces las mismas etiquetas en posición estática. Para la representación gráfica se utilizará el diagrama de cajas que se describe a continuación:

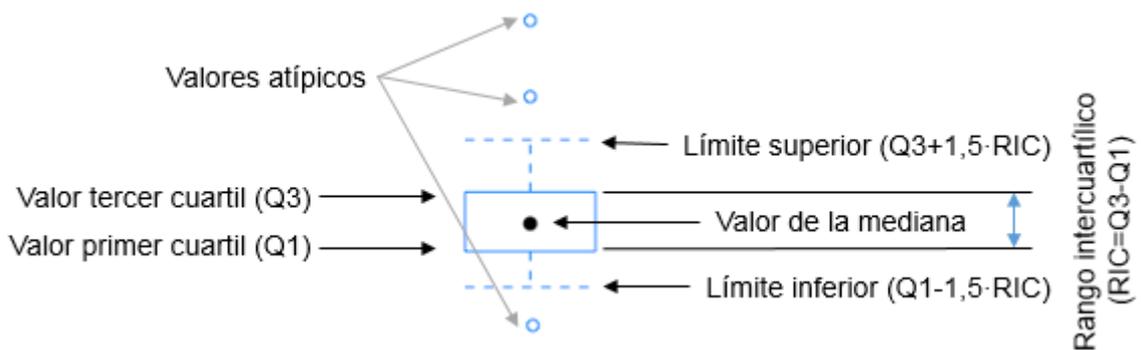


Figura 6: Descripción del diagrama de cajas

- El valor de la mediana representa el valor central del conjunto de los valores numéricos de una muestra.
- El espacio intercuartílico (RIC) engloba al 50% de los valores de la muestra.
- Los límites superior e inferior se calculan sumando 1.5 veces el espacio intercuartílico al cuartil 3 y restando 1.5 veces el espacio intercuartílico al cuartil 1. Fuera de estos límites, los valores se consideran atípicos y no se tendrán en cuenta para los estudios estadísticos.

Para poder trabajar con diagramas de cajas en el lenguaje R se utiliza el comando *boxplot* o el comando *bwplot*. En este caso se utilizará *bwplot* ya que las gráficas son más visuales.

Una vez explicado brevemente el diagrama de cajas, se pasa al análisis de las medidas:

- Medidas con la antena #1 trabajando con la frecuencia de 866,061 MHz. Se utilizan 3 etiquetas RFID, situada la primera (*acac000000000003*) a 18 cm de la antena transmisora, la segunda (*acac000000000002*) 9 cm por detrás de la primera, es decir a 27 cm de la antena y, la tercera, (*acac000000000006*), otros 9 cm por detrás, es decir a 36 cm de la antena.

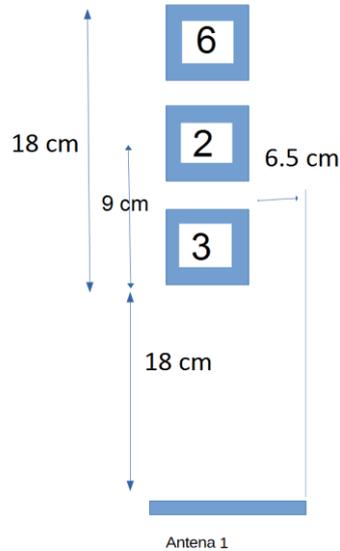


Figura 7: Esquema de colocación de las etiquetas y la antena #1

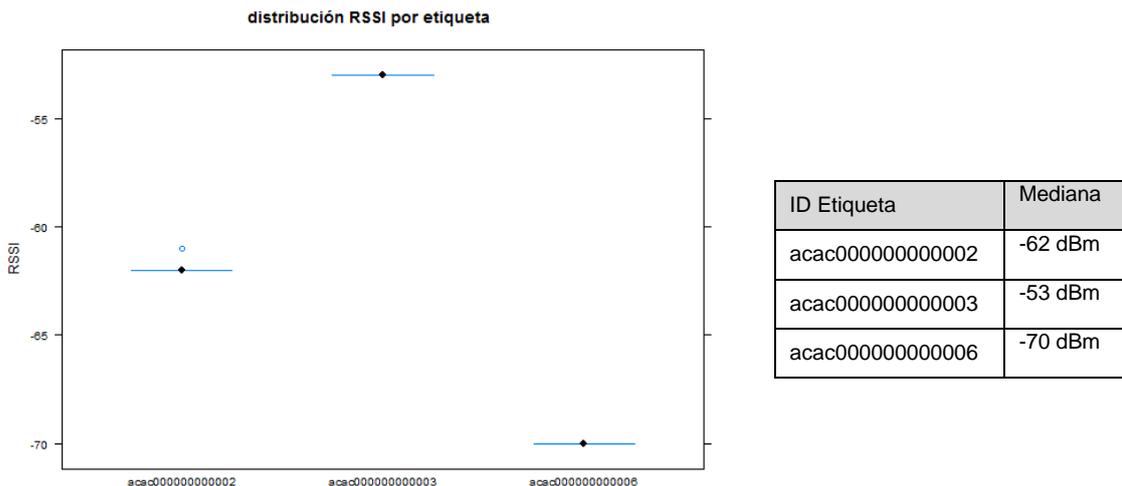


Figura 8: Diagrama de caja y mediana para frecuencia 866,061 MHz según distribución de Figura 7

En la *Figura 8* se puede ver el diagrama de cajas de las tres etiquetas RFID. Como se puede observar, en los tres casos, la mediana, primer y tercer cuartil y los límites inferior y superior prácticamente coinciden, lo que indica que hay muy poca dispersión de las medidas tomadas. A la derecha de la figura se indica numéricamente el valor de las medianas.

Se hace el mismo estudio, pero en este caso con los valores obtenidos empleando la otra frecuencia, 867,341 MHz. Se podrá ver que también la dispersión es mínima, aunque en este caso únicamente se tienen medidas de 2 de las etiquetas:

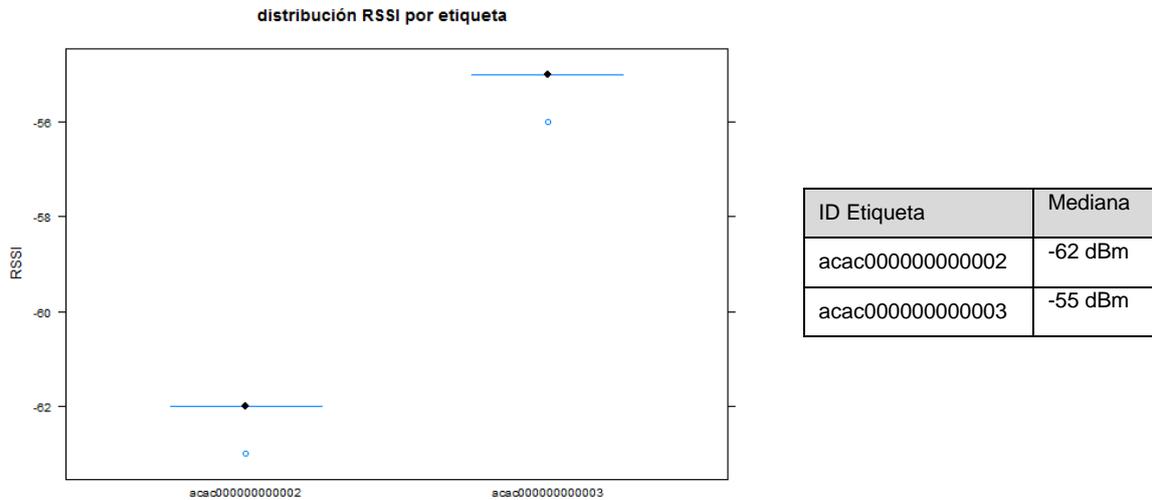


Figura 9: Diagrama de caja y mediana para frecuencia 867,341 MHz según distribución de Figura 7

- Medidas con la antena #2 trabajando con la frecuencia de 865,549 MHz. Se utilizan 3 etiquetas RFID, situada la primera (*acac0000000000003*) a 18 cm de la antena transmisora, la segunda (*acac0000000000002*) 9 cm por detrás de la primera, es decir a 27 cm de la antena y, la tercera, (*acac0000000000006*), otros 9 cm por detrás, es decir a 36 cm de la antena.

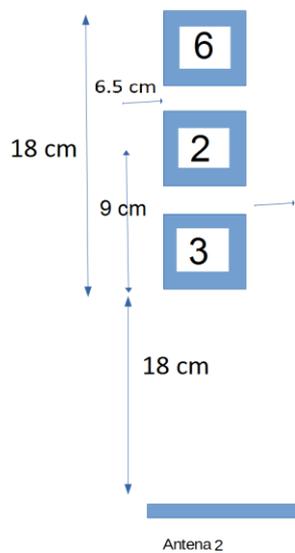


Figura 10: Esquema de colocación de las etiquetas y la antena #2

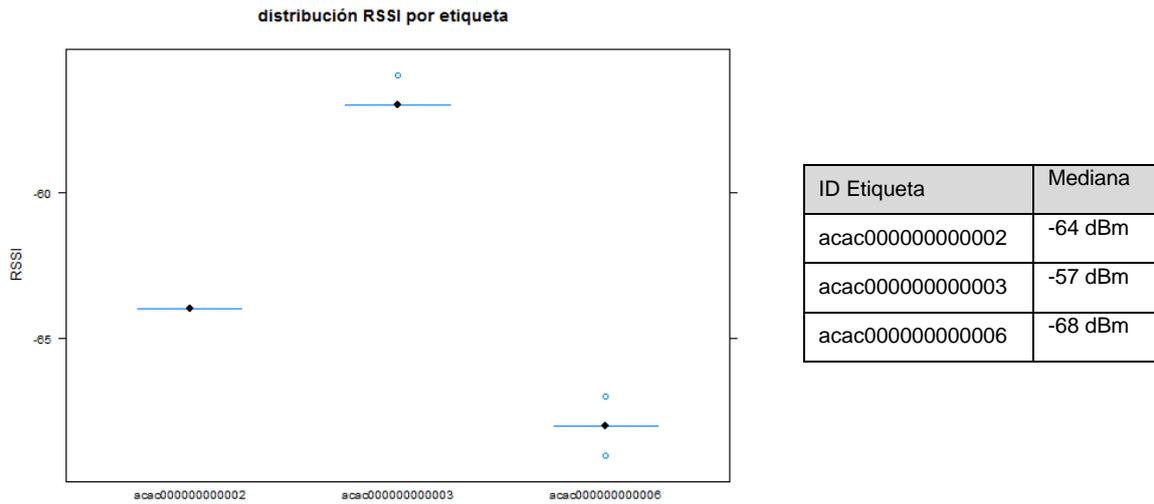


Figura 11: Diagrama de caja y mediana para frecuencia 865,549 MHz según distribución de Figura 10

Obteniendo también los diagramas de cajas para la otra frecuencia utilizada con la antena #2, frecuencia 866,829 MHz:

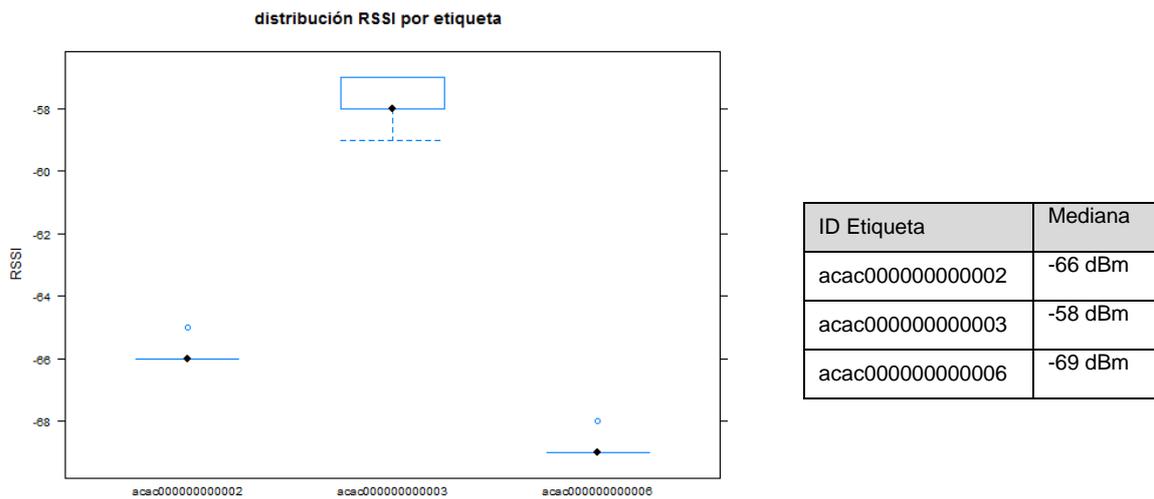


Figura 12: Diagrama de caja y mediana para frecuencia 866,829 MHz según distribución de Figura 10

Como se puede observar, en las medidas analizadas para la antena #2 la dispersión es también mínima ya que generalmente coinciden mediana, primer y tercer cuartil, a excepción de la etiqueta "acac0000000000003" para la frecuencia de 866,829 MHz donde se ve

que el primer y tercer cuartil no coinciden. No obstante, la diferencia es únicamente de 1 dB, por lo que se puede considerar que la serie de medida tiene muy poca dispersión.

Sintetizando, las medias de los valores RSSI por etiqueta, antena y frecuencia obtenidas en estas mediciones de manera numérica son las siguientes:

ID Etiqueta	ID Antena	Frecuencia (MHz)	Distancia real (m)	Mediana RSSI (dBm)
acac0000000000003	1	866,061	0,18	-53
acac0000000000003	1	867,341	0,18	-55
acac0000000000003	2	865,549	0,18	-57
acac0000000000003	2	866,829	0,18	-58
acac0000000000002	1	866,061	0,27	-62
acac0000000000002	1	867,341	0,27	-62
acac0000000000002	2	865,549	0,27	-64
acac0000000000002	2	866,829	0,27	-66
acac0000000000006	1	866,061	0,36	-70
acac0000000000006	1	867,341	0,36	NA
acac0000000000006	2	865,549	0,36	-68
acac0000000000006	2	866,829	0,36	-69

Tabla 1

Se superponen las gráficas del cálculo teórico de RSSI obtenidas mediante las fórmulas 5 y 6 (línea azul) y los puntos obtenidos de calcular las medianas de las RSSI junto con la distancia real de la etiqueta a la antena #1 (figura 13).

Así mismo, se superponen también las gráficas del cálculo teórico de RSSI obtenidas mediante las fórmulas 7 y 8 (línea azul) y los puntos obtenidos de calcular las medianas de las RSSI junto con la distancia real de la etiqueta a la antena #2 (figura 14).

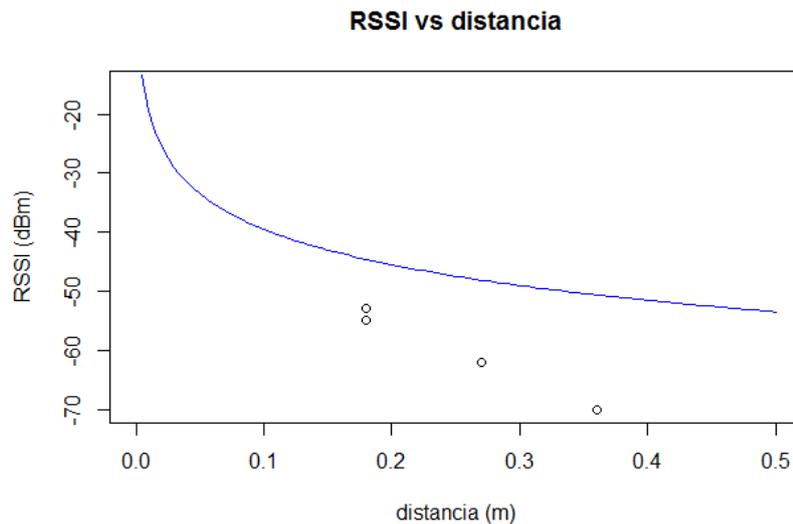


Figura 13: RSSI teórica antena #1 y puntos de valor RSSI vs distancia de etiquetas (tabla 1)

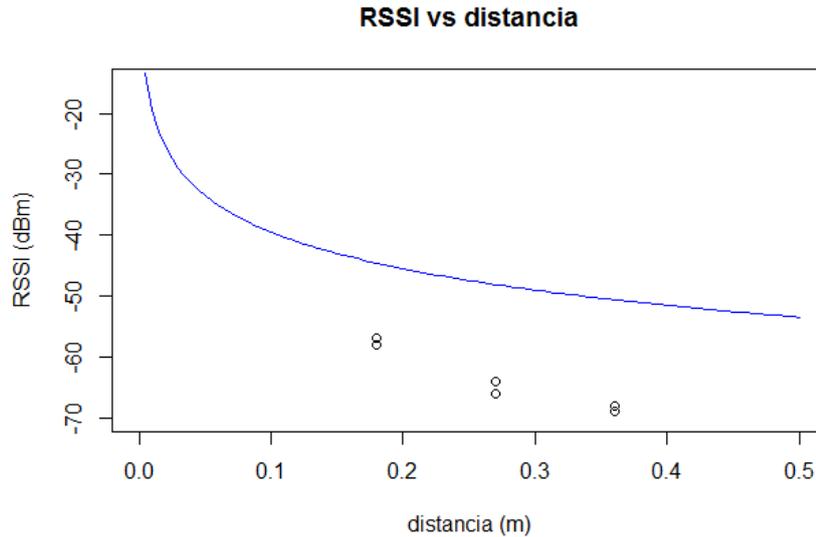


Figura 14: RSSI teórica antena #2 y puntos de valor RSSI vs distancia de etiquetas (tabla 1)

Como se puede ver en ambas gráficas, los valores de RSSI obtenidos anteriormente en las mediciones están bastante desviados de la curva de la RSSI teórica calculada mediante la ecuación de Friis (formula 2).

Es aquí cuando se puede observar la importancia del coeficiente empírico n . Cabe recordar que las gráficas de RSSI se han calculado utilizando el coeficiente empírico n con valor por defecto de 2. Si modificamos este coeficiente para tratar de adaptarlo mejor a las condiciones de propagación y empleamos uno más apropiado para entornos interiores con línea de vista, como puede ser $n \approx 3.5$, se obtendrá una gráfica de RSSI prevista más acorde con los datos reales obtenidos en las mediciones:

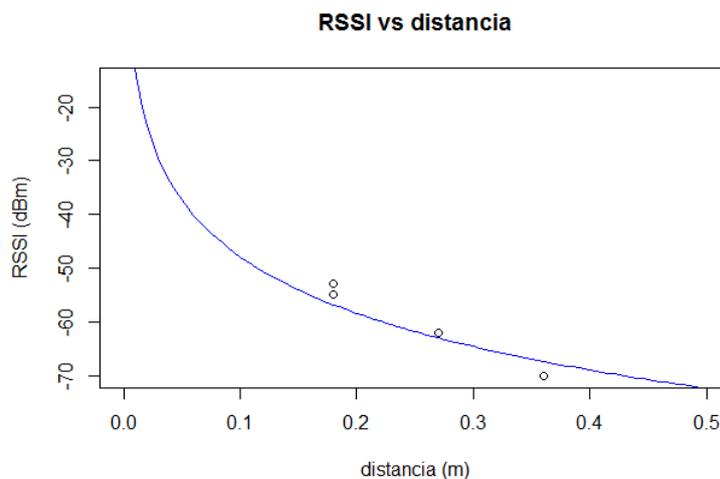


Figura 15: RSSI teórica antena #1 utilizando coeficiente $n = 3.5$ y puntos de valor RSSI vs distancia de etiquetas (tabla 1)

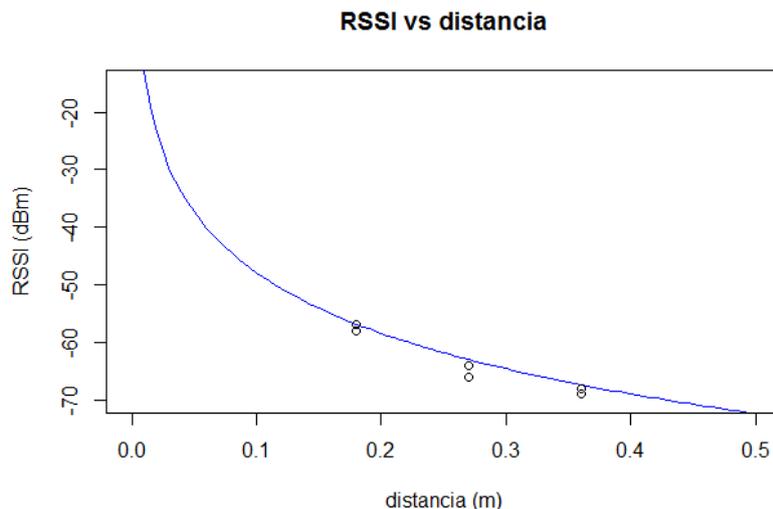


Figura 16: RSSI teórica antena #5 utilizando coeficiente $n = 3.5$ y puntos de valor RSSI vs distancia de etiquetas (tabla 1)

Como se puede ver en ambas gráficas, la línea azul que representa el cálculo teórico de la RSSI según la ecuación de Friis (*formula 2*) si se aproxima más en esta ocasión a los valores de RSSI reales obtenidos en las mediciones.

Con los datos analizados hasta el momento se pueden empezar a sacar conclusiones en relación al modelo de localización mediante niveles de RSSI:

- El modelo basado en la fórmula de Friis puede ser válido para el cálculo de la distancia, según los datos hasta el momento.
- La señal recibida por una etiqueta puede variar si se recibe de antenas diferentes. La variación no suele ser mucha si se utiliza el mismo modelo de antena, pero aun así dicha variación puede existir. Hay que fijarse, por ejemplo, que en las medidas analizadas anteriormente, los niveles de RSSI recibidos de la antena #2 son, por lo general, ligeramente inferiores a los recibidos de la antena #1. Estas variaciones pueden deberse al entorno de propagación, a diferencias físicas de la antena, desadaptación, pérdidas en cableados y/o conectores, etc. También la utilización de diferentes frecuencias puede influir ligeramente en variaciones mínimas de RSSI de una antena a otra.
- La particularidad del entorno de propagación, en este caso indoor, hace necesario ajustar el coeficiente empírico n para poder así calcular unos datos fiables.
- De los puntos anteriores se concluye que es aspecto fundamental para que el modelo funcione, el realizar un calibrado del sistema en cada antena, de tal manera que se ajuste el coeficiente n en base a las condiciones del entorno de propagación y de las condiciones de emisión de la antena.

3.2.1 Estrategias para cálculo de posición en base a la RSSI

Para estimar la posición de las etiquetas utilizando valores RSSI se han desarrollado una serie de funciones en lenguaje R que tratan los valores obtenidos, tratando de darles forma para intentar obtener la posición.

Basándose en valores de RSSI se plantean dos métodos para estimar la posición, que si bien tienen sus similitudes siguen estrategias finales distintas y tienen cálculos distintos:

- Método de estimación mediante triángulos: se basa en imaginar un triángulo formado por una línea entre los centros de las dos antenas, otras dos líneas entre los centros de las dos antenas y la etiqueta. Se trata de calcular los ángulos para, posteriormente, calcular las proyecciones sobre el eje X y sobre el eje Y, según se muestra en la figura siguiente.

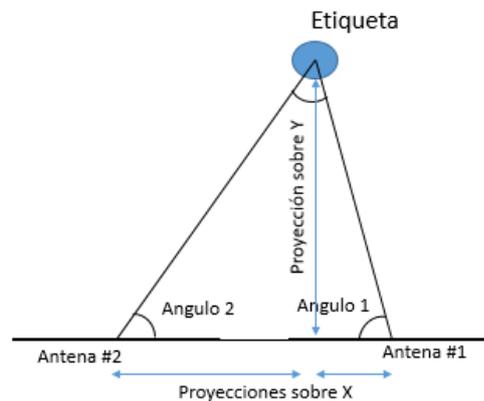


Figura 17: Triángulo para estimación de posición

- Método de estimación mediante cuadrícula: En este caso, se realiza una cuadrícula con celdas de 1 cm² y se calcula para cada celda la RSSI estimada. También se calcula por trigonometría la distancia de la celda a cada antena. Posteriormente, con los valores de RSSI obtenidos para una etiqueta, se busca la celda que tenga la RSSI más próxima a este valor y se obtienen las coordenadas de esta celda para posicionar la etiqueta.

Como se ha dicho, para estos procesos se han definido una serie de funciones en R. Unas serán comunes para ambos métodos y otras serán específicas de cada método. A continuación se presenta un esquema con dichas funciones y sus relaciones:

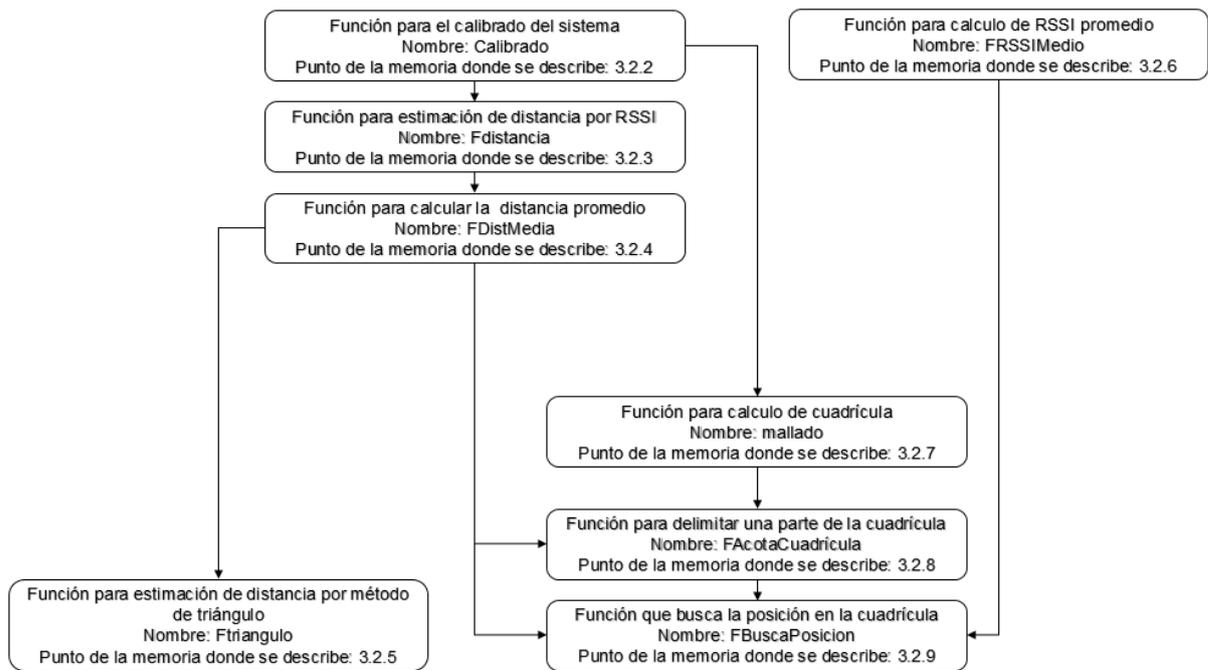


Figura 18: Esquema de relaciones de las funciones para cálculo de posición mediante valores de RSSI. Muestra su orden y dependencias.

3.2.2 Proceso de calibrado del modelo de cálculo por RSSI

La siguiente figura muestra el algoritmo del proceso de calibrado:

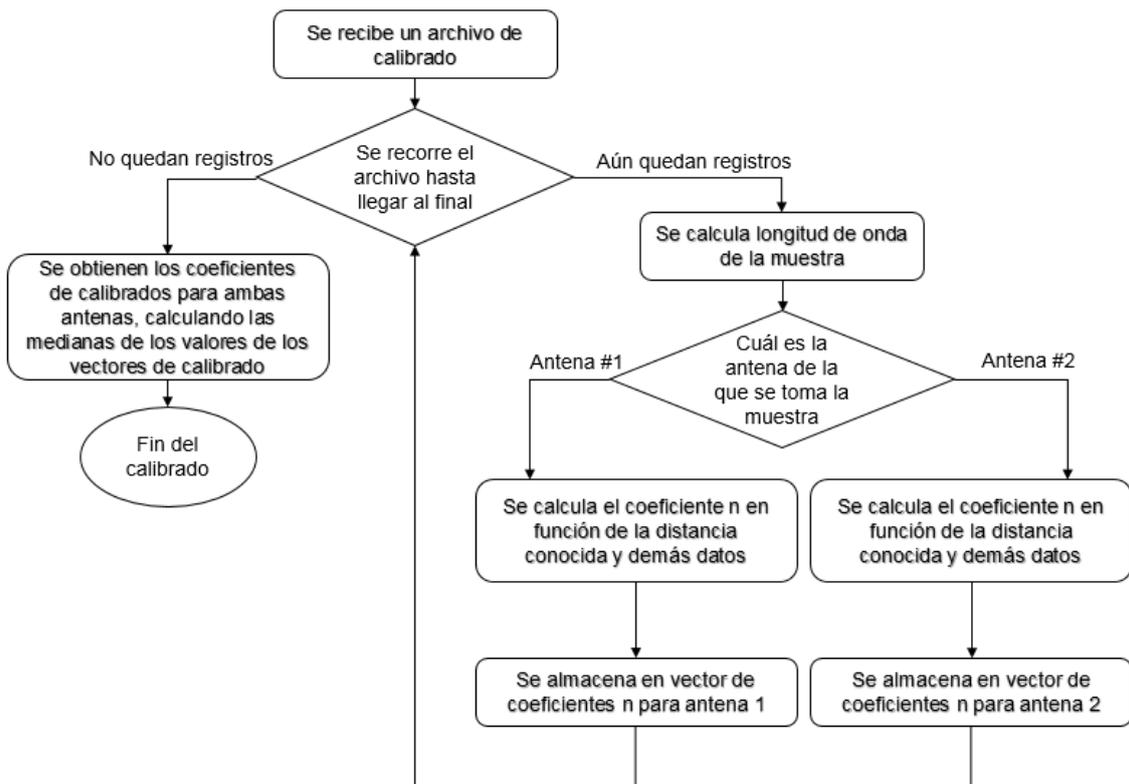


Figura 19: Algoritmo del proceso de calibrado

Se recibe un fichero en formato CSV con los siguientes encabezados y campos:

- HEX_EPC: identificador de etiqueta.
- ANTENNA_PORT: identificador de antena. En este caso únicamente tendremos dos antenas, #1 y #2.
- RSSI: valor de RSSI de la muestra, expresado en dBm.
- FREQ: frecuencia de emisión de la antena, expresada en KHz.
- DIST: distancia conocida entre la antena y la etiqueta para poder realizar el calibrado. Está expresado en cm.
- El resto de campos, MUX_PORT, TIME_STAMP, RF_PHASE y READ_COUNT no se utilizan en este proceso de calibrado.

Estos datos del fichero se extraen en variables dentro de la función R:

```
18 | | Distancia_Conocida<-DatosCalibrado$DIST[i]/100
19 | | ID_Antena<-DatosCalibrado$ANTENNA_PORT[i]
20 | | FrecMhz<-DatosCalibrado$FREQ[i]
21 | | RSSI_Calibrado<-DatosCalibrado$RSSI[i]
```

Figura 20: Variables para calibrado

Existen otras 2 variables necesarias que se han puesto fijas dentro de la función (constantes), como son la potencia de transmisión (-35 dBm) y la ganancia de antena (3,2 dBi):

```
22 | | Pot_Tx<-c(-35)
23 | | Gan_Ant_Tx<-c(3.2)
```

Figura 21: Constantes para calibrado

No obstante, se podrían introducir como variables, bien para introducir desde archivo como dos campos más, de forma similar al resto, o bien introduciéndolas como variables en la llamada a la función, de la siguiente forma y ya no habría que definir las dentro de la función:

```
5 | Calibrado <- function (DatosCalibrado, Pot_Tx, Gan_Ant_Tx)
```

Figura 19: Definición de las variables potencia y ganancia desde el encabezado de la función

Se recorre el fichero registro por registro mediante un bucle *for*. Para cada registro se calcula la longitud de onda para su frecuencia correspondiente:

```
27 | | lambda=3*10^8/FrecMhz*10^-3
```

Figura 22: Cálculo de la longitud de onda de la muestra

Luego se calcula el coeficiente n de la correspondiente muestra, que se va guardando en un vector, discriminando por antena. El resultado será un vector de cada antena con tantos coeficientes n como muestras se hayan tomado de esa antena:

```

30 if (ID_Antena==1) {
31     vector_Coef_n1<-c(vector_Coef_n1,((RSSI_Calibrado - Pot_Tx - Gan_Ant_Tx) / (-10*log((4*pi*Distancia_Conocida)/lambda,10))))
32
33 }
34 } else {
35     if (ID_Antena==2) {
36         vector_Coef_n2<-c(vector_Coef_n2,((RSSI_Calibrado - Pot_Tx - Gan_Ant_Tx) / (-10*log((4*pi*Distancia_Conocida)/lambda,10))))
37     }
38 }

```

Figura 23: Cálculo de los coeficientes n dependiendo del ID de antena

Una vez que se han calculado todas las muestras, para obtener los coeficientes de ambas antenas lo que se hace es calcular la mediana de los valores de cada vector. Estos serán los valores que se devuelvan:

```

42 if(!is.null(vector)){
43     Coef_n_ant1 = median(vector_Coef_n1)
44 }
45
46 if(!is.null(vector)){
47     Coef_n_ant2 = median(vector_Coef_n2)
48 }

```

Figura 24: Cálculo de los coeficientes n de cada antena

Para evitar fallos de ejecución debidos a que no hubiera ninguna muestra de alguna antena, se utiliza una sentencia *if* de chequeo, como se puede ver en la figura 24.

El resultado de ejecutar un calibrado de prueba lo podemos observar en la figura 25.

```

> DatosCalibrado <- read.csv("DatosCalibrado.csv")
> Coeficientes_n<-Calibrado(DatosCalibrado)
> Coeficientes_n
      Coeficiente_n_antena1 Coeficiente_n_antena2
[1,]                3.045453                3.250083
> |

```

Figura 25: Ejecución de calibrado

3.2.3 Proceso de cálculo de distancia a partir del nivel de RSSI

El algoritmo de este proceso se muestra a continuación:

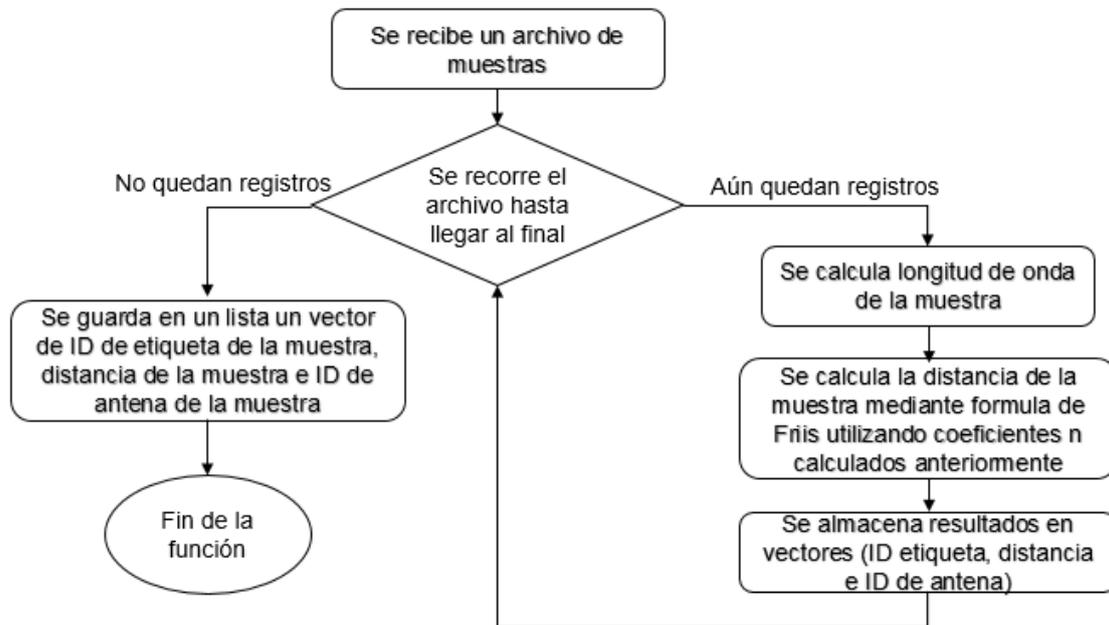


Figura 26: Algoritmo de la función de cálculo de distancias

La función R recibe una tabla de datos procedente de un fichero CSV, así como la matriz de coeficientes n calculada anteriormente:

```
4 FDistancia <- function (Datos, Coeficientes_n) {
```

Figura 27: Encabezado de la función para cálculo de distancias

Los campos indispensables del fichero CSV para el funcionamiento de la función son:

- HEX_EPC: identificador de etiqueta.
- ANTENNA_PORT: identificador de antena. En este caso únicamente tendremos dos antenas, #1 y #2.
- RSSI: valor de RSSI de la muestra, expresado en dBm.
- FREQ: frecuencia de emisión de la antena, expresada en KHz.
- El resto de campos, MUX_PORT, TIME_STAMP, RF_PHASE y READ_COUNT no se utilizan en este proceso de cálculo de distancia.

El funcionamiento de esta función es similar al de la función de calibrado. Se realiza un recorrido del archivo, calculando para cada muestra primero la longitud de onda y posteriormente la distancia mediante la fórmula de Friis:

```
35 | distancia_ant<-c(((lambda/(4*pi))*10^((RSSI - Pot_Tx - Gan_Ant_Tx) / (-10*Coeficientes_n[ID_Antena])))
```

Figura 28: Fórmula de cálculo de la distancia

En cada muestra calculada, se almacenan datos en tres vectores, uno que almacena el ID de la etiqueta de la muestra, otro que almacena la distancia calculada y, finalmente, un tercero que almacena el ID de antena de la muestra. Hay que advertir que los resultados de la distancia se devuelven calculados en metros:

```
38 | vec_distancia<-c(vec_distancia, distancia_ant)
39 | vec_ID_etiqueta<-c(vec_ID_etiqueta, etiquetas[ID_Etiqueta])
40 | vec_ID_antena<-c(vec_ID_antena, ID_Antena)
```

Figura 29: Almacenamiento de distancia por muestra

Finalmente, la función devuelve en una lista estos tres vectores:

```
45 | return (list(vec_ID_etiqueta, vec_distancia, vec_ID_antena))
```

Figura 30: Lista resultado del cálculo de distancias

Al igual que sucedía en la función de calibrado, los valores de potencia de transmisión y de ganancia de antena se han introducido como constantes en la función, pero se podrían haber introducido también como variables en el encabezado de la función.

Como ejemplo de resultado de ejecución de esta función, podemos ver en la *figura 31* que se generan vectores con los ID de etiquetas, distancias e ID de antenas:

```

[113] "acac000000000003" "acac000000000003" "acac000000000003" "acac000000000002"
[117] "acac000000000003" "acac000000000003" "acac000000000003" "acac000000000002"
[121] "acac000000000002" "acac000000000002" "acac000000000003" "acac000000000002"
[125] "acac000000000003" "acac000000000003" "acac000000000003" "acac000000000002"
[129] "acac000000000003" "acac000000000002" "acac000000000002" "acac000000000002"
[133] "acac000000000003" "acac000000000003" "acac000000000003" "acac000000000003"
[137] "acac000000000003" "acac000000000003" "acac000000000002" "acac000000000002"
[141] "acac000000000002" "acac000000000003" "acac000000000003" "acac000000000003"
[145] "acac000000000002" "acac000000000003" "acac000000000003" "acac000000000003"
[149] "acac000000000003" "acac000000000002" "acac000000000006" "acac000000000002"
[153] "acac000000000002" "acac000000000002" "acac000000000003" "acac000000000003"
[157] "acac000000000003" "acac000000000003" "acac000000000002" "acac000000000002"
[161] "acac000000000002" "acac000000000002" "acac000000000003"

[[2]]
[1] 0.1590424 0.1644314 0.1369250 0.2179800 0.2703990 0.2700000 0.2700000 0.2703990
[9] 0.1894617 0.1590424 0.2703990 0.2703990 0.2703990 0.2700000 0.2703990 0.2703990
[17] 0.2700000 0.1369250 0.2700000 0.2703990 0.2912055 0.2703990 0.2700000 0.2339834
[25] 0.4130232 0.2700000 0.1590424 0.2700000 0.1765034 0.4124133 0.1765034 0.1765034
[33] 0.2179800 0.1894617 0.1369250 0.1369250 0.1369250 0.1369250 0.1369250 0.1369250
[41] 0.1369250 0.2700000 0.2179800 0.2700000 0.2179800 0.2700000 0.1369250 0.2700000
[49] 0.1590424 0.2700000 0.2700000 0.4130232 0.2703990 0.2703990 0.2700000 0.1590424
[57] 0.2179800 0.2507087 0.2507087 0.2703990 0.1765034 0.1765034 0.2700000 0.1590424
[65] 0.1369250 0.2703990 0.1590424 0.4950988 0.2703990 0.1715334 0.2179800 0.2700000
[73] 0.2700000 0.4426914 0.2179800 0.1590424 0.1765034 0.4124133 0.1765034 0.4433461
[81] 0.2700000 0.2700000 0.2700000 0.2179800 0.2703990 0.4130232 0.2703990 0.2339834
[89] 0.1765034 0.4950988 0.1369250 0.2179800 0.2339834 0.2339834 0.1369250 0.1590424
[97] 0.1590424 0.4130232 0.2703990 0.2179800 0.1369250 0.1369250 0.2700000 0.1765034
[105] 0.2703990 0.2507087 0.1590424 0.1369250 0.2179800 0.2703990 0.1369250 0.1369250
[113] 0.2179800 0.1369250 0.1590424 0.2700000 0.2339834 0.1590424 0.1765034 0.2703990
[121] 0.2700000 0.2703990 0.1590424 0.2700000 0.2179800 0.2179800 0.1644314 0.2700000
[129] 0.2179800 0.4130232 0.2703990 0.2700000 0.2179800 0.1590424 0.1765034 0.2179800
[137] 0.2179800 0.1369250 0.2700000 0.2700000 0.2703990 0.2179800 0.1765034 0.1590424
[145] 0.2703990 0.1590424 0.1590424 0.1369250 0.1765034 0.2703990 0.4950988 0.2700000
[153] 0.2703990 0.2703990 0.1765034 0.1765034 0.1765034 0.1369250 0.4124133 0.4433461
[161] 0.2700000 0.2703990 0.1369250

[[3]]
[1] 1 2 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 1 1 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2
[44] 1 2 1 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1 2 1 1 2 2 1 2 2 2 1 1 1 2 1 2
[87] 1 2 2 1 1 2 2 2 1 1 1 2 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 2 2 1 2
[130] 2 1 1 2 1 2 2 2 1 1 1 1 2 2 1 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 2 2 1 1 1

```

Figura 31: Captura parcial de los resultados de ejecutar la función de cálculo de distancias

3.2.4 Proceso de cálculo de mediana de la distancia de cada etiqueta

Una vez que se ha obtenido anteriormente un listado de muestras por cada etiqueta y antena, esta función obtendrá un único resultado de etiqueta y antena, calculando la mediana de las muestras anteriores. El esquema del algoritmo será el siguiente:

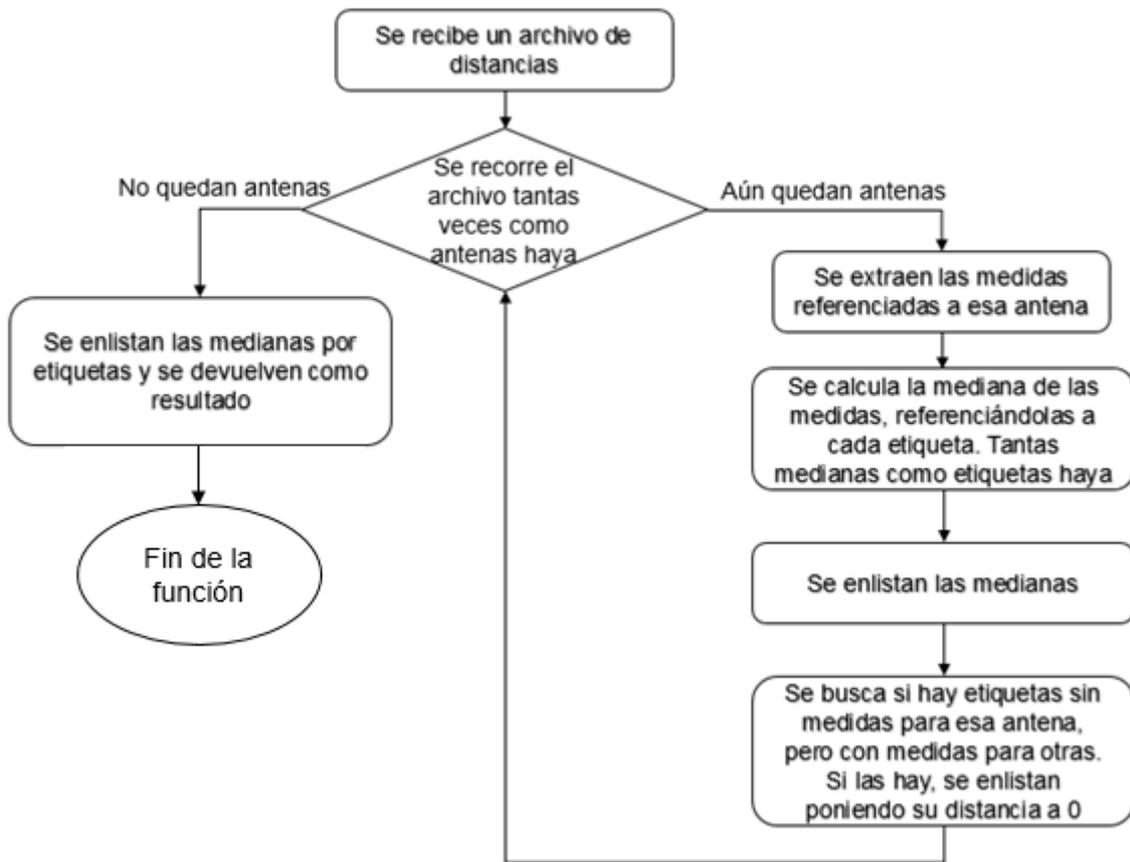


Figura 32: Algoritmo cálculo de mediana de distancias

La función recibirá la lista de distancias calculada en la función anterior:

```
5 FDistMedia<- function (distancia) {
```

Figura 33: Cabecera calculo mediana distancias

Se examinarán el número de antenas que hay y se recorrerá esta lista tantas veces como antenas haya. En cada vuelta de este bucle se extraerán las muestras correspondientes a esa antena guardando ID de etiqueta y distancia en dos vectores. Una vez se hayan extraído todas las muestras de esa antena, lo que se hace es calcular la mediana de las distancias de cada etiqueta. La distancia resultante se pasa a cm:

```
43 distancia_cm<-matrix((tapply(etiqueta_dist[[2]],etiqueta_dist[[1]],median))*100)
```

Figura 34: Cálculo de las medianas por etiqueta

Como puede ocurrir que haya etiquetas que tengan medidas y por tanto distancia calculada con una antena, pero con otras antenas no, se quiere devolver una referencia con cada antena. Entonces, las etiquetas que no tengan calculada distancia con una determinada antena, se les pondrá distancia 0. Para ello, es necesario buscar estas etiquetas.

Primero, se comprueba si el número de etiquetas de las que se ha calculado mediana es menor que el número de etiquetas distintas que tiene el listado. Si es así, se comprueba que para cada una de las etiquetas distintas del listado se ha calculado mediana. Si es así, se indica como verdadero que se ha encontrado la etiqueta. Si no, se pone como falso.

```

50   if (nrow(matrix(distancia_med_cm[[1]])) < nrow(etiquetas)) {
51     for (k in 1:nrow(etiquetas)){
52       etiqueta_encontrada<-F
53       for (m in 1:nrow(matrix(distancia_med_cm[[1]]))){
54         if (distancia_med_cm[[1]][m] == etiquetas[k]) {
55           etiqueta_encontrada<-T
56         } else {
57           if (etiqueta_encontrada==F) {
58             #Se encuentra una etiqueta sin medidas y se guarda su ID
59             etiqueta_sinmed<-etiquetas[k]
60             etiqueta_encontrada<-F
61           }
62         }
63     }

```

Figura 35: Búsqueda de etiquetas que no tengan distancia calculada

En caso que se encuentre una etiqueta sin distancia, lo que se hace es añadirla al listado poniendo su distancia a 0:

```

65   if (etiqueta_encontrada == F) {
66     distancia_med_cm[[1]]<- c(distancia_med_cm[[1]], etiqueta_sinmed)
67     distancia_med_cm[[2]]<- rbind(distancia_med_cm[[2]], 0)
68   }

```

Figura 36: Las etiquetas sin distancia calculada se les pone distancia 0

Como ejemplo, estos serían los resultados de una ejecución de prueba de la función:

```

> dist_ant <- FDistMedia(dist)
> dist_ant
[[1]]
[[1]][[1]]
[1] "acac000000000002" "acac000000000003" "acac000000000006"

[[1]][[2]]
      [,1]
[1,] 27.00000
[2,] 13.69250
[3,] 49.50988

[[2]]
[[2]][[1]]
[1] "acac000000000002" "acac000000000003" "acac000000000006"

[[2]][[2]]
      [,1]
[1,] 41.30232
[2,] 21.79800
[3,]  0.00000

```

Figura 37: Listado de etiquetas y mediana de la distancia de cada una, clasificadas por antena

Como se puede ver, por cada antena aparece primero un listado de las etiquetas y luego un listado de distancias. La posición en el vector de cada etiqueta corresponde con la posición de fila de su distancia. Por ejemplo, para la antena #1, la etiqueta terminada en 003 tendrán una distancia de 13.69250 cm. En la antena #2, la etiqueta terminada en 006 aparece con distancia de 0. Por lo tanto para esta etiqueta en esta antena no hay distancia calculada.

3.2.5 Estimación de posición mediante triángulos

El primero de los métodos para posicionar la etiqueta concluye con esta función. El esquema del algoritmo es el siguiente:

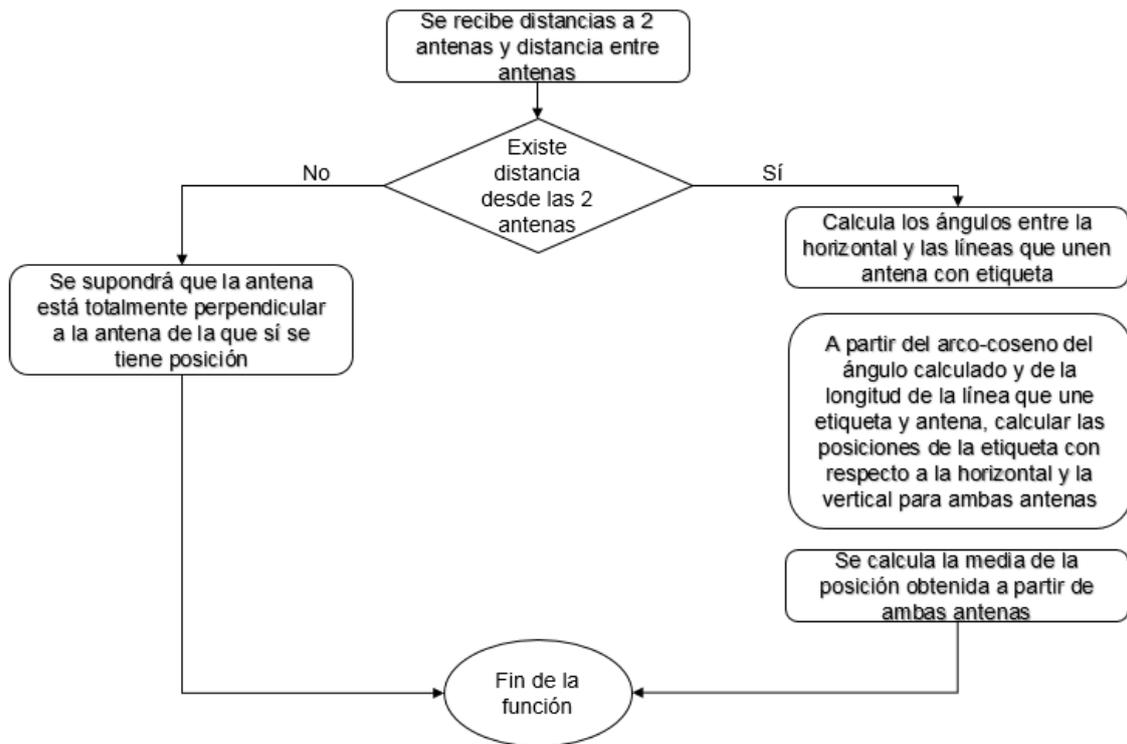


Figura 38: Esquema del algoritmo para calcular posición utilizando trigonometría de triángulos

Se trata de recibir la distancia a la etiqueta desde 2 antenas y la distancia entre los centros de las antenas.

```

5 FTriangulo<- function (dist_ant, Pos_Ant1cm, Pos_Ant2cm) {

```

Figura 39: Cabecera función calculo de posición por ángulos

Sabiendo estos tres datos se puede intentar aplicar el teorema del coseno. La figura 37 muestra el esquema de situación donde se ve el triángulo y los ángulos a calcular.

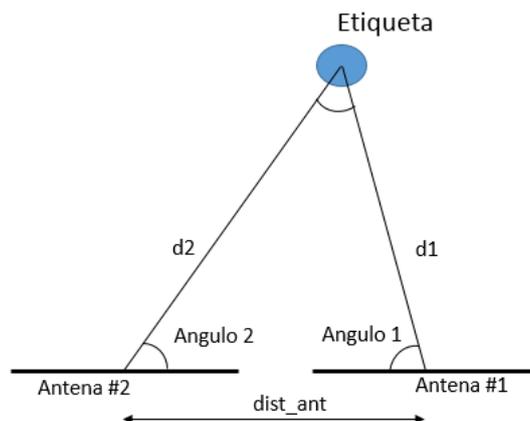


Figura 40: Esquema de triángulo entre antenas y etiqueta

Aplicando el teorema del coseno tendremos que:

$$\cos(\text{Angulo } 1) = \frac{d1^2 + dist_{ant}^2 - d2^2}{2 \cdot d1 \cdot dist_{ant}}$$

Fórmula 9

$$\cos(\text{Angulo } 2) = \frac{d2^2 + dist_{ant}^2 - d1^2}{2 \cdot d2 \cdot dist_{ant}}$$

Fórmula 10

Esas ecuaciones se aplican en la función R para calcular los cosenos de los ángulos:

```

20 #Calculo del coseno del angulo entre la horizontal de las antenas y la linea entre la antena 1 y la etiqueta
21 cos_ang1<-(dist_ant[[1]][2][i]^2 + separa_ants^2 - dist_ant[[2]][2][i]^2) / (2*separa_ants*dist_ant[[1]][2][i])
22
23 #Calculo del coseno del angulo entre la horizontal de las antenas y la linea entre la antena 2 y la etiqueta
24 cos_ang2<-(dist_ant[[2]][2][i]^2 + separa_ants^2 - dist_ant[[1]][2][i]^2) / (2*separa_ants*dist_ant[[2]][2][i])

```

Figura 41: Cálculo de los cosenos de los ángulos

Una vez que se obtienen los cosenos, los ángulos se obtienen con la sentencia `acos` de R (arco-coseno). Conocidos los ángulos, se puede calcular la posición relativa de la etiqueta respecto a la antena y, con ello, también la absoluta:

- Cálculo de la posición relativa respecto al eje X (horizontal de la antena): Por trigonometría se sabe que se puede aplicar la siguiente fórmula a la figura 42:

$$dis_X = \cos(\text{Angulo}) \cdot d$$

Fórmula 11

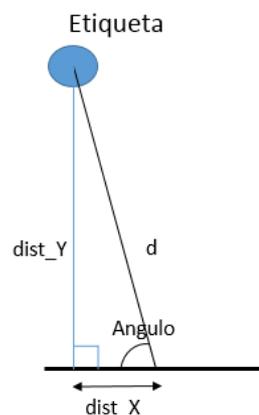


Figura 42

- Para calcular la posición absoluta respecto al eje X, basta con sumar al valor obtenido la distancia del centro de la antena al punto origen

- Cálculo de la posición respecto al eje Y (perpendicular de la antena): Por trigonometría se sabe que se puede aplicar la siguiente fórmula a la figura 42:

$$dis_y = \tan(Angulo) \cdot dist_X$$

Fórmula 12

En la función, para este cálculo de posiciones se tiene en cuenta si el ángulo obtenido anteriormente es menor o mayor de 90 grados, ya que en función de eso, la proyección se tendrá que calcular hacia un lado o hacia otro de la antena. En caso de que el ángulo sea de 90 grados, la posición X relativa a la antena será 0.

```

48  }
49  #Calculo de la longitud de la proyeccion de la linea entre la antena 1 y la etiqueta sobre la horizontal
50  Long_X1 <- (cos(180 - angulo1)*dist_ant[[1]][2][i])
51
52  #Calculo de la posición con respecto a la horizontal de las antenas
53  Pos_X1 <- (Pos_Ant1cm - Long_X1)
54
55  #Calculo de la posición con respecto a la perpendicular de las antenas por tirgonometria
56  Pos_Y1 <- (tan(180 - angulo1)*Long_X1)
57
58  } else {
59  if ((angulo1*(180/pi)) == 90) {
60  #Si el ángulo es de 90, la etiqueta estara perpendicular a la antena
61  Pos_X1 <- c(Pos_Ant1cm)
62  Pos_Y1 <- c(dist_ant[[1]][2][i])
63  }
64  }

```

Figura 43: Cálculo de las coordenadas en base a ángulos

Una vez realizado el proceso con las dos antenas, para calcular una única posición de cada etiqueta, lo que se hace es calcular la media de las coordenadas.

Antes de realizar estos cálculos se comprueba que los dos cosenos obtenidos son menores o iguales a 1. Si alguno es mayor que 1 se descarta la medida respecto a esa antena al suponerse errónea y se supondrá entonces que la etiqueta es perpendicular a la otra antena, al no tener otra medida de distancia para triangular.

A continuación se muestra una ejecución de ejemplo de esta función:

```

> PosTest5 <- FTriangulo(dist_ant, 47, 33)
> PosTest5
[[1]]
[1] "acac0000000000002" "acac0000000000003" "acac0000000000006"

[[2]]
      Distancia X Distancia Y
[1,]    47.00000    41.30232
[2,]    35.70923    11.93747
[3,]    47.00000    49.50988

```

Figura 44: Ejecución de prueba la función de triangulación

Se puede ver, por ejemplo, que se estima que la etiqueta terminada en 003 se encuentra a 35,7 cm del origen del eje X y a 11,9 cm del eje Y:

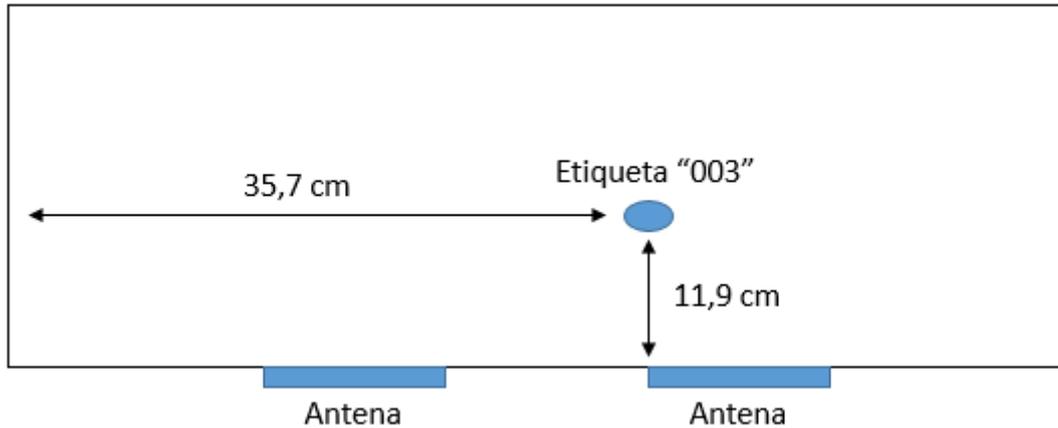


Figura 45: Distancia ejemplo

3.2.6 Cálculo de la mediana de los valores RSSI por etiqueta y antena

Se recibe un fichero de muestras en formato CSV similar al de la función de cálculo de la distancia por medio de la RSSI recibida (puede ser el mismo fichero). Lo que hará es calcular la mediana de los valores RSSI medidos, por ID de etiqueta e ID de antena. El esquema del algoritmo será el siguiente:

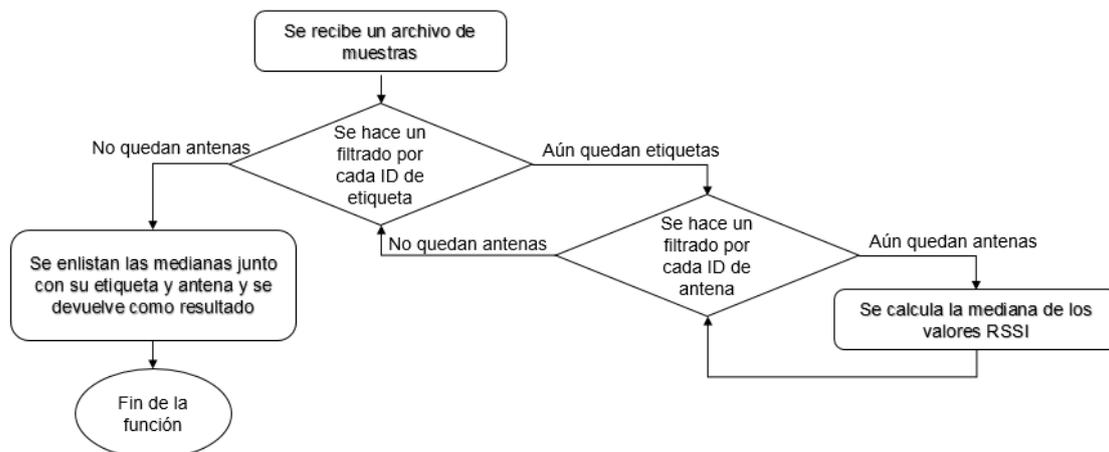


Figura 46: Esquema del algoritmo para cálculo de las medianas de valores RSSI

Los campos indispensables del fichero CSV para el funcionamiento de la función son:

- HEX_EPC: identificador de etiqueta.
- ANTENNA_PORT: identificador de antena. En este caso únicamente tendremos dos antenas, #1 y #2.
- RSSI: valor de RSSI de la muestra, expresado en dBm.
- El resto de campos, MUX_PORT, TIME_STAMP, RF_PHASE, FREQ y READ_COUNT no se utilizan en este proceso de cálculo de las RSSIs.

La función recibirá en la cabecera únicamente la tabla de las muestras:

```
5 FRSSIMedio <- function (datos) {
```

Figura 47: Cabecera de la función para cálculo de medianas RSSI

Lo que hará la función es anidar dos bucles *for* para filtrar por etiqueta primero y por antena después. En el primer bucle, en cada vuelta se filtra por una etiqueta. Dentro de cada una de estas vueltas, se ejecuta el segundo bucle que lo que hace es filtrar en cada vuelta por una antena:

```
21 for (j in 1:Num_etiquetas) {
22   #Extrae los datos filtrando por cada ID de etiqueta
23   filtro_etiqueta<-subset(datos, HEX_EPC== etiquetas[[j]])
24   for (k in 1:Num_antenas) {
25     #Ahora que solo hay datos de una determinada etiqueta lo que hace es separarlos por ID de antena
26     filtro_antena<-subset(filtro_etiqueta, ANTENNA_PORT== antenas[[k]])
27     RSSI<-filtro_antena["RSSI"]
```

Figura48: Filtrado por etiqueta y luego por antena

Una vez se realizan los filtros, se calcula la mediana de los valores RSSI. Si no hubiera datos para esa antena y etiqueta, el valor de RSSI se pone a 0, que es el valor que se ha tomado para representar valor nulo.

```
29   if (nrow(RSSI)>0) {
30     RSSI<-median(RSSI[[1]])
31   } else{
32     #Si no hay datos para esa
33     RSSI<- 0
```

Figura 49: Cálculo de la mediana RSSI

Los resultados se van almacenando en tres sectores, uno para guardar los ID de etiqueta, otro para almacenar las RSSI obtenidas y otro para almacenar el ID de la antena. Estos 3 vectores, al final de la función se enlistan y se devuelven como resultado de la función.

A continuación se puede observar el resultado de la ejecución de esta función a modo de ejemplo:

```

> Datos5 <- read.csv("20150422_Test5.csv")
> listaRSSI <- FRSSIMedio (Datos5)
> listaRSSI
[[1]]
      [,1]
[1,] "acac00000000000002"
[2,] "acac00000000000002"
[3,] "acac00000000000003"
[4,] "acac00000000000003"
[5,] "acac00000000000006"
[6,] "acac00000000000006"

[[2]]
      [,1]
[1,] -62
[2,] -70
[3,] -53
[4,] -61
[5,] -70
[6,]  0

[[3]]
      [,1]
[1,] "1"
[2,] "2"
[3,] "1"
[4,] "2"
[5,] "1"
[6,] "2"

```

Figura 50: Ejecución función calculo mediana RSSI

En el ejemplo se puede ver como la etiqueta terminada en 003 tiene una RSSI de -53 dBm con la antena #1 como para la etiqueta terminada en 006 no se tienen valores con respecto a la antena #2, ya que la RSSI tiene valor 0.

3.2.7 Cálculo de matriz de estimación de RSSI por posición

Esta función realiza una cuadrícula, en este caso de 1cm² cada cuadro, calculando la RSSI estimada en cada uno de esos cuadros. El esquema del algoritmo es el siguiente:

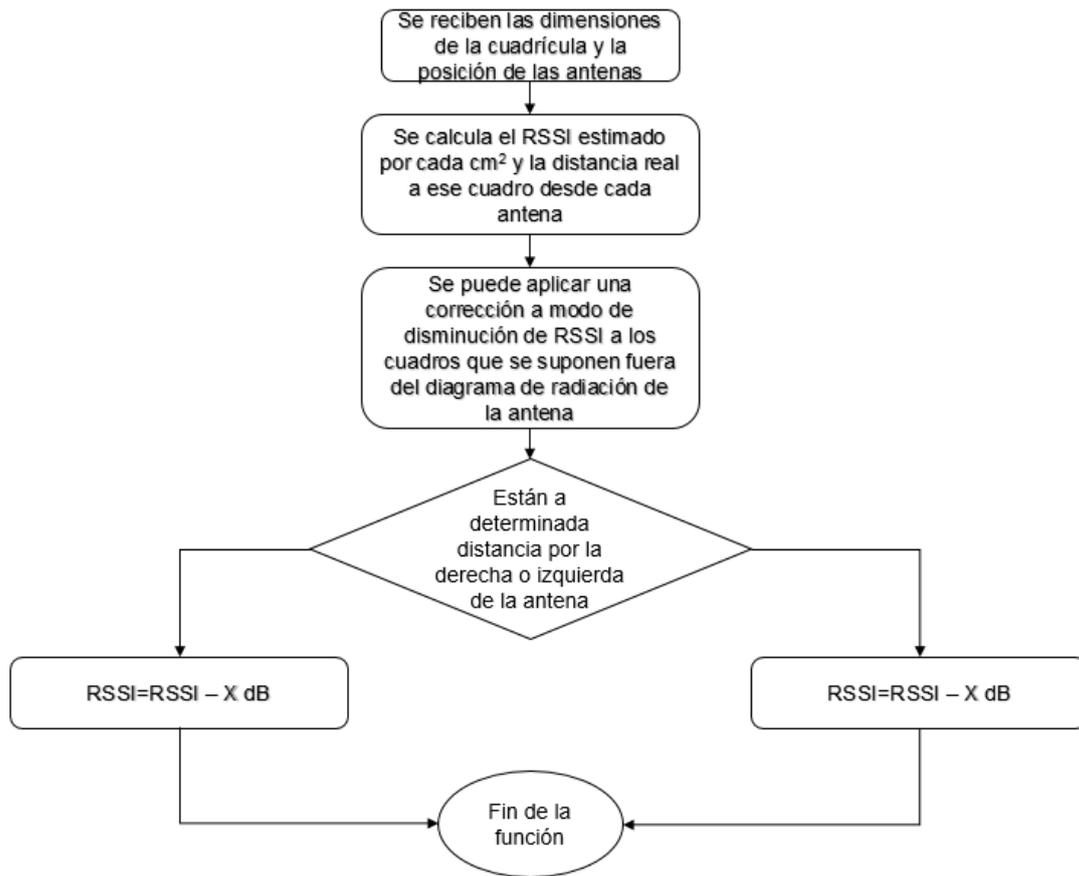


Figura 51: Esquema del algoritmo del cálculo de la cuadrícula

Se reciben las dimensiones de la cuadrícula, las posiciones de las antenas, frecuencias y los coeficientes n calculados anteriormente.

```

23  mallado <- function (LongHcm, LongVcm, Pos_Ant1cm, Pos_Ant2cm, FrecMhz1, FrecMhz2, coef_n1, coef_n2) {
  
```

Figura 52: Cabecera de la función de calculo de cuadrícula

Esta función tiene dos partes. La primera parte lo que hace es posicionar el punto respecto de las antenas, obteniendo la distancia real del punto a las dos antenas. Para ello calcula la posición relativa en el eje X respecto a la antena y calcula la distancia por medio de la fórmula de la hipotenusa y los catetos:

```

39  for (Pos_Hcm in 1:LongHcm) {
40    for (Pos_Vcm in 1:LongVcm) {
41
42      #Calcula la posición horizontal con respecto a la antena 1 en cm
43      Pos_H1cm <- abs(Pos_Hcm - Pos_Ant1cm)
44
45      #Calcula la posición horizontal con respecto a la antena 2 en cm
46      Pos_H2cm <- abs(Pos_Hcm - Pos_Ant2cm)
47
48      #Calcula las distancias del punto a las antenas por la formula de la hipotenusa y los catetos
49      Dist_A1 <- ((Pos_H1cm^2+Pos_Vcm^2)^(1/2))/100
50      Dist_A2 <- ((Pos_H2cm^2+Pos_Vcm^2)^(1/2))/100
  
```

Figura 53: Cálculo de las posiciones del punto

Una segunda parte es la que calcula la RSSI estimada para cada punto. Para ello se utiliza una subfunción que lo que hace es calcular la RSSI estimada mediante la fórmula de Friis.

```

5 valorRssi <- function (ID_Antena, FrecMhz, dist, coef_n) {
6   Pot_Tx<-c(-35)
7   Gan_Ant_Tx<-c(3.2)
8
9   #Caluclua la longitud de onda a partir de la frecuencia
10  lambda=3*10^8/FrecMhz*10^-3
11
12  #Caluclua la RSSI
13  RSSI<-c((Pot_Tx + Gan_Ant_Tx - 10*coef_n*log(((4*pi*dist)/lambda),10)))
14  return (RSSI)
15
16 }

```

Figura 54: Cálculo de la RSSI estimada

Adicionalmente, se puede añadir dentro de la función una rutina para que aplique una corrección en la RSSI de los puntos que están a una determinada distancia por la derecha o por la izquierda de la antena, puntos que se supone que están fuera del diagrama de radiación de la antena.

```

53 if ((Pos_Hcm < (Pos_Ant1cm -10)) || (Pos_Hcm > (Pos_Ant1cm +10))) {
54   #Aplica pérdidas suponiendo que la posición se encuentra fuera del diagrama de radiación
55   RSSI1<-valorRssi(1, FrecMhz1, Dist_A1, coef_n1)-4

```

Figura 55: Corrección de RSSI en 4 dB

A modo de ejemplo, se presenta a continuación el cálculo de una cuadrícula de 80x40 cm, con las antenas situadas a 48 y a 32 cm del origen:

	Coord_X	Coord_Y	Dist_A1	RSSI1	Dist_A2	RSSI2
857	22	17	31.06445	-67.82732	19.723083	-59.59644
858	22	18	31.62278	-68.06293	20.591260	-60.20447
859	22	19	32.20248	-68.30320	21.470911	-60.79493
860	22	20	32.80244	-68.54734	22.360680	-61.36807
861	22	21	33.42155	-68.79465	23.259407	-61.92427
862	22	22	34.05877	-69.04445	24.166092	-62.46404
863	22	23	34.71311	-69.29614	25.079872	-62.98792
864	22	24	35.38361	-69.54918	26.000000	-63.49649
865	22	25	36.06938	-69.80306	26.925824	-63.99036
866	22	26	36.76955	-70.05735	27.856777	-64.47013
867	22	27	37.48333	-70.31164	28.792360	-64.93640
868	22	28	38.20995	-70.56557	29.732137	-65.38975
869	22	29	38.94868	-70.81885	30.675723	-65.83075
870	22	30	39.69887	-71.07117	31.622777	-66.25993
871	22	31	40.45986	-71.32231	32.572995	-66.67781
872	22	32	41.23106	-71.57204	33.526109	-67.08490

Showing 857 to 872 of 3,200 entries

```

Console C:/Users/Sergio/Desktop/UOC/Master en Ingeniería de Telecomunicación/Semestre 8/M1.620 TFM/PEC 3/experim
> malla<-mallado(80,40,48,32,865549,867341,coeficientes_n[1], coeficientes_n[2])
> View(malla)

```

Figura 56: Cuadrícula calculada a modo de ejemplo

3.2.8 Función para acotar la dimensión de la cuadrícula donde buscar

La siguiente función trata de reducir la cuadrícula donde buscar un RSSI aproximado para que sea más fácil localizar la posición y también intentar mejorar la exactitud. El esquema del algoritmo es el siguiente:

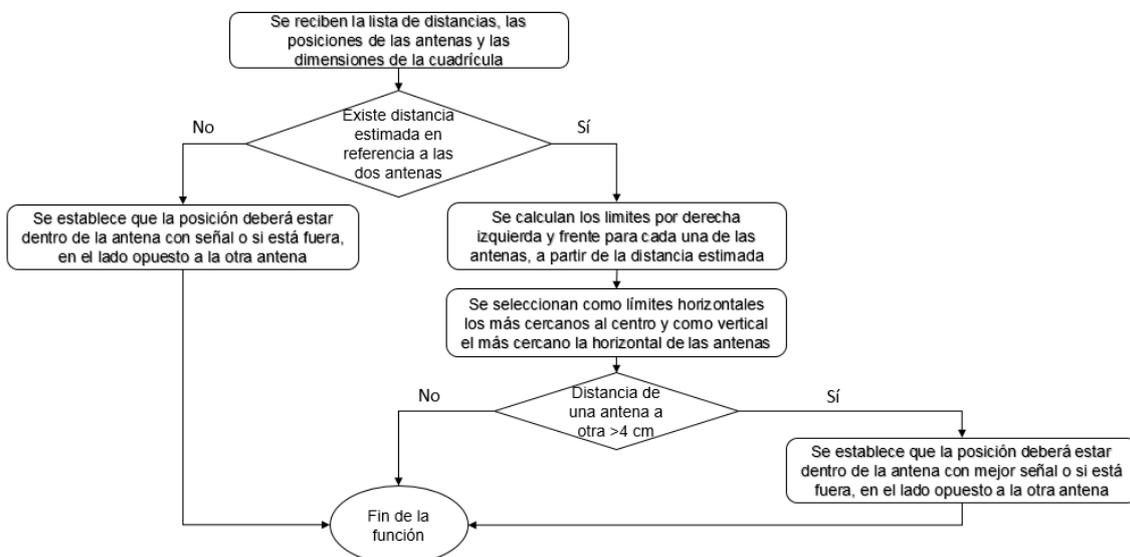


Figura 57: Esquema algoritmo función para acortar cuadrícula

Se reciben la lista de distancias, las posiciones de las antenas y las dimensiones de la cuadrícula:

```
5 FAcotaCuadrícula <- function (distancia, Pos_Ant1cm, Pos_Ant2cm, LongHcm, LongVcm) {
```

Figura 58: Cabecera de la función para acotar la parte de cuadrícula donde buscar

Lo primero que se hace es determinar tres límites en cada antena, uno por la izquierda, otro por la derecha y otro por el centro. Estos tres límites se calculan haciendo un círculo cuyo radio es la distancia calculada a la etiqueta. Una vez obtenidos estos 3 límites por cada antena, se selecciona para los límites de la horizontal los más cercanos al centro y para la vertical los más cercanos a la horizontal de las antenas:

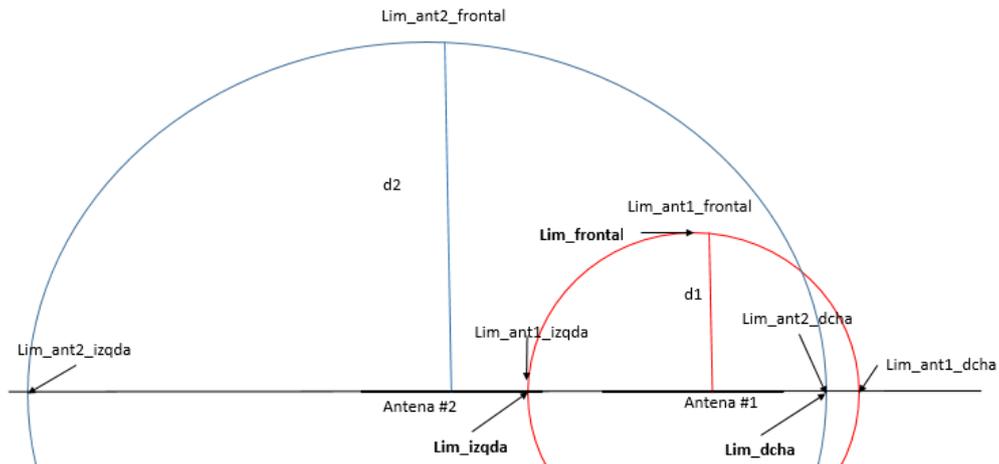


Figura 59: Representación de los límites de búsqueda

Como se puede ver en la *figura 59*, en este caso, los límites horizontales vendrían delimitados por el límite izquierdo de la antena #1 y el límite derecho de la antena #2, mientras que el límite frontal vendría determinado por el límite frontal de la antena #1.

Una vez realizado este primer cálculo de límites, se ha añadido otra rutina para intentar acotar aún más la cuadrícula donde buscar. Para ello se ha supuesto que si la diferencia de distancia estimada de una antena a otra varía mucho (se ha cuantificado en una variación de 4 cm) se supondrá que la etiqueta se encontrará ubicada de la antena más cercana hacia el lado opuesto de la otra. Como se puede ver en la *figura 60*, debido a que la diferencia es mayor de 4 cm, el límite izquierdo se desplaza a la línea naranja, que es donde termina la antena #1

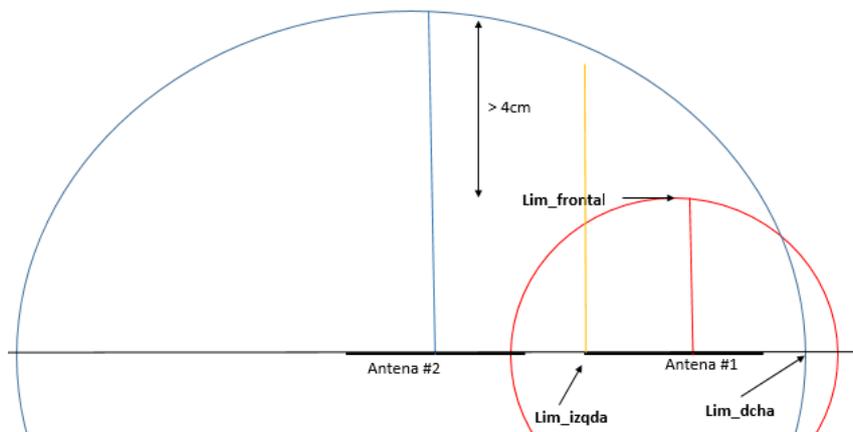


Figura 60: Representación de los límites de búsqueda con diferencias de distancias > 4cm

Por último, en el caso de que sólo exista distancia a una antena, también se toma el anterior supuesto y la posición de la etiqueta se supondrá dentro de la antena de la que se tiene distancia o fuera de la antena pero al lado opuesto a la antena de la que no se tiene señal.

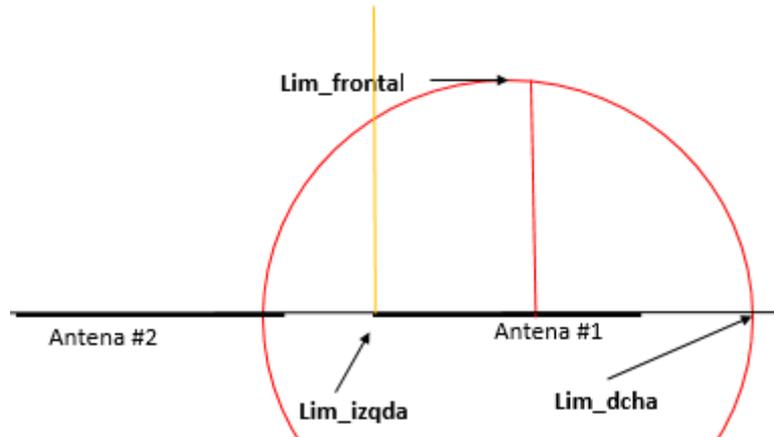


Figura 61: Representación de los límites de búsqueda cuando sólo se tiene distancia a una antena

A modo de ejemplo se presenta la ejecución de la función para el cálculo de límites.

```
> limites <- FAcotaCuadrícula(dist_ant, 48, 32, 80, 40)
> limites
[[1]]
  [,1]
[1,] "acac00000000000002"
[2,] "acac00000000000003"
[3,] "acac00000000000006"

[[2]]
  Limite por izquierda Limite por derecha Limite por frente
[1,]                39                73.30232                27.0000
[2,]                39                53.79800                13.6925
[3,]                39                80.00000                40.0000
```

Figura 62: Ejecución de la función para acotar la cuadrícula

De los resultados se puede ver, por ejemplo, que hay que buscar la etiqueta terminada en 003 en el recuadro delimitado por el límite de 13,69 cm por el frente, 39 cm por la izquierda y 53,79 cm por la derecha.

3.2.9 Encontrar posición en cuadrícula por RSSI estimada

El segundo método para posicionar concluye con esta función. Esta función busca en la cuadrícula calculada previamente una celda con el valor de RSSI

más aproximado al obtenido de la antena en la etiqueta. El esquema del algoritmo es el siguiente:

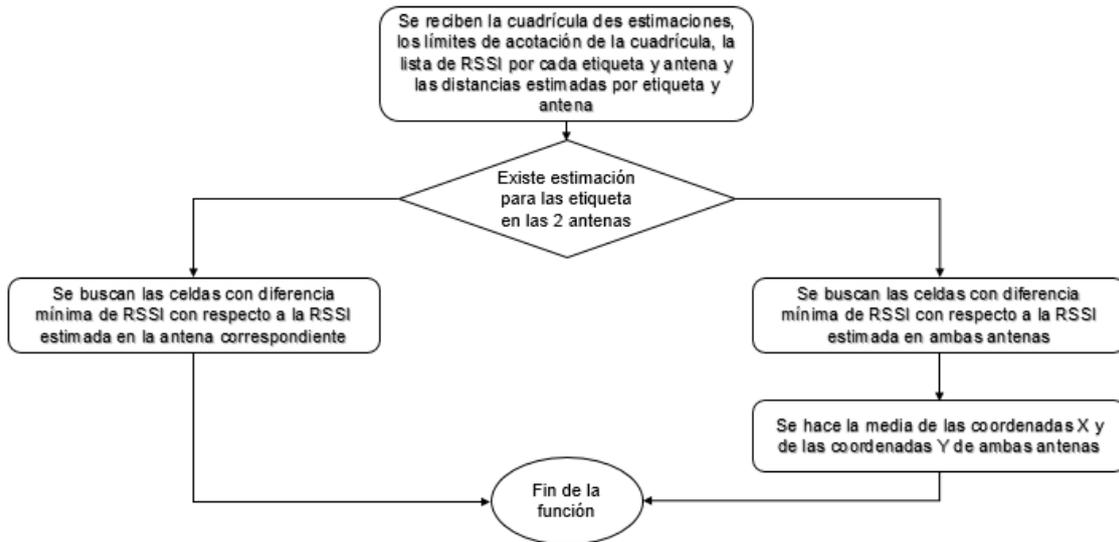


Figura 63: Esquema del algoritmo para buscar la celda con una RSSI más aproximada

La función recibe como datos de entrada la cuadrícula de estimaciones de RSSI calculada anteriormente, los límites de acotación de la cuadrícula para no tener que hacer una búsqueda tan amplia y hacerla más exacta, la lista de RSSI por cada etiqueta y antena y las distancias estimadas por etiqueta y antena.

```

5 FBuscaPosicion <- function (mallado, limites, lista_RSSI, dist_ant) {
  
```

Figura 64: Cabecera de la función de búsqueda de posición en la cuadrícula

La función recorrerá la cuadrícula tantas veces como etiquetas haya, para poder buscar la posición de cada etiqueta. Lo primero que se comprueba es si hay valores de RSSI de esa etiqueta referenciados a ambas antenas. En caso de que sí que los haya, comenzará a recorrer la cuadrícula. Sólo tendrá en cuenta las celdas que están contenidas en los límites de acotación.

```

if ((mallado [[j,1]] >= limites[[2]][i,1]) && (mallado [[j,1]] <= limites[[2]][i,2]) && (mallado [[j,2]] <= limites[[2]][i,3])) {
  
```

Figura 65: Se comprueba que la celda está en los límites de acotación

Se calcula la diferencia entre la RSSI estimada para la celda y la RSSI obtenida por la medición. Esto se hace para las medidas de las dos antenas. Luego se comprueba que la mínima diferencia de RSSI guardada sea menor que esta última. Si esta última es menor, sustituye a la otra como diferencia menor y también se guarda la posición en la cuadrícula o malla:

```

if ((dif1 < min_dif1) &&((mallado [[j,3]] > (dist_ant[[1]][[2]][i]-4)) && (mallado [[j,3]] < (dist_ant[[1]][[2]][i]+4))) {
  min_dif1 <- dif1
  pos_mallal <- j
}

```

Figura 66: Se comprueba que la nueva diferencia de RSSI sea menor que la guardada y entonces se sustituye

Existe la posibilidad de que los límites de acotación estén mal y no se obtenga resultado de posición. En ese caso, y sólo en ese caso, se vuelve a recorrer la cuadrícula eliminando esta vez los límites de acotación.

```

67 |
68 |         if (is.null(pos_mallal)) {
69 |             for(j in 1:n_campos) {
70 |                 if (dif1 < min_dif1) {
71 |                     dif1=abs(lista_RSSI[[2]][(contador-1)]- mallado [[j,4]])
72 |                     if (dif1 < min_dif1) {
73 |                         min_dif1 <- dif1
74 |                         pos_mallal <- j
75 |                     }
76 |                 }
77 |             }

```

Figura 67: Repetición del proceso sin utilizar los límites de acotación

Una vez obtenidas coordenadas X e Y mediante las medidas de ambas antenas, se hace la media de ambos pares de coordenadas para tener un único par de coordenadas.

Si únicamente se tienen medidas de una antena, el proceso es similar, pero únicamente se busca en base a una RSSI y una antena y, por lo tanto, al final solo se tiene un par de coordenadas y no se necesita realizar una media.

A modo de ejemplo se ejecuta una función búsqueda:

```

> coord <- FBuscaPosicion(malla, limites, listaRSSI, dist_ant)
> coord
[[1]]
[1] "acac000000000002" "acac000000000003" "acac000000000006"

[[2]]
      Distancia X Distancia Y
[1,]          56.5         20
[2,]          43.0         11
[3,]          76.0         36

```

Figura 68: Resultado de la función búsqueda en la cuadrícula

En los resultados se puede ver que, por ejemplo, se estima que en la horizontal donde están colocadas las antenas, la antena terminada en 003 está a 43 cm del origen izquierdo y está a 11 cm de la horizontal de las antenas.

3.3 Localización mediante fase

Aunque el estudio se ha centrado principalmente en la localización mediante valores de RSSI, también se quiere analizar, aunque más brevemente, el cálculo de la posición de las etiquetas utilizando el valor de la fase. El sistema, como se verá, es similar al cálculo por valor RSSI por el método de triángulos que se vio anteriormente. De hecho, dos de las funciones se podrán reutilizar para el cálculo mediante la fase, variando únicamente el método de cálculo de la distancia a la antena.

Debido a que el estándar RFID utiliza modulación *PR-ASK* la fase no es de 360° sino que sólo es de 180° , yendo de los 0° a los citados 180° . El principal inconveniente que tiene el cálculo de distancia por medio de la fase es que está limitado a distancias máximas iguales a la longitud de onda. Ya que cuando termina un periodo y empieza el siguiente, la fase vuelve a empezar por 0° , tal como se puede ver en la siguiente figura:

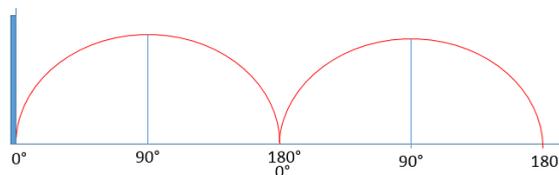


Figura 69: Dos periodos de onda RFID

Así por ejemplo, si la fase es de 90° , no se podría saber sólo con esto si la distancia a la antena es $\lambda/2$, $3\lambda/2$, $5\lambda/2$, etc.

Otro inconveniente de este tipo de cálculo es que una pequeña desviación de la fase en los extremos puede provocar que el valor pase de un valor cercano a 180° a un valor cercano a 0° y viceversa, al cambiar de periodo.

Por lo tanto, un cálculo puro de distancia por medio de la fase deberá limitarse únicamente a distancias como máximo iguales a la longitud de onda de la señal y además no será fiable en distancias muy cortas a la antena.

A continuación se presenta un esquema con las tres funciones empleadas para esta estimación y sus relaciones:

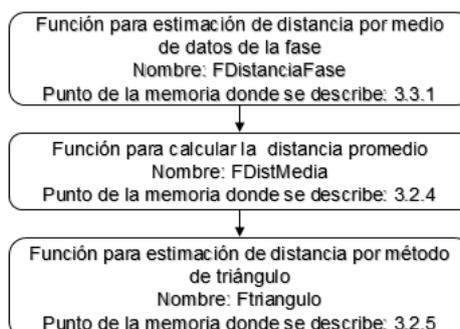


Figura 70: Esquema de relaciones de las funciones para cálculo de posición mediante valores de fase. Muestra su orden y dependencias.

3.3.1 Proceso de cálculo de distancia a partir de la fase

El algoritmo de este proceso se muestra a continuación:

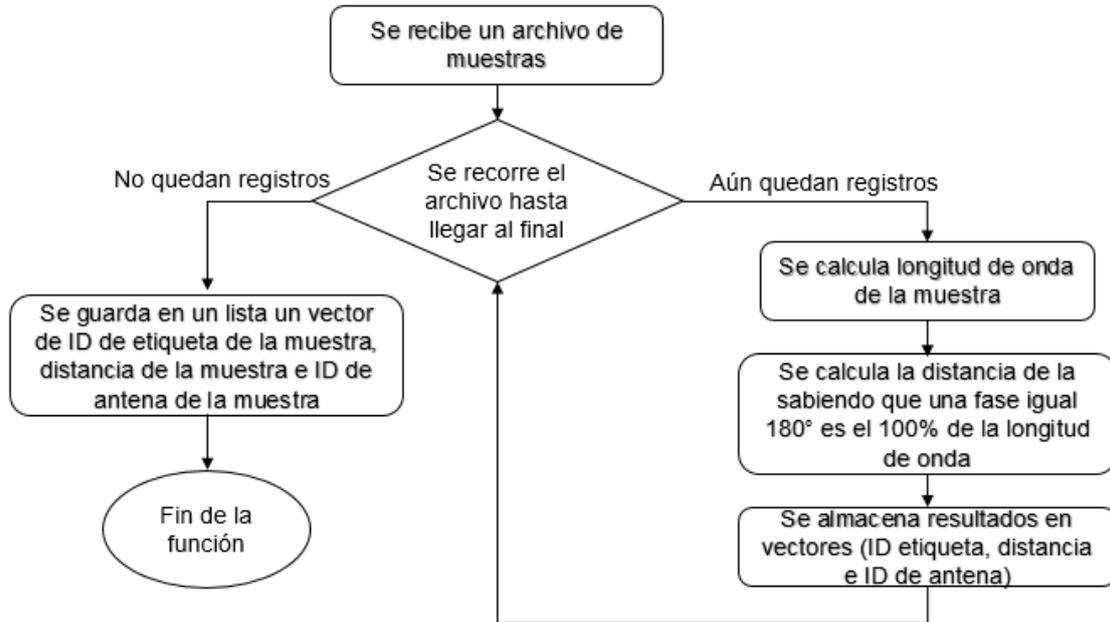


Figura 71: Algoritmo de la función de cálculo de distancias por medio de la fase

La función recibe una tabla de datos procedente de un fichero CSV:

```
4 FDistanciaFase <- function (Datos) {
```

Figura 72: Encabezado de la función para cálculo de distancias por medio de la fase

Los campos indispensables del fichero CSV para el funcionamiento de la función son:

- HEX_EPC: identificador de etiqueta.
- ANTENNA_PORT: identificador de antena. En este caso únicamente tendremos dos antenas, #1 y #2.
- RF_PHASE: valor de la fase expresado en grados.
- FREQ: frecuencia de emisión de la antena, expresada en KHz.
- El resto de campos, MUX_PORT, TIME_STAMP, RSSI y READ_COUNT no se utilizan en este proceso de cálculo de distancia.

El funcionamiento de esta función es similar al de la función de cálculo de distancias por valor RSSI. Varía principalmente la fórmula de cálculo de la distancia, que ahora, sabiendo que la longitud máxima es la longitud de onda

completa que corresponde a una fase de 180°, lo que hace es dividir la fase de la muestra entre 180° y multiplicarlo por la longitud de onda que ha calculado previamente.

```
37 | | distancia_ant<-c((Fase/180)*lambda)
```

Figura 73: Fórmula de cálculo de la distancia utilizando la fase

El otro aspecto a destacar de la función es que, como se ha dicho antes, con ligeras desviaciones de fase, valores cercanos a 0° pueden pasar a valores cercanos a 180° y viceversa, debido a que se pasa de un periodo a otro. La solución para esto es suponer que no se van a calcular distancias muy cerca de la antena y los valores que aparezcan muy cercanos a 0° transformarlos directamente a 180°. Sabiendo que se trabaja con longitudes de onda de unos 35 cm, se establece que los valores de fase inferiores a 15°, que serán longitudes inferiores a 3 cm, se transformen en 180°.

```
31 | | # Si la fase es menor de 15° se modifica por 180°
32 | | if (Fase < 15) {
33 | |     Fase <- c(180)
34 | | }
35 | |
```

Figura 74: Los valores de fase inferiores a 15° se transforman a 180°

Figura 31: Captura parcial de los resultados de ejecutar la función de cálculo de distancias

3.3.2 Reutilización de las funciones de distancia media y triángulo

Una vez que se ha obtenido un listado de distancias mediante la fase, se procederá a emplear las mismas funciones que cuando se calcula la distancia por el método de triángulos empleando valores de RSSI:

- La función de cálculo de distancia media realizará el cálculo de las medianas de las distancias por etiqueta y antena.
- La función triángulo realizará el cálculo de los ángulos para posteriormente calcular las proyecciones y así obtener las coordenadas.

A modo de ejemplo, se muestra el resultado después de realizar una estimación de distancias mediante valores de fase, posteriormente realizar la mediana de las distancias por etiqueta y antena y, por último, realizar una estimación de la posición por el método de triángulos.

```

> dist_ant1 <- FDistMedia(dist1)
> dist_ant1
[[1]]
[[1]][[1]]
[1] "acac000000000002" "acac000000000003" "acac000000000006"

[[1]][[2]]
      [,1]
[1,] 20.94524
[2,] 11.73031
[3,] 16.16514

[[2]]
[[2]][[1]]
[1] "acac000000000002" "acac000000000003" "acac000000000006"

[[2]][[2]]
      [,1]
[1,] 31.77174
[2,] 33.74368
[3,]  0.00000

> FTriangulo(dist_ant1, 47, 33)
[[1]]
[1] "acac000000000002" "acac000000000003" "acac000000000006"

[[2]]
      Distancia X Distancia Y
[1,]    28.75735    18.23800
[2,]    47.00000    33.74368
[3,]    47.00000    16.16514

> |

```

Figura 75: Cálculo de posición a partir de datos de fase

3.4 Análisis de resultados

3.3.1 Estimación de distancia a las antenas

Se tienen seis ficheros de seis muestreos diferentes, cada uno con una distribución distinta de las etiquetas. A continuación se incorporan una serie de tablas de cada uno de los test, donde se recogen los identificadores de etiqueta y antena, la distancia real aproximada y las distancias estimadas mediante el método de RSSI y mediante el método de la Fase. En estos dos campos se refleja entre paréntesis la diferencia en cm de la posición estimada por el método y la distancia real.

TEST 1				
ID etiqueta	ID antena	Distancia aproximada	Distancia estimada RSSI	Distancia estimada Fase
acac0000000000002	1	29,00	30,00 (+1)	17.70 (-11,30)
acac0000000000002	2	29,00	30,00 (+1)	11.72 (-17,28)
acac0000000000003	1	21,50	27,74 (+6,24)	24,83 (+3,33)
acac0000000000003	2	21,50	11,96 (-9,54)	10,19 (-11,31)
acac0000000000006	1	39,00	38,03 (-0,97)	32.01 (-6,99)

TEST 2				
ID etiqueta	ID antena	Distancia aproximada	Distancia estimada RSSI	Distancia estimada Fase
acac0000000000002	1	27,00	35.14 (+8,14)	30.75 (+3,75)
acac0000000000002	2	27,00	30.00 (+3)	20.97 (-6,03)
acac0000000000003	1	17,00	35.14 (+18,14)	27.50 (+10,5)
acac0000000000003	2	17,00	11.08 (-5,92)	12.90 (-4,10)
acac0000000000006	1	37,00	32.51 (-4,49)	32.90 (-4,10)
acac0000000000006	2	37,00	51.24 (+14,24)	10.20 (-26,8)

TEST 3				
ID etiqueta	ID antena	Distancia aproximada	Distancia estimada RSSI	Distancia estimada Fase
acac0000000000002	1	24,00	35,17 (+11,17)	33,46 (+9,46)
acac0000000000002	2	24,00	23.81 (-0,19)	24,80 (+0,80)
acac0000000000003	1	13,00	38,03 (+25,03)	25,94 (+12,94)
acac0000000000003	2	13,00	10,28 (-2,72)	13,46 (+0,46)
acac0000000000006	1	37,00	38,09 (+3,09)	34,33 (-2,67)
acac0000000000006	2	37,00	51,24 (+14,24)	32,88 (-4,12)

TEST 4				
ID etiqueta	ID antena	Distancia aproximada	Distancia estimada RSSI	Distancia estimada Fase
acac0000000000002	1	22,00	35,16 (+13,66)	23,08 (+1,58)
acac0000000000002	2	22,00	16,24 (-5,76)	26,00 (+4)
acac0000000000003	1	9,50	56,57 (+47,07)	12,30 (+2,80)
acac0000000000003	2	9,50	10,27 (+0,77)	13.75 (+4,25)

acac0000000000006	1	37,00	56,57 (+19,57)	34,64 (-2,36)
acac0000000000006	2	37,00	47,47 (+10,47)	8,38 (-28,62)

TEST 5				
ID etiqueta	ID antena	Distancia aproximada	Distancia estimada RSSI	Distancia estimada Fase
acac0000000000002	1	27,00	27,00 (0)	20,95 (-6,05)
acac0000000000002	2	31,00	40,02 (+9,02)	31,77 (+0,77)
acac0000000000003	1	18,00	13,69 (-4,31)	11,73 (-6,27)
acac0000000000003	2	24,00	21,27 (-2,73)	33,74 (+9,74)
acac0000000000006	1	36,00	49,51 (+13,51)	16,16 (-29,84)

TEST 6				
ID etiqueta	ID antena	Distancia aproximada	Distancia estimada RSSI	Distancia estimada Fase
acac0000000000002	1	31,00	23,21 (-7,79)	33,75 (+2,75)
acac0000000000002	2	27,00	28,15 (+1,15)	16,75 (-10,25)
acac0000000000003	2	18,00	16,10 (-1,9)	18,26 (+0,26)
acac0000000000006	2	36,00	37,26 (+1,26)	28,07 (-7,93)

De los resultados obtenidos en cuanto a cálculo de distancia, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- En el test 1 la aproximación de distancia mediante el método de RSSI es bastante buena, salvo en el caso de la etiqueta más cercana, que es en la que mayor error se produce.
- Las distancias calculadas en los test 2, 3 y 4 por el método de RSSI para la antena #1 salen bastante diferentes con respecto a las calculadas para la antena #2. Esto parece indicar que las condiciones de propagación son bastante diferentes para las 2 antenas y que, posiblemente, el sistema no esté bien calibrado en estos test.
- Las distancias calculadas por el método de RSSI para los test 5 y 6 son bastante aproximadas por lo que parece que el calibrado del sistema es bueno.
- Por los cálculos en base a RSSI de los test 1, 5 y 6, se deduce que para distancia cercanas a la longitud de onda (para estos casos aproximadamente 34 cm), disminuye la precisión de los cálculos.
- Cuando el sistema está mejor calibrado, el método de cálculo por RSSI parece más fiable que el cálculo por fase.

- El cálculo por fase tiene problemas en distancias cercanas y en distancias similares a la longitud de onda. Como ya se comentó anteriormente, el problema es que en los extremos, una desviación de la fase puede originar que se salte de un periodo a otro, desvirtuando la estimación.
- Como se puede ver en los resultados de los test 2 y 3, que las condiciones de propagación de las antenas varíen tanto también afecta a la fase. Se puede observar que la estimación de distancia entre una antena y otra para la misma etiqueta es también muy grande utilizando el método de la fase, tal como sucedía utilizando el método de RSSI.

3.3.2 Estimación de posición de las etiquetas

En cuanto a la estimación de la posición, se generan las pruebas para los seis ficheros de test, aunque a priori los test 2, 3 y 4 no van a dar buenos resultados, ya que como se veía anteriormente los cálculos de distancia no salían excesivamente bien puesto que había una alta discrepancia entre una antena y otra. Por lo tanto, se ha de tener atención a la hora de sacar conclusiones en los test 1, 5 y 6.

TEST 1				
ID etiqueta	Coordenadas reales (X/Y)	Coordenadas RSSI triángulos	Coordenadas fase triángulos	Coordenadas RSSI cuadrícula
acac0000000000002	40 / 29	40 / 29	45/11	32/29
acac0000000000003	40 / 20	56 / 7	52/8	24 / 7
acac0000000000006	40 / 38	48 / 38	48 / 32	46 / 38

TEST 2				
ID etiqueta	Coordenadas reales (X/Y)	Coordenadas RSSI triángulos	Coordenadas fase triángulos	Coordenadas RSSI cuadrícula
acac0000000000002	40 / 15	48 / 69,6	48 / 30,7	1 / 1
acac0000000000003	40 / 25,5	38 / 24,9	41 / 17,4	35 / 30
acac0000000000006	40 / 36	48 / 32,5	48 / 32,9	26 / 10,5

TEST 3				
ID etiqueta	Coordenadas reales (X/Y)	Coordenadas RSSI triángulos	Coordenadas fase triángulos	Coordenadas RSSI cuadrícula
acac0000000000002	40 / 23	50,3 / 21,2	44,8 / 22	23,5 / 21
acac0000000000003	40 / 10	48 / 38	49,4 / 12	12 / 3
acac0000000000006	40 / 36	19 / 31,5	43 / 32,5	62,5 / 21,5

TEST 4				
ID etiqueta	Coordenadas reales (X/Y)	Coordenadas RSSI triángulos	Coordenadas fase triángulos	Coordenadas RSSI cuadrícula
acac0000000000002	40 / 15,5	48 / 35,2	45,5 / 22,8	23 / 10
acac0000000000003	40 / 5	48 / 56,6	38,8 / 10,24	12 / 3
acac0000000000006	40 / 36	48,3 / 42,4	48 / 34,6	8 / 35

TEST 5				
ID etiqueta	Coordenadas reales (X / Y)	Coordenadas RSSI triángulos	Coordenadas fase triángulos	Coordenadas RSSI cuadrícula
acac0000000000002	48 / 27	24,2 / 22,8	31,5 / 18,7	54,5 / 23,5
acac0000000000003	48 / 18	37,2 / 11	48 / 33,7	44 / 9
acac0000000000006	48 / 36	48 / 49,5	48 / 16	76 / 36

TEST 6				
ID etiqueta	Coordenadas reales (X/Y)	Coordenadas RSSI triángulos	Coordenadas fase triángulos	Coordenadas RSSI cuadrícula
acac0000000000002	32 / 27	32 / 23,2	48 / 33,7	42 / 23
acac0000000000003	32 / 18	32 / 16,1	32 / 18,3	32,5 / 2
acac0000000000006	32 / 36	32 / 37,2	32 / 28	27 / 37

De los resultados obtenidos en cuanto a cálculo de posición, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- De los test 1, 5 y 6 se ve que se producen más desviaciones en el eje X (donde se sitúan las antenas) que en eje Y donde las coordenadas son más aproximadas.
- Parece que las mayores discrepancias se producen utilizando el método de la cuadrícula.
- En los test 2, 3 y 4 se ve que los valores son mejores de lo esperado para los métodos de triángulos, tanto cuando la distancia se calcula por medio de la RSSI como por la fase. En estos casos las desviaciones no son excesivas. Por el contrario, mediante el método de la cuadrícula, para estos tres test la desviación es muy grande.
- Al implementar las funciones en R y realizar las primeras simulaciones ya se vio que el método de la cuadrícula originaba problemas ya que era poco tolerante a errores y podría haber varias celdas muy separadas con niveles de RSSI muy similar. Por este motivo, se implementaron mecanismos para reducir previamente el área de la cuadrícula antes de realizar la búsqueda.

4. Conclusiones

En este trabajo se trataba de obtener distancias y posiciones de etiquetas RFID. Para ello se han investigado varias líneas y métodos. Se planteaba inicialmente la posibilidad de utilizar dos parámetros para el cálculo. Por una parte la intensidad de la señal recibida por la etiqueta RFID (RSSI) y, por otra, la fase de la señal recibida por la etiqueta. Este trabajo se ha centrado principalmente en la primera opción, aunque también se ha estudiado más brevemente la segunda.

Del cálculo de distancia en base a valores de RSSI se observa que en entornos indoor las condiciones de propagación pueden ser bastante cambiantes y, por lo tanto, falsear bastante las medidas de distancia. Por este motivo, se llega a la conclusión de que durante los procesos de medida es fundamental el calibrar constantemente el sistema. Esto significa que se debería ejecutar un proceso que compruebe los valores de RSSI de varias etiquetas cuya posición será conocida previamente, de tal forma que ajuste constantemente el método de cálculo para minimizar el error.

En relación al cálculo de posición por distancias obtenidas a partir de valores de RSSI se han planteado dos métodos. El primero de ellos, que se ha denominado como método de triángulos, se basa en cálculos trigonométricos. El segundo, planteaba construir una cuadrícula de valores RSSI estimados y luego buscar dentro de ella la posición. De las pruebas realizadas se ha comprobado que en condiciones de buen calibrado del sistema el método de los triángulos ha dado ligeramente mejores resultados, pero ha sido cuando el sistema estaba mal calibrado cuando la diferencia se ha acrecentado. En estos casos el método de los triángulos ha mostrado ser mucho más robusto, dando resultados aceptables, mientras que el método de la cuadrícula daba resultados muy dispares.

Por su parte, el método de los triángulos, pero con cálculo de distancias basado en valores de fase, ha dado resultados parecidos al que se basa en RSSI. El principal problema que se ha visto en este método, y que ya se ha comentado durante el trabajo, es que por sí solo no puede calcular distancias mayores a la longitud de onda de la señal. Para solventar este problema debería complementarse con otros métodos basados, por ejemplo, en uso de valores de RSSI.

En conclusión, la opinión al finalizar el trabajo es que, de los métodos utilizados, el más robusto y fiable dentro de las limitaciones de trabajar en entornos indoor, es el método de los triángulos basado en cálculo de distancia por valores RSSI.

Con respecto a puntos a estudiar y mejorar se plantean los siguientes:

- Combinar métodos de cálculos de distancia basados en RSSI y fase para comprobar si utilizando un promedio de ambos los resultados mejoran o no.

- Disponer de diagramas de radiación detallados de las antenas RFID para intentar optimizar los cálculos de RSSI de las celdas de la cuadrícula, de tal manera que se pueda comprobar si así la fiabilidad de este método mejora.
- Incorporar alguna antena RFID más para ver si con un número mayor de dos antenas las estimaciones mejoran.
- Disponer de escenarios de pruebas distintos donde se distribuyan las antenas de distinta forma para comprobar cómo evolucionan las estimaciones.

Por otra parte, en relación al seguimiento de la planificación del trabajo, se ha de reconocer que después de la segunda entrega parcial y antes de la tercera se acumuló un retraso importante que ha lastrado el desarrollo del trabajo y que ha provocado tener que ir replanificando las actividades hasta la entrega final. En definitiva, la planificación y la metodología no se han seguido, por lo que de cara a futuros proyectos, habrá que replantear si la planificación es realista, habrá que tener en cuenta factores que puedan alterar la planificación e, incluso, tener un plan de contingencia.

5. Glosario

Fase: situación instantánea en el que se encuentra el ciclo de la onda.

Frecuencia: número de veces que se completa un ciclo de una señal por unidad de tiempo.

Modulación: técnicas empleadas para transmitir información sobre una onda portadora.

Media: valor obtenido de sumar todos los valores de un conjunto y dividir el resultado por el número de valores.

Mediana: posición central de un conjunto de valores.

Periodo: tiempo que transcurre entre dos puntos idénticos de una onda.

RFID: Radio Frequency IDentification. Sistema de identificación, almacenamiento y recuperación de datos remoto mediante radio frecuencia.

RSSI: Received Signal Strength Indicator. Indicador de potencia de la señal recibida.

Trigonometría: rama de la matemática que estudia los triángulos y las propiedades de las razones trigonométricas como el seno, coseno o la tangente de los ángulos.

UHF: Ultra High Frequency. Banda del espectro radioeléctrico comprendida entre las frecuencias de 300 MHz a 3 GHz.

6. Bibliografía

- [1] R. Air, I. Protocol, and M. Version, “EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID Specification for RFID Air Interface,” pp. 1–152, 2013.
- [2] P. V. Nikitin, R. Martinez, S. Ramamurthy, H. Leland, G. Spiess, and K. V. S. Rao, “Phase based spatial identification of UHF RFID tags,” *RFID 2010 Int. IEEE Conf. RFID*, pp. 102–109, 2010.
- [3] D. Joho, C. Plagemann, and W. Burgard, “Modeling RFID signal strength and tag detection for localization and mapping,” *2009 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 3160–3165, 2009.
- [4] J. Huiting, H. Flisijn, A. B. J. Kokkeler, and G. J. M. Smit, “Exploiting phase measurements of EPC Gen2 RFID tags,” *2013 IEEE Int. Conf. RFID-Technologies Appl. RFID-TA 2013*, pp. 4–5, 2013.
- [5] D. Brennan and J. Kolaja, “Real time location system using passive UHF RFID,” *Proc. 2014 15th Int. Carpathian Control Conf.*, pp. 58–62, 2014.
- [6] I. Kharrat, Y. Duroc, and M. Awad, “New technique for indoor location based on RSSI method using UHF RFID systems,” *Telecom World (ITU WT), 2011 Tech. Symp. ITU*, 2011.
- [7] F. Seco, K. Koutsou, F. Ramos, and A. R. Jiménez, “Localización personal en entornos interiores con tecnología RFID,” *Rev. Iberoam. Automática e Informática Ind. RIAI*, vol. 10, no. 3, pp. 313–324, 2013.
- [8] A. R. Jiménez Ruiz and J. C. García García, “Sistema para Proporcionar Servicios de Guiado en Espacios Interiores para el Incremento de la Autonomía Personal de Personas Mayores e Invidentes,” 2007.