

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Uso de antenas “leaky-wave” para la mejora de la técnica de “separate-channel fingerprinting” en redes BLE para localización en interiores

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE
TELECOMUNICACIONES

Autor: Antonio David Hernández Mateos

Directores: José Luis Gómez Tornero

Codirectores: José Antonio López Pastor

Alejandro Gil Martínez

Cartagena, 14 de febrero de 2024



Contenido

1. Introducción	6
2. Objetivos	8
3. Caracterización analógica en cámara anecoica de antenas LWA	9
3.1. Resultados obtenidos e interpretación	11
4. Programación de dispositivos BLE.....	14
5. Caracterización digital en cámara anecoica de LWAs y monopolos.....	20
5.1. Resultados obtenidos para LWA en SC y UC.....	21
5.2. Resultados obtenidos para monopolos en SC y UC.....	23
6. Escenario de pruebas	24
7. Resultados obtenidos en el escenario de pruebas	28
7.1. Medidas de RSSI para medidas de calibración en SC	29
7.2. Medidas de RSSI para medidas de calibración en UC.....	30
7.3. Correlación con LWA y monopolos usando como testeo las muestras de calibración para SC y UC.....	31
7.4. Correlación con LWA usando como testeo una muestra del día 1	33
7.5. Errores medios por puntos para cada día de medidas en LWA	34
8. Análisis de resultados.....	36
9. Conclusiones.....	38
10. Bibliografía.....	40

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de conexionado para llevar a cabo la calibración analógica en la cámara anecoica.....	10
Figura 2. a) LWA en la mesa rotatoria de la cámara anecoica. b) Monopolo usado como antena transmisora.	11
Figura 3.a) Parametro S11 de antena 1. b) Diagrama de radiación normalizado de antena 1. c) Diagrama de radiación en coordenadas polares de antena 1.....	13
Figura 4.a) Parametro S11 de antena 3. b) Diagrama de radiación normalizado de antena 3. c) Diagrama de radiación en coordenadas polares de antena 3.....	14
Figura 5.Distribucion frecuencial de los canales en BLE.....	15
Figura 6. Módulo Sena Parani-UD100	15
Figura 7. Arquitectura de Bluetooth Low Energy	16
Figura 8. a) Contenido de la cabecera de la PDU de un paquete BLE. b) Contenido de la carga útil de la PDU de un paquete BLE	17
Figura 9. Comunicación BLE entre transmisor y receptor	19
Figura 10. a) LWA con módulos BLE en ambos puertos. b) Monopolo con módulo BLE. c) LWA en mesa giratoria de cámara anecoica, d) Monopolo en mesa giratoria de cámara anecoica.....	21
Figura 11. Diagrama de radiación para LWA1 a) SC en coordenadas cartesianas sin normalizar; b) SC normalizado en coordenadas cartesianas; c) SC normalizado en coordenadas polares	22
Figura 12. Diagramas de radiación para LWA1 a) UC en coordenadas cartesianas; b) Comparativa entre UC y promediado de SC en coordenadas cartesianas; c) UC en coordenadas polares; d) Promediado de SC en coordenadas polares.....	22
Figura 13. Diagrama de radiación para LWA2 a) SC en coordenadas cartesianas sin normalizar; b) SC normalizado en coordenadas cartesianas; c) SC normalizado en coordenadas polares	22
Figura 14. Diagrama de radiación para LWA2 a) UC en coordenadas cartesianas; b) Comparativa entre UC y promediado de SC en coordenadas cartesianas; c) UC en coordenadas polares; d) Promediado de SC en coordenadas polares.....	23
Figura 15.Diagrama de radiación del monopolo a) SC en coordenadas cartesianas en plano H; b) SC en coordenadas polares en plano H	23
Figura 16. Diagramas de radiación del monopolo a) UC en coordenadas cartesianas en plano H; b) Comparativa entre promediado de canales en SC y UC en coordenadas cartesianas en plano H; c) UC en coordenadas polares en plano H; d) Promediado de SC en coordenadas polares en plano H.....	24

Figura 17. a) Esquema del escenario; b) Imagen del escenario; c) Imagen del escenario con muebles	25
Figura 18. Estimación teórica de potencias en SC para a) LWA1 P1 CH39; b) LWA2 P1 CH39; c) LWA1 P1 CH38; d) LWA2 P1 CH38; e) LWA1 P1 CH37; f) LWA2 P1 CH37; g) LWA1 P2 CH37; h) LWA2 P2 CH37; i) LWA1 P2 CH38; j) LWA2 P2 CH38; k) LWA1 P2 CH39; l) LWA2 P2 CH39	26
Figura 19. Estimación teórica de potencias en UC para a) LWA1 P1; b) LWA2 P1; c) LWA1 P2; d) LWA2 P2	26
Figura 20. Estimación teórica de potencias en SC para a) Monopolo1 CH39; b) Monopolo2 CH39; c) Monopolo1 CH38; d) Monopolo2 CH38; e) Monopolo1 CH37; f) Monopolo2 CH37; g) Monopolo3 CH37; h) Monopolo4 CH37; i) Monopolo3 CH38; j) Monopolo4 CH38; k) Monopolo3 CH39; l) Monopolo4 CH39	27
Figura 21. Estimación teórica de potencias en UC para a) Monopolo1; b) Monopolo2; c) Monopolo3; d) Monopolo4	27
Figura 22. a) Entorno de medidas con montaje de antenas en el techo. b) Antena LWA en techo. c) Monopolo en techo. d) Monopolo transmisor. e) Entorno de medidas con obstáculos.....	28
Figura 23. Diagrama de radiación mediante SC para a) LWA1 P1 CH39; b) LWA2 P1 CH39; c) LWA1 P1 CH38; d) LWA2 P1 CH38; e) LWA1 P1 CH37; f) LWA2 P1 CH37; g) LWA1 P2 CH37; h) LWA2 P2 CH37; i) LWA1 P2 CH38; j) LWA2 P2 CH38; k) LWA1 P2 CH39; l) LWA2 P2 CH39	29
Figura 24. Diagrama de radiación mediante SC para a) Monopolo1 CH39; b) Monopolo2 CH39; c) Monopolo1 CH38; d) Monopolo2 CH38; e) Monopolo1 CH37; f) Monopolo2 CH37; g) Monopolo3 CH37; h) Monopolo4 CH37; i) Monopolo3 CH38; j) Monopolo4 CH38; k) Monopolo3 CH39; l) Monopolo4 CH39	30
Figura 25. Diagrama de radiación mediante UC para a) LWA1 P1; b) LWA2 P1; c) LWA1 P2; d) LWA2 P2	30
Figura 26. Diagrama de radiación mediante UC para a) Monopolo1; b) Monopolo2; c) Monopolo3; d) Monopolo4	31
Figura 27. Correlación de las medidas de calibración consigo mismas para LWA en SC.....	31
Figura 28. Correlación de las medidas de calibración consigo mismas para LWA en UC	32
Figura 29. Correlación de las medidas de calibración consigo mismas para Monopolos en SC	32
Figura 30. Correlación de las medidas de calibración consigo mismas para Monopolos en UC	32
Figura 31. Correlación interpolada para a) LWA – SC; b) LWA – UC; c) Monopolos – SC; d) Monopolos – UC	33
Figura 32. Errores medios de diferentes días para LWA en SC	34

Figura 33. Errores medios de diferentes días para LWA en UC	35
Figura 34. Errores medios de diferentes días para monopolos en SC	35
Figura 35. Errores medios de diferentes días para monopolos en UC.....	36
Figura 36. a) Evolución temporal de las medidas de la media del error; b) Evolución temporal del error cuadrático medio; c) Evolución temporal de la media del error sin muebles; d) Evolución temporal de la media del error con muebles; e) Evolución temporal del error cuadrático medio sin muebles; f) Evolución temporal del error cuadrático medio con muebles	38

Índice de Tablas

Tabla 1. Parámetros S y ángulos de apertura de la LWA1	11
Tabla 2. Parámetros S y ángulos de apertura de la LWA2	11
Tabla 3. Parámetros S y ángulos de apertura de la LWA3	12
Tabla 4. Parámetros S y ángulos de apertura de la LWA4	12
Tabla 5. Parámetros S y ángulos de apertura de la LWA5	12
Tabla 6. Ficha técnica del módulo Sena Parani-UD100.....	16
Tabla 7.HCI_LE_Set_Advertising_Parameters.....	17
Tabla 8.HCI_LE_Set_Advertising_Data.....	18
Tabla 9.HCI_LE_Set_Scan_Parameters.....	19
Tabla 10.Resumen de resultados	37

1. Introducción

Dentro del paradigma de la Internet de las Cosas (IoT), la localización de dispositivos móviles en interiores usando redes de comunicaciones inalámbricas, es una de las tecnologías habilitadoras claves para el desarrollo de nuevas aplicaciones en aquellos espacios en los que el GPS no proporciona suficiente resolución espacial [1], [2]. Dentro de las redes inalámbricas disponibles, se suelen usar redes de área local (WLAN) como WiFi (IEEE 802.11) [3] y también redes de área personal (WPAN) como Bluetooth (IEEE 802.15) [4]. En particular, el estándar “Bluetooth Low Energy” (BLE) está concebido para comunicaciones y localización en interiores más eficientes, usando unos emisores llamados “beacons” que actúan como radiobalizas [5], [6]. “Fingerprinting” (FP) es una de las técnicas más aplicadas, tanto usando puntos de acceso WiFi [7] como “beacons” BLE [8].

En ambos casos, primeramente se calibra un mapa de los niveles de potencia o RSSI (“Received Signal Strength Indicator”) medidos en diferentes coordenadas (x,y) del espacio de interés (“radiomap”), que es usado en la fase de localización como base de datos de comparación para estimar la posición desconocida del dispositivo móvil. Cuanta más diversidad espacial se obtenga con los beacons, mejores prestaciones se consiguen a la hora de localizar los dispositivos móviles mediante la técnica de FP. Para ello, una posibilidad es aumentar el número de beacons y usar antenas direccionales, que sean capaces de dividir el espacio en sectores independientes u ortogonales [9]-[11]. Para minimizar el número de beacons, una opción es usar “switched beam antennas” (SBA) [12]-[15].

En estos sistemas, varias antenas directivas son agrupadas en un único punto, y un único beacon conmuta de forma secuencial entre ellas para adquirir la RSSI conforme se iluminan diferentes sectores espaciales. La complejidad de estas antenas es elevada, ya que requieren de una agrupación sectorial de numerosas antenas, y de circuitos de control para conmutar y adquirir la señal secuencialmente, con lo que además se necesita un tiempo de adquisición que aumenta conforme se eleva el número de antenas que conmutar. Por otro lado, recientemente se ha propuesto la técnica de “separate-channel fingerprinting” (SCF) para mejorar las prestaciones del FP convencional [16]-[23]. Hay que tener en cuenta que los beacons BLE usan tres canales de señalización o “advertising” distintos (canal #37, #38 y #39, con frecuencias centrales 2402 MHz, 2426 MHz y 2480 MHz, respectivamente) [5]), a la hora transmitir las tramas para la radiolocalización. De forma automática, los beacons realizan saltos secuenciales entre estos canales (“channel hopping”) para así minimizar las posibles interferencias con otras señales presentes en el saturado espectro electromagnético de la banda ISM de 2.4 GHz (en el que conviven muchos tipos de redes inalámbricas, como WiFi, Zigbee, Bluetooth...).

La técnica normal de FP con BLE no asocia las RSSI recibidas según el canal que se haya usado; por eso se la denomina también “aggregate channel BLE”. Sin embargo, tal y como se ha demostrado en [16]-[23], se puede usar la diversidad espacial que proporciona la separación de canales para que el FP proporcione mejores resultados a la hora de estimar la posición. Un aspecto clave es programar los beacons para realizar el salto de

canal o “channel hopping” de forma controlada, y que los receptores BLE puedan identificar el canal usado a la vez que se recibe la RSSI correspondiente. Hay que notar que BLE no proporciona el canal BLE usado cuando se recibe una trama de señalización y se obtiene la RSSI, por lo que hay que insertar esta información de alguna manera, tal y como se propone en diferentes trabajos como [16], [24].

El motivo es que cada canal de “advertising” sufre una propagación multicanal diferente ya que ésta es dependiente de la frecuencia debido al “frequency-selective fading”. Por lo tanto, separando los canales se puede aprovechar tal diversidad espacial del canal radio. La diversidad frecuencial del canal radio ya había sido usada para mejorar la estimación angular en [25] o la estimación de “ranging” (distancia) con RSSI en [26] usando agrupaciones de antenas, o en [27] para mejorar la estimación del tiempo de vuelo “Time-of-Flight” mediante el parámetro RTT (“Round Trip Time”).

En este TFG se pretende mejorar las prestaciones de la técnica “separate-fingerprinting” (SPF) en redes BLE, mediante el uso de antenas leaky-wave (LWA, “Leaky-Wave Antennas”) que presentan diagramas de radiación muy variables en los tres canales de BLE. El Grupo de Electromagnetismo Aplicado a las Telecomunicaciones (GEAT) de la UPCT, ha desarrollado este tipo de antenas LWA para localizar el ángulo de llegada de señales radioeléctricas realizando saltos de canal de frecuencia y comparando los niveles de RSSI recibidos en los diferentes canales [28]-[30]. Estos sistemas se han mostrado muy eficientes cuando se ha aplicado en redes inalámbricas de sensores (WSN) de tipo Zigbee (IEEE 802.15.4) [31], redes de área local (WLAN) de tipo Wi-Fi (IEEE 802.11) [32]-[33], sensores pasivos RFID y sensores activos LoRa en la banda de UHF [35]-[38], y también con radiobalizas o beacons BLE [39]-[41].

Todos estos diseños de sistemas de antenas [31]-[41] operan en bandas por debajo de 6 GHz (bien banda UHF de 900 MHz para RFID y LoRa, 2.45 GHz para WiFi, Zigbee y BLE, y la banda de 5 GHz para WiFi). De la misma forma, se han realizado diseños para sistemas ultra-wide band (UWB) operando de 5 GHz a 8 GHz [42], y de antenas en bandas milimétricas para RADAR [43], [44]. Además, de las antenas LWA, el grupo GEAT ha desarrollado sistemas de antenas para localización en redes WiFi, usando agrupaciones de antenas comerciales directivas, bien de forma distribuida [45], o en configuración compacta monopulso [46]-[48].

Tal y como se explica en [49], las LWAs permiten realizar diseños más compactos y con mejores prestaciones que las agrupaciones de antenas. Además, las antenas LWA se pueden realizar tanto en tecnología impresa [30], [50]-[54], como en tecnología guía de onda [55], o en tecnologías híbridas que combinan guías y circuitos impresos [56]-[60], o en guía de onda integrada en substrato SIW (“Substrate Integrated Waveguide”) [61]-[67]. Además, las antenas LWA pueden ser conformadas en superficies curvas para adaptarse al chasis de vehículos y las formas de las paredes [68]-[74], y se pueden controlar sus propiedades de dispersión para controlar el desenfoque del haz con la frecuencia (“frequency-beam squint”) [75]-[80].

En cualquier caso, los diseños de LWAs son más compactos y sencillos que las técnicas más convencionales de antenas multi-haz usadas para localización, como los arrays o agrupaciones de antenas que deben ser conmutadas y usan normalmente complicadas redes de alimentación y lentes [81]-[87], o circuitos reconfigurables para escanear el haz [88]-[91]. Como contraprestación, las LWA obligan a usar técnicas de salto de canal de frecuencia para poder escanear los haces directivos en el espacio [28]-[30], [49], y esto no siempre se puede realizar.

En este proyecto se pretende usar unas antenas LWA con diversidad frecuencial en la banda de BLE (2.4 GHz – 2.45 GHz) diseñadas anteriormente [32], [39], para demostrar que permiten aumentar la diversidad espacial entre canales BLE. Este aumento de la diversidad frecuencial del canal radio resultante, puede aumentar las prestaciones de la técnica de SPF con BLE, proporcionando una mejor localización de dispositivos móviles con un mínimo de beacons BLE. Además, hay que resaltar que las antenas LWA realizan el barrido espacial de forma pasiva, simplemente por su respuesta dispersiva que enfoca cada canal BLE en una dirección distinta. Por lo tanto, se evitan técnicas de antenas reconfigurables activas como las SBA de [12]-[15], que como se comentó requiere de circuitos de control, lo cual implica un mayor coste, complejidad y consumo de potencia. Además, es una técnica más eficiente ya que no hay que realizar una conmutación entre antenas, sino que una misma antena proporciona tantos haces como canales se usen.

En nuestro caso, con tres canales BLE de “advertising”, la antena LWA debe generar tres haces directivos escaneados angularmente. Si los resultados son positivos, el sistema proporcionará una estimación de la posición 2D de los dispositivos Bluetooth con buena precisión espacial, siendo un diseño de menor coste que los actuales y con una mayor eficiencia energética, lo que redundará en un menor consumo eléctrico y una mayor autonomía de los sensores para una IoT más ecológica y sostenible [30].

2. Objetivos

El principal objetivo de este TFG es demostrar la utilidad de antenas de onda de fuga (“leakywave antenna”, LWA) para mejorar la técnica de “fingerprinting” usada en redes inalámbricas de tipo BLE (“Bluetooth-Low Energy”) para la localización en interiores de dispositivos móviles. Para ello, se usarán unas LWA diseñadas en trabajos anteriores para estimación angular en redes WiFi en la banda de 2.4 GHz, y se conectarán con beacons BLE comerciales que deben ser programados para permitir separar los tres canales de “advertising” usados en BLE (canales #37, #38 y #39). Se pretende validar experimentalmente la mejora en la localización bidimensional (coordenadas x,y) gracias al uso conjunto de antenas LWA con técnicas de “separate-channel BLE fingerprinting” frente al uso de las antenas tradicionales.

También se tiene como objetivo de este trabajo la comparación del uso de técnicas “Separate Channel” (SC) y “Unified Channel” (UC) para la localización de dispositivos, es decir, distinguiendo entre los canales de advertising transmitidos (SC) o transmitir los canales sin distinguir cuál de los tres canales se transmite (UC). Todo ello con el fin de

comparar la efectividad de las LWA frente a los monopolos empleados actualmente, por lo tanto, en las pruebas que se irán realizando a lo largo del proyecto se emplearán los dongles BLE programados con los monopolos y las LWA.

Para el correcto cumplimiento de los objetivos mencionados anteriormente, se ha realizado una serie de pasos incrementales. Primero se comenzó con la caracterización analógica en la cámara anecoica de las antenas que se emplearán en el proyecto, y en especial de entre todas las LWA disponibles, elegir dos de ellas que mejor se adaptasen a nuestras necesidades del proyecto, es decir, elegir las que tuviesen una mayor diversidad espacial. Una vez caracterizadas y escogidas las antenas, es de vital importancia la programación de los dispositivos BLE que emplearemos conectados a las antenas con el fin de poder configurar la capa física de la transmisión, la configuración de los paquetes para poder controlar en que frecuencia (canales) se transmiten y también el contenido de estos. Tras la programación de los dongles BLE, se ha de realizar una caracterización digital en la cámara anecoica, tanto para la técnica SC como para UC y así comprobar los resultados obtenidos de dichas antenas y su comportamiento según los canales empleados. Una vez realizada la caracterización digital, se da paso al diseño de la zona de pruebas y los puntos en los que se realizarán las medidas con y sin objetos, tanto para SC como UC y comparando el uso de monopolos con las LWA. Una vez realizados todos los pasos anteriores, se pasa a procesar los datos obtenidos por Matlab con el fin de obtener unos mapas de calor de la zona de pruebas para cada canal y antena y así poder concluir si el uso de LWA permite una mejora en los sistemas de localización en interiores usando BLE.

3. Caracterización analógica en cámara anecoica de antenas LWA

En la primera fase de este trabajo estudiamos el comportamiento analógico de las diferentes LWA que el Grupo de investigación ya tenía fabricadas previamente y de entre las cuales, seleccionaremos las dos más convenientes para el proyecto en función de sus diagramas de radiación y parámetros de reflexión para las frecuencias en las que se encuentran nuestros canales de “advertising” (canal #37, #38 y #39, con frecuencias centrales 2402 MHz, 2426 MHz y 2480 MHz, respectivamente).

Antes de caracterizar analógicamente las antenas, se necesita un paso previo que consiste en la calibración analógica de los cables que conectan el analizador vectorial de redes (VNA) con las antenas LWA que vamos a caracterizar y con la antena de referencia, en nuestro caso un monopolo. Este paso es necesario para obtener una caracterización analógica correcta evitando reflexiones en los cables, así como tener en cuenta las pérdidas de potencia que puedan llegar a introducir y que pueden dar lugar a errores durante la caracterización de las LWA. Para ello, se debe configurar el VNA en una escala de 2 a 3 GHz ya que es el rango de frecuencias alrededor del cual se encuentra nuestra frecuencia de interés de en las que se están comprendidos nuestros canales de “advertising”. En la configuración del VNA indicamos que se trata de una calibración de dos puertos y elegimos el kit de calibración deseado. Para la calibración de los cables empleamos el kit de calibración 85052B con el que conectamos unas cargas a los extremos de los cables donde

han de ir conectadas las antenas para así poder calibrarlos. Dichas cargas empleadas en la calibración son: corto (short), abierto (open) y carga adaptada. Una vez caracterizado el cable que se conecta a las LWA y el cable que se conecta a nuestra antena de referencia, los conectamos entre sí mediante un adaptador “through”.

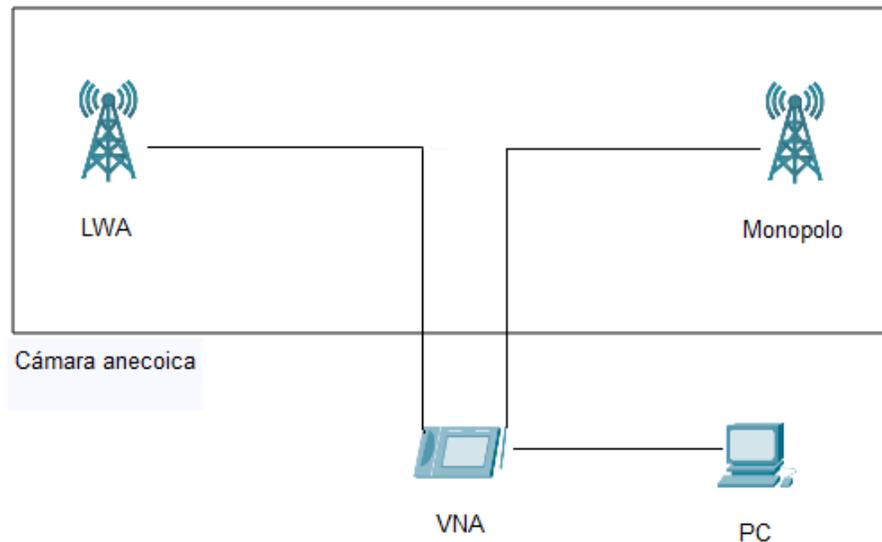


Figura 1. Esquema de conexionado para llevar a cabo la calibración analógica en la cámara anecoica.

Tras la calibración de las pérdidas del cable, continuamos con el montaje de las antenas en la cámara anecoica tal y como se puede ver en Figura 2 y que teniendo en cuenta la Figura 1 de conexionado en la cámara cabe destacar que el cable que une la VNA con la LWA mide uno de los dos puertos de la antena mientras que en el puerto de la antena en el que no estamos midiendo se conecta una carga adaptada para evitar reflexiones que puedan interferir en la correcta medida del puerto contrario. Cabe destacar que la LWA se encuentra en la mesa giratoria de la cámara anecoica y que, a la hora de posicionar las antenas dentro de la cámara, estas están colocadas teniendo en cuenta sus polarizaciones para poder tener una comunicación lo más efectiva posible.

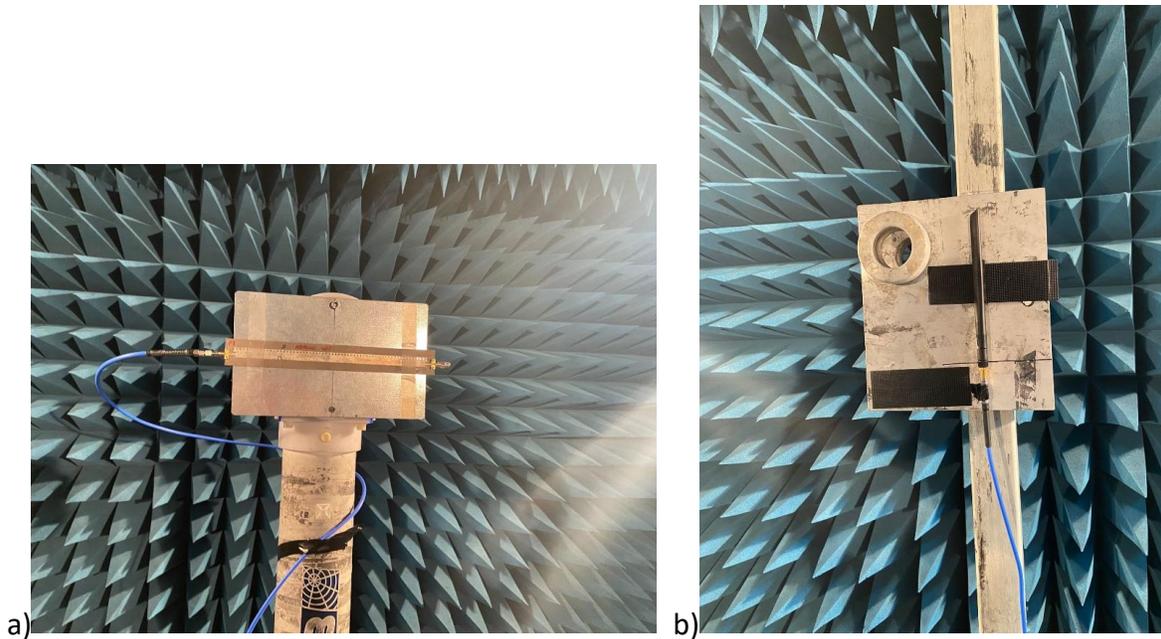


Figura 2. a) LWA en la mesa rotatoria de la cámara anecoica. b) Monopolo usado como antena transmisora.

Una vez calibrados los cables de la cámara anecoica y establecido el correcto montaje de las antenas, comienza la toma de medidas. Esto se lleva a cabo con un ordenador conectado al VNA y que a su vez está conectado a la mesa giratoria que, mediante el código de Matlab usado para la toma de medidas, gira gradualmente la mesa en la que está colocada la LWA desde -95° a 95° y midiendo la potencia recibida durante todo el proceso.

3.1. Resultados obtenidos e interpretación

Tras caracterizar cada una de las 5 antenas LWA disponibles, los ficheros generados en el código de Matlab de la caracterización analógica son procesados para obtener una gráfica que muestra los parámetros de reflexión de las antenas, su diagrama de radiación normalizado y el diagrama de radiación en coordenadas polares desde -90° a 90°

Los resultados obtenidos de las gráficas son los siguientes:

Tabla 1. Parámetros S y ángulos de apertura de la LWA1

Antena 1	S11	Θ_{RAD}	$\Delta\Theta$
$-f_1, +f_1$	-7.209, -5.46	-21, 21	30, 28
$-f_2, +f_2$	-11.09, -8.781	-30, 29	30, 27
$-f_3, +f_3$	-10.13, -16.58	-46, 46	32, 34

Tabla 2. Parámetros S y ángulos de apertura de la LWA2

Antena 2	S11	Θ_{RAD}	$\Delta\Theta$
----------	-----	-----------------------	----------------

$-f_1, +f_1$	-6.492, -4.577	-26, 21	38, 30
$-f_2, +f_2$	-7.752, -10.13	-33, 31	34, 28
$-f_3, +f_3$	-9.35, -19.75	-48, 48	34, 35

Tabla 3. Parámetros S y ángulos de apertura de la LWA3

Antena 3	S11	Θ_{RAD}	$\Delta\Theta$
$-f_1, +f_1$	-6.06, -6.357	-21, 21	30, 30
$-f_2, +f_2$	-10.3, -9.871	-30, 30	29, 29
$-f_3, +f_3$	-13.47, -17.67	-46, 47	28, 33

Tabla 4. Parámetros S y ángulos de apertura de la LWA4

Antena 4	S11	Θ_{RAD}	$\Delta\Theta$
$-f_1, +f_1$	-6.021, -6.898	-17, 16	30, 33
$-f_2, +f_2$	-10.23, -9.807	-26, 26	29, 29
$-f_3, +f_3$	-11.85, -14.88	-42, 41	31, 33

Tabla 5. Parámetros S y ángulos de apertura de la LWA5

Antena 5	S11	Θ_{RAD}	$\Delta\Theta$
$-f_1, +f_1$	-6.276, -5.495	-19, 16	33, 29
$-f_2, +f_2$	-9.487, -8.995	-29, 26	29, 27
$-f_3, +f_3$	-14.16, -17.39	-44, 39	32, 31

En las tablas anteriores, f_1 hace referencia al canal #37 de frecuencia central 2402 MHz, f_2 hace referencia al canal #38 de frecuencia central 2426 MHz y f_3 hace referencia al canal #39 de frecuencia central 2480 MHz.

De entre todas ellas, se vio que las mejores combinaciones de antenas eran la antena 1 con la antena 3 ya que ambas cubren hasta casi 70° y la otra combinación eran la antena 3 con la antena 5 debido a que son las que mejor adaptación presentan en el canal bajo, aunque la antena 5 cubre un menor campo de visión. Finalmente, de estas dos posibles combinaciones se eligió la antena 1 con la antena 3 puesto que son las que más diversidad espacial presentan. A continuación, se muestran en la Figura 3 y Figura 4 los parámetros

S11, los diagramas de radiación normalizados y los diagramas de radiación en coordenadas polares de las antenas 1 y 3 respectivamente.

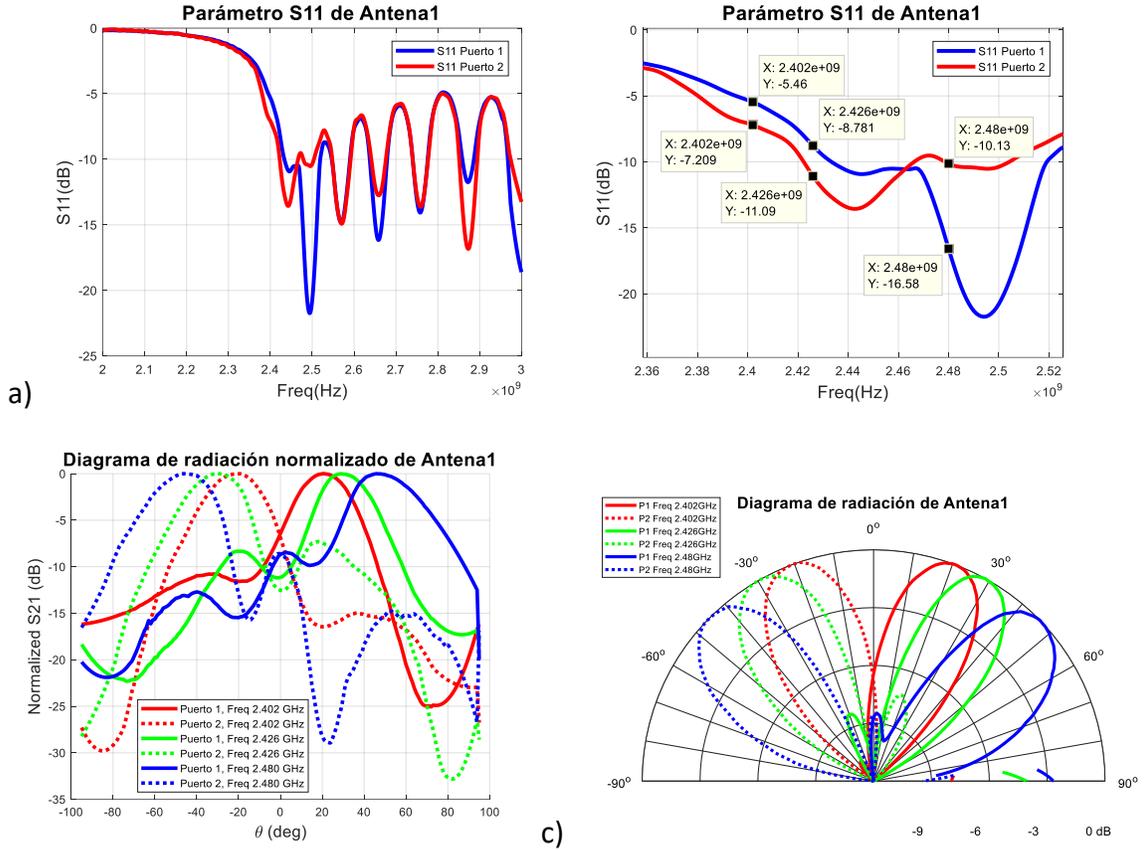
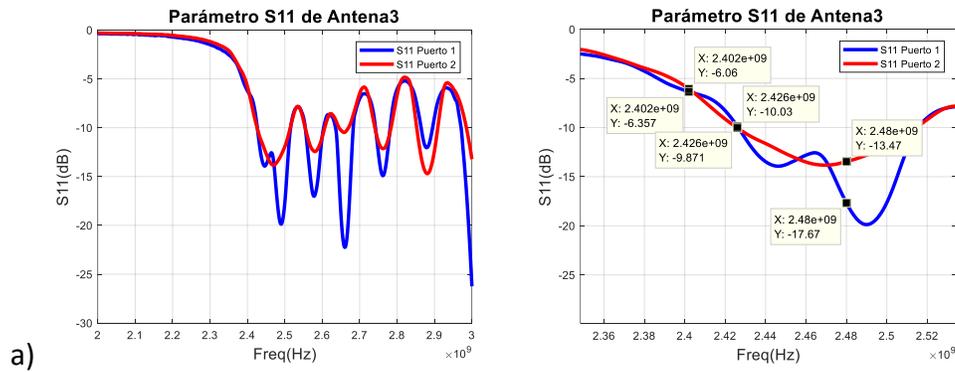


Figura 3.a) Parametro S11 de antena 1. b) Diagrama de radiación normalizado de antena 1. c) Diagrama de radiación en coordenadas polares de antena 1.



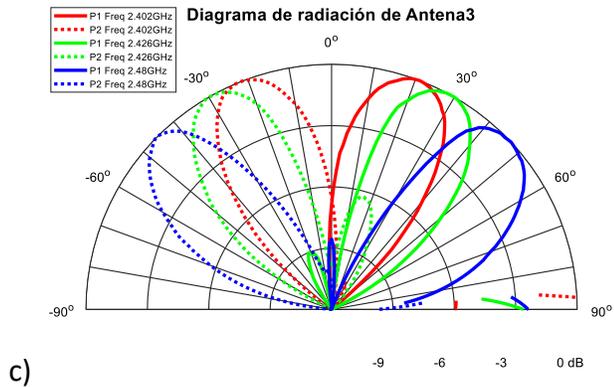
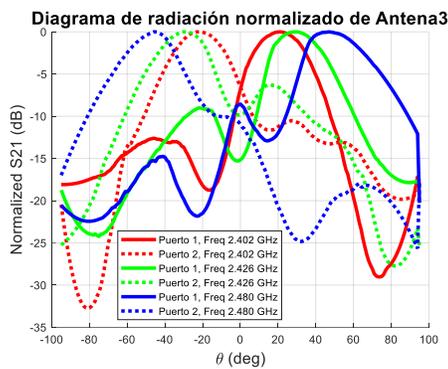


Figura 4.a) Parametro S11 de antena 3. b) Diagrama de radiación normalizado de antena 3. c) Diagrama de radiación en coordenadas polares de antena 3

Cabe destacar que, una vez elegidas las dos LWA para llevar a cabo el proyecto, la Antena 1 será llamada LWA1 y la Antena 3 será llamada LWA2 y, como podemos observar en los diagramas de radiación de ambas antenas, el puerto 1 de las LWA transmite en ángulos positivos mientras que el puerto 2 en ángulos negativos.

4. Programación de dispositivos BLE

Una de las partes cruciales de este proyecto es la programación de los dispositivos BLE (*Bluetooth Low Energy*) ya que necesitamos poder controlar el contenido de los paquetes que enviamos y también la capa física de la transmisión, es decir, el canal concreto de entre los tres canales de “advertising” o publicidad mencionados anteriormente. El “advertising” en dispositivos Bluetooth consiste en la entrega de mensajes, información o publicidad a dispositivos dentro del radio de alcance de la comunicación. En nuestro caso utilizaremos los paquetes de “advertising” de tipo publicidad ya que nuestra aplicación no requiere de conexión entre dispositivos. La tecnología BLE utiliza el espectro de 2.4 GHz, va desde los 2420 MHz hasta los 2480 MHz, usa 40 canales con un ancho de 1 MHz y separados entre sí cada 2 MHz tal y como se puede observar en la Figura 5, los canales de publicidad o “advertising” están asignados a esas frecuencias con el fin de no interferir con transmisiones WiFi ya que emplean la misma banda de transmisión que BLE y así se evitan interferencias a la hora de realizar el “advertising”. Durante el periodo de publicidad, los dispositivos BLE envían de manera pseudoaleatoria el mismo paquete por los distintos canales de publicidad, esto se hace con el fin de aumentar la probabilidad de que el transmisor sea detectado en un entorno donde existen múltiples transmisores enviando información al mismo tiempo. Para este proyecto es crucial el poder enviar los paquetes de publicidad en un canal concreto para así poder medir de manera efectiva el uso de las antenas LWA y la diversidad espacial que añaden para cada canal de publicidad, tal y como se ha visto en los diagramas de radiación de las antenas 1 y 3 en el apartado anterior.

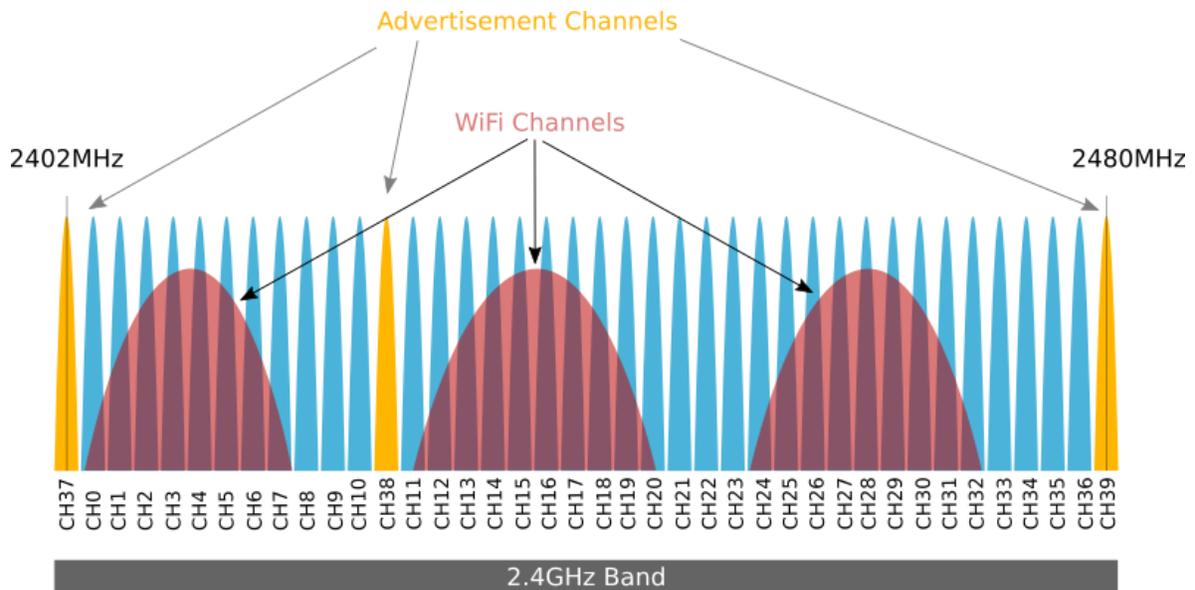


Figura 5. Distribución frecuencial de los canales en BLE

Antes de comenzar con la información relativa a la programación de la comunicación entre dispositivos BLE y los parámetros de los paquetes de publicidad, se muestran a continuación los dispositivos que se emplearán en la comunicación digital BLE. En el proyecto, usamos el módulo Parani-UD100 que podemos observar en la Figura 6.



Figura 6. Módulo Sena Parani-UD100

Este módulo BLE será empleado como transmisor junto con el monopolo que se puede ver en la Figura 6, y en la recepción irá conectado en las LWA, uno por puerto conectados por la parte del monopolo y por la parte USB conectada al ordenador.

La ficha técnica del módulo Sena Parani UD100 es la siguiente:

Tabla 6. Ficha técnica del módulo Sena Parani-UD100

Standards	Bluetooth 4.0 Class 1 USB 2.0
Max Transfer Rate	3 Mbps (EDR)
Frequency Range	2.402 ~ 2.480GHz
Transmit Output Power	+19dBm (+6dBm EDR) E.I.R.P
Receive Sensitivity	Basic 1Mbps: -88 dBm EDR 2Mbps: -87dBm EDR 3Mbps: -82dBm
Antenna Connector	RP-SMA
Antenna Gain	Default Stub Antenna: 1 dBi Optional Dipole Antennas: 3 dBi & 5 dBi Optional Patch Antenna: 9 dBi Stub antenna – Stub antenna: 300 m
Working Distance (In Open Field)	Dipole (3 dBi) – Dipole (3 dBi): 400 m Dipole (5 dBi) – Dipole (5 dBi): 600 m Patch antenna – Patch antenna: 1 km
	* working distance can vary depending on install environment
Bluetooth stack software	Latest Device Driver: BlueSoleil
Bluetooth Profiles	DUN, FAX, SPP, HID, FTP, OPP, SDP, HCRP, LAN, OBEX FTP, OBEX OPP, OBEX BIP, BIP, AVRCP, A2DP, HSP, HFP, PAN, BPP, Headset, AVCTP, AVDTP, HDP, Find Me, Proximity, Health Thermometer, Heart Rate, HID OVER GATT
Computer OS Support	Windows XP/Vista/7/8/10 (32/64bit) Linux (3rd party driver required) MAC OS X (MAC OS X driver required)
Size	72(L) x 22(W) x 10(H) mm
Operating Temperature	-40 ~ +85°C
Storage Temperature	-40 ~ +85°C
Humidity	90% Non-condensing
Regulatory Approvals	FCC, CE, TELEC, KCC, IC, Bluetooth SIG

Una vez presentado el dispositivo que nos permite programar la transmisión BLE, vamos a continuar mostrando la programación del mismo, la cual se ha realizado en Python 3.5 usando la librería BlueZ 5.49 que nos permite el empleo de comandos HCI (*Host Controller Interface*) que permiten indicar al módulo BLE la modificación de distintos parámetros de la transmisión de acuerdo con nuestras necesidades y que se encargan de comunicar el “host” (CPU principal que ejecuta la pila Bluetooth) con el “controller” (chip independiente que controla la radio Bluetooth de bajo nivel) tal y como se puede observar en la Figura 7.

Bluetooth Low Energy Architecture

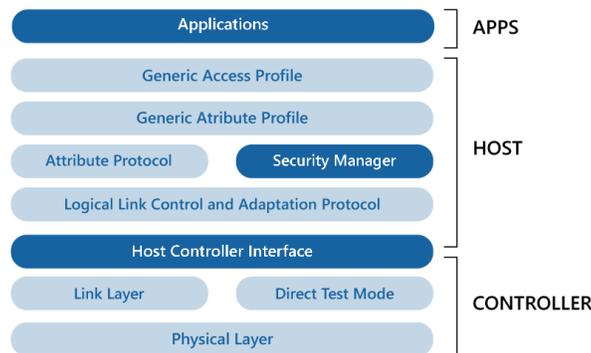


Figura 7. Arquitectura de Bluetooth Low Energy

Los comandos HCI mencionados anteriormente, modifican parámetros específicos de los paquetes BLE, como podemos ver en la Figura 8 que nos permiten controlar la transmisión a nivel de “host” y de “controller”.

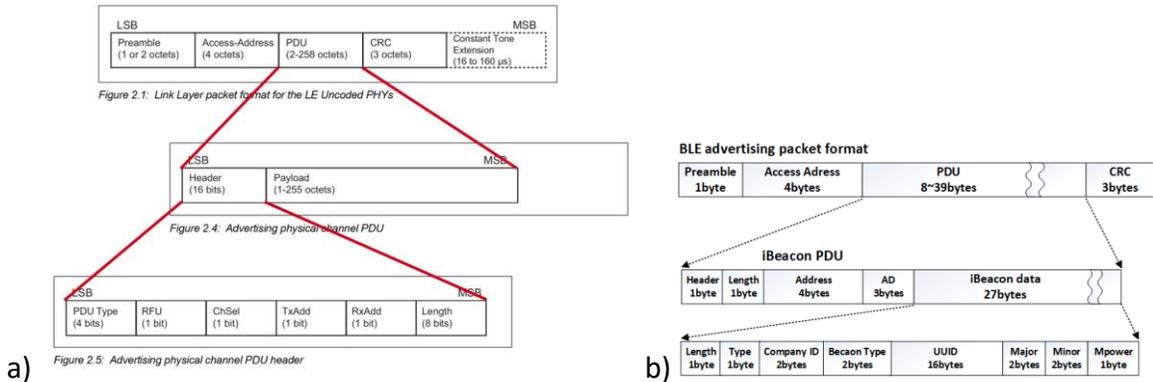


Figura 8. a) Contenido de la cabecera de la PDU de un paquete BLE. b) Contenido de la carga útil de la PDU de un paquete BLE

A continuación, vamos a entrar más en detalle qué parámetros HCI son los que hemos usado y también dentro de cada uno, los comandos más importantes. En el proyecto se han usado los siguientes:

- HCI_LE_Set_Advertising_Parameters

Tabla 7. HCI_LE_Set_Advertising_Parameters

Command	OCF	Command parameters	Return Parameters
HCI_LE_Set_Advertising_Parameters	0x0006	Advertising_Interval_Min, Advertising_Interval_Max, Advertising_Type, Own_Address_Type, Direct_Address_Type, Direct_Address, Advertising_Channel_Map, Advertising_Filter_Policy	Status

Este comando HCI es usado para transmitir y permite modificar los parámetros de publicidad. Los más importantes para nuestra aplicación son Advertising_Interval_Min y Advertising_Interval_Max, que nos permiten modificar el intervalo de publicidad mínimo y máximo, en nuestro caso toman el valor hexadecimal 0x00A0 lo que nos permite un tiempo entre publicidad de 100 ms, tiempo mínimo para nuestro tipo de conexión. Es decir, con el valor hexadecimal 0x00A0 podemos tener la mayor tasa de transmisión posible.

Otro parámetro importante es Advertising_Type, que indica el tipo de transmisión que deseamos. En nuestro caso queremos que sea de tipo no conectable e indirecto (ADV_NONCONN_IND) y tomará valor hexadecimal 0x03.

El siguiente parámetro que nos interesa y que es de vital importancia es el Advertising_Channel_Map, el cual nos permite especificar el canal de advertising por el que vamos a transmitir, toma cuatro posibles valores en función de los canales, 0x01 para el canal 37, 0x02 para el canal 38, 0x04 para el canal 39 y 0x07 para transmitir por los tres canales de manera pseudoaleatoria.

Los parámetros no mencionados no son útiles en nuestra aplicación y por lo tanto tomarán el valor hexadecimal 0x00.

En nuestro código se ha creado una función que recibe como argumento el canal por el que se desea transmitir y que al llamar a dicha función cambia de canal y comienza a transmitir uno tiempo determinado. Gracias a esta función podemos ver cómo se comporta la transmisión en función del canal.

- HCI_LE_Set_Advertising_Data

Tabla 8. HCI_LE_Set_Advertising_Data

Command	OCF	Command parameters	Return Parameters
HCI_LE_Set_Advertising_Data	0x0008	Advertising_Data_Length, Advertising_Data	Status

En este comando HCI usado en transmisión, podemos modificar varios campos dentro del parámetro Advertising_Data el cual está formado por 31 octetos de datos de publicidad y podemos ver en la Tabla 8.

Los campos más importantes que modificamos son el “major” y “minor”. Se trata de campos dentro de los cuales podemos introducir información referente a la transmisión, es decir, campos de libre configuración. En nuestro caso en ambos campos va introducido el número del canal por el que estamos transmitiendo la información. Esto es así debido a que cuando recibimos el paquete, lo decodificamos separando las partes importantes del mismo y para saber por el canal que nos llega el paquete solo necesitamos leer el campo de “major” o “minor”. Lo hacemos de esta forma ya que no es posible saber el canal por el que recibimos de manera física.

- HCI_LE_Set_Scan_Parameters

En este comando HCI usado en los receptores, los tres primeros parámetros son los más importantes y para los dos últimos le daremos valor hexadecimal 0x00 puesto que no son necesarios para nuestra aplicación. En el parámetro LE_Scan_Type lo tenemos de tipo 0x01, escaneo activo.

Tabla 9.HCI_LE_Set_Scan_Parameters

Command	OCF	Command parameters	Return Parameters
HCI_LE_Set_Scan_Parameters	0x000B	LE_Scan_Type, LE_Scan_Interval, LE_Scan_Window, Own_Address_Type, Scanning_Filter_Policy	Status

En LE_Scan_Interval y LE_Scan_Window se especifica el intervalo de guarda y el de recepción respectivamente. El intervalo de recepción es el intervalo temporal en el que se reciben paquetes y el de guarda es el intervalo temporal entre dos intervalos de recepción, empleado para que no se produzcan interferencias entre paquetes recibidos. El intervalo de recepción tiene que ser menor o igual al intervalo de guarda y ambos han de ser múltiplos de 0.625 ms. En nuestro código toma valor hexadecimal 0x00A4, valor muy similar al de transmisión con el fin de tener una transmisión lo más continua posible.

Una vez los comandos HCI anteriores están bien configurados, la comunicación entre transmisor (“advertiser”) y receptor (“scanner”) funciona como se muestra en la Figura 9 donde se pueden apreciar los intervalos de recepción y guarda. Más concretamente, se puede observar que el intervalo de escaneo “Scan Interval” está compuesto por la ventana de escaneo o intervalo de recepción “Scan window” y el intervalo de guarda, que sería el intervalo entre dos eventos de escaneo o recepción. También podemos ver que el intervalo de recepción se hace de manera secuencial con los tres canales de publicidad y solo se acepta el paquete de publicidad cuyo canal por el que ha sido transmitido coincida con el canal que estamos escaneando. En la Figura 9, los paquetes de color verdes son aquellos cuyo canal coincide con el de escaneo y por tanto son aceptados.

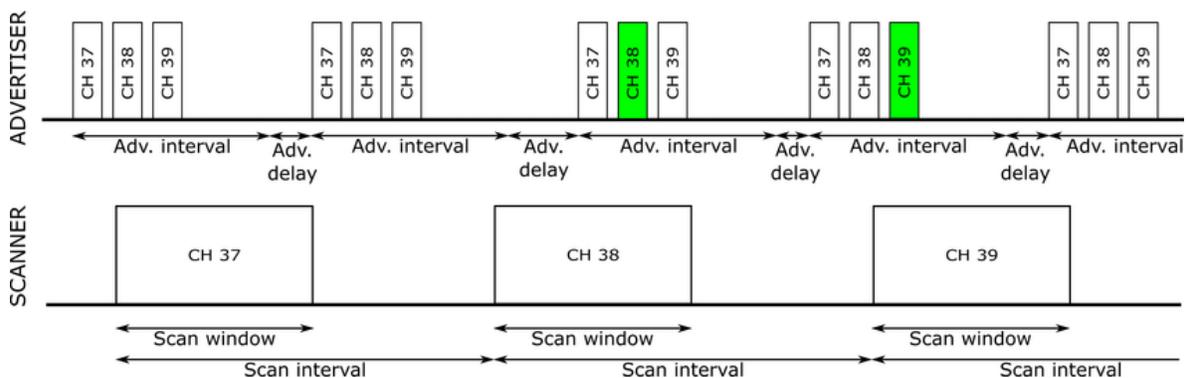


Figura 9. Comunicación BLE entre transmisor y receptor

5. Caracterización digital en cámara anecoica de LWA y monopolos

Como hemos descrito en el apartado anterior, una vez hemos sido capaces de controlar la transmisión y recepción de acuerdo con nuestras necesidades, tenemos que caracterizar el comportamiento conjunto de las LWA y los módulos Parani-UD100 conectados en cada puerto de las antenas. Además de la caracterización de las LWA, también haremos la caracterización con un monopolo conectado a un módulo Parani-UD100 (tal y como se puede ver en la Figura 6) para estudiar su comportamiento. Ambas caracterizaciones nos permitirán, en posteriores pruebas en entorno real, comparar la precisión de los sistemas de localización generados con dos LWA frente a los sistemas generados con 4 monopolos y comparar las mejoras que conlleva el uso de LWA frente a los monopolos empleando tanto en “Separate Channel” (SC) como “Unified Channel” (UC).

Para la caracterización digital se ha vuelto a usar la cámara anecoica en la que las mediciones realizadas han sido posibles gracias a las funciones creadas para modificar los paquetes BLE transmitidos. La lógica empleada de cara a la toma de medidas es la siguiente: la transmisión se hace durante una cierta cantidad de tiempo por canal, una vez ese tiempo termina, empezamos a transmitir por el siguiente canal de publicidad. En la recepción de los dos módulos BLE conectados en la LWA esperamos recibir 150 paquetes por canal de publicidad y, conforme los recibimos en un canal, los decodificamos y almacenamos el contenido de cada paquete (tiempo de llegada, puerto, canal, grado de la mesa giratoria y potencia recibida) en un fichero de texto. Posteriormente esperamos hasta que empecemos a recibir por el siguiente canal de publicidad. Cabe destacar que el tiempo en el que el transmisor envía paquetes por un canal de publicidad tiene un tiempo de guarda para que lleguen los paquetes requeridos a los módulos BLE conectados a la LWA.

El montaje dentro de la cámara anecoica es el mismo que se puede observar en la Figura 1 pero tanto la LWA como el monopolo usado como antena de referencia están conectados directamente a un ordenador, sin necesitar el VNA para estas medidas puesto que son medidas digitales. En este montaje, tanto la transmisión como la recepción son implementados empleando el código desarrollado en Python y para ello donde se manejan las funcionalidades vistas en el apartado 4. Cabe destacar que las LWA empleadas son las que se seleccionaron en el apartado 3 de caracterización analógica pues estas eran las que mayor diversidad espacial tenían. Para estas medidas, tanto el monopolo transmisor como ambos puertos de las LWA receptoras y el monopolo receptor están conectados a los módulos BLE Parani-UD100 tal y como se pueden ver en la Figura 10.a y Figura 10.b y Figura 10.d. Finalmente, tal y como ocurrió en el apartado 3 de caracterización analógica, las LWA irán acopladas en el soporte de la mesa giratoria (Figura 10.c) y las medidas se harán para 180°, desde -90° a 90°.

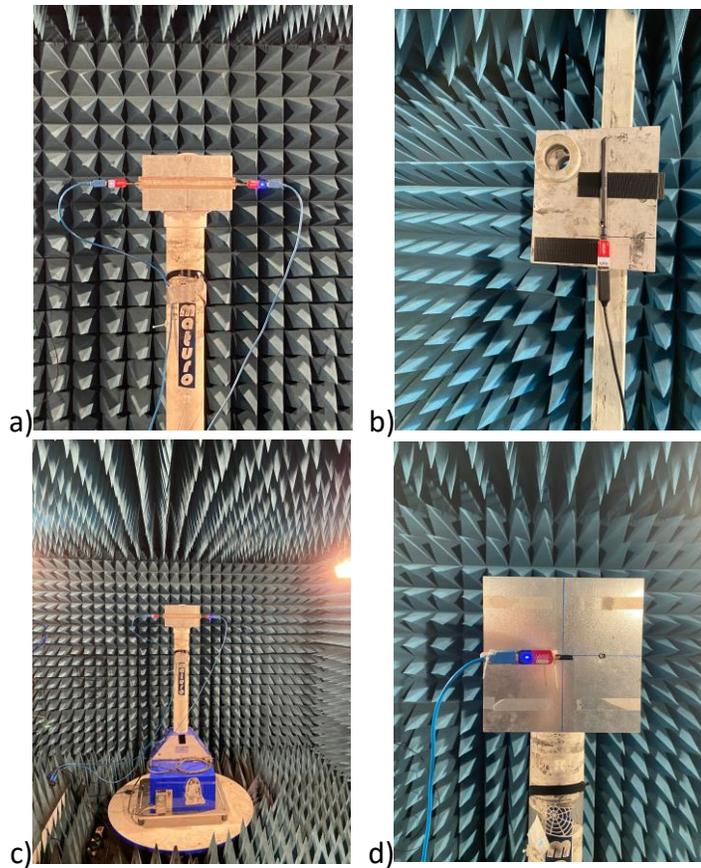


Figura 10. a) LWA con módulos BLE en ambos puertos. b) Monopolo con módulo BLE. c) LWA en mesa giratoria de cámara anecoica, d) Monopolo en mesa giratoria de cámara anecoica

Finalmente, en los siguientes subapartados dentro de este, se mostrarán y analizarán los resultados obtenidos en las distintas medidas de los monopolos y las LWA, una vez han sido debidamente procesados y representados en Matlab. Es importante destacar que las medidas que se toman y procesan son de dos tipos, *Unified Channel (UC)* y *Separate Channel (SC)*. En las medidas SC, se transmite separando los canales a la hora de transmitir, haciendo distinción entre ellos mientras que, en UC, se transmite de manera pseudoaleatoria sin distinción de canales a la hora de medir la potencia. Como se explicó en el apartado 4 y en la Tabla 7 esto es posible gracias a la modificación de `Advertising_Channel_Map` al programar la transmisión. Además, a la hora de procesar los datos nos hemos dado cuenta de que el promediado de los tres canales en SC coincide con la medida en UC por lo que gracias a ello podemos también comparar el funcionamiento entre monopolos y LWA en UC.

5.1. Resultados obtenidos para LWA en SC y UC

Una vez hemos tomado las medidas y procesado los datos en Matlab, hemos obtenido los diagramas de radiación de las antenas leaky-wave que podemos observar en la Figura 11 y Figura 12 para la LWA1 en SC y UC respectivamente, y en la Figura 13 y Figura 14 para la LWA2 en SC y UC respectivamente. En la Figura 11 podemos comprobar como mantiene la

diversidad espacial de la LWA1 respecto a la Figura 3 (en analógico) y para la Figura 13 ocurre de igual manera respecto a la Figura 4. En la Figura 12.b para la LWA1 y la Figura 14.b para la LWA2 se puede comprobar como el promediado del diagrama de radiación en SC coincide con el diagrama de radiación en UC en coordenadas cartesianas y de la misma forma ocurre en las coordenadas polares para la LWA1 en la Figura 12.c y Figura 12.d y para la LWA2 en la Figura 14.c y Figura 14.d donde podemos ver que los diagramas de radiación para ambos casos coinciden.

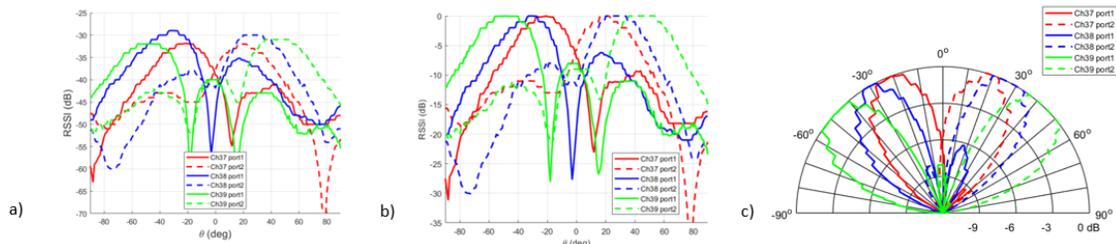


Figura 11. Diagrama de radiación para LWA1 a) SC en coordenadas cartesianas sin normalizar; b) SC normalizado en coordenadas cartesianas; c) SC normalizado en coordenadas polares

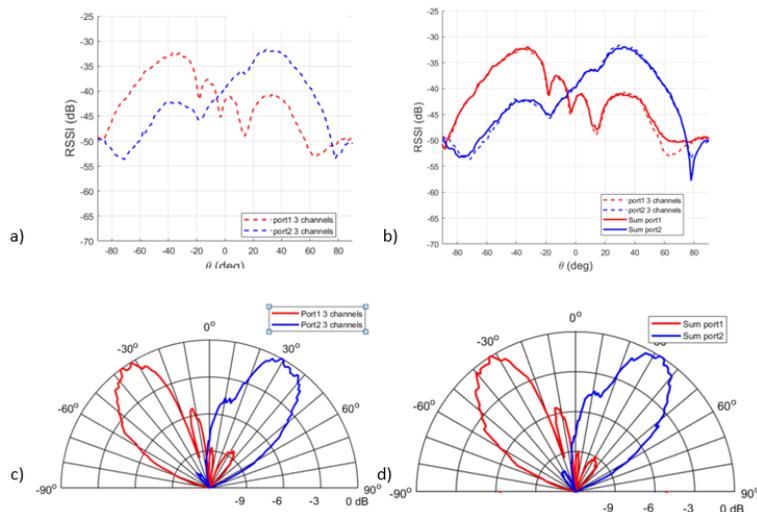


Figura 12. Diagramas de radiación para LWA1 a) UC en coordenadas cartesianas; b) Comparativa entre UC y promediado de SC en coordenadas cartesianas; c) UC en coordenadas polares; d) Promediado de SC en coordenadas polares

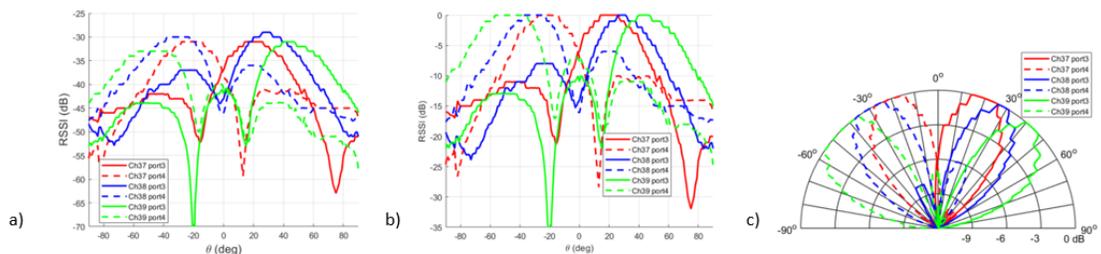


Figura 13. Diagrama de radiación para LWA2 a) SC en coordenadas cartesianas sin normalizar; b) SC normalizado en coordenadas cartesianas; c) SC normalizado en coordenadas polares

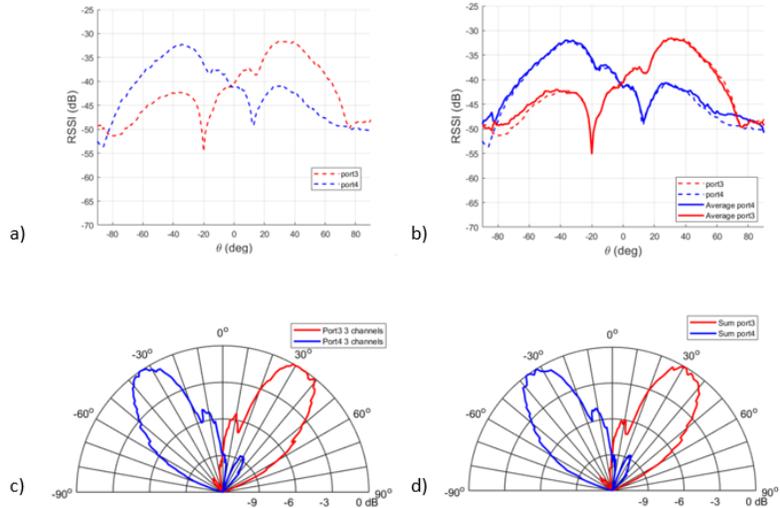


Figura 14. Diagrama de radiación para LWA2 a) UC en coordenadas cartesianas; b) Comparativa entre UC y promediado de SC en coordenadas cartesianas; c) UC en coordenadas polares; d) Promediado de SC en coordenadas polares

5.2. Resultados obtenidos para monopolos en SC y UC

Continuando con el análisis de las medidas digitales en la cámara anecoica de las LWA, estudiaremos ahora los resultados obtenidos para los monopolos en la Figura 15 y Figura 16 para SC y UC respectivamente y para el plano H. De la misma forma que ocurría en las LWA, podemos ver que los diagramas de radiación promediando los tres canales de SC coinciden con el de UC como se muestra en la Figura 16.b en coordenadas cartesianas y también en la Figura 16.c donde UC en coordenadas polares coincide con la Figura 16.d de promediado de SC en coordenadas polares.

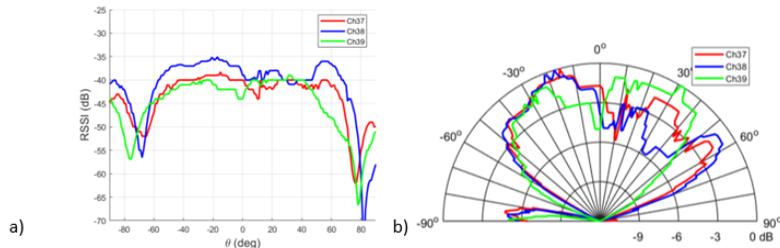


Figura 15. Diagrama de radiación del monopolo a) SC en coordenadas cartesianas en plano H; b) SC en coordenadas polares en plano H

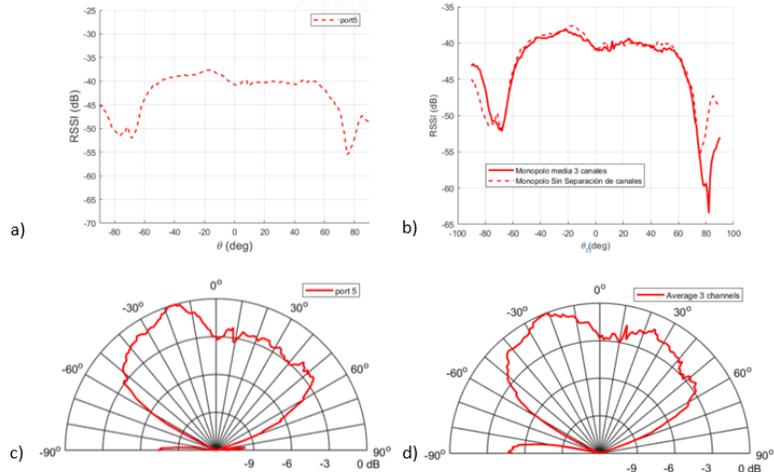


Figura 16. Diagramas de radiación del monopolo a) UC en coordenadas cartesianas en plano H; b) Comparativa entre promediado de canales en SC y UC en coordenadas cartesianas en plano H; c) UC en coordenadas polares en plano H; d) Promediado de SC en coordenadas polares en plano H

6. Escenario de pruebas

Una vez que ya hemos sido capaces de realizar una caracterización digital del sistema, es momento de establecer el escenario de pruebas. Conviene recordar que lo que deseamos es medir la potencia recibida (RSSI) en cada punto del escenario para cada antena y para cada canal con el objetivo de generar un modelo.

El entorno real de pruebas lo podemos observar en la Figura 17 donde vemos que tiene un ancho de 5 metros (eje x) y un largo de 7 metros (eje y), el escenario de las medidas está formado por una matriz de 130 puntos a medir, 10 puntos de ancho por 13 puntos de largo donde cada punto está separado de los puntos vecinos unos 50 cm. Además, en la Figura 17 podemos ver como hemos distribuido las dos LWA y los cuatro monopolos que vamos a emplear.

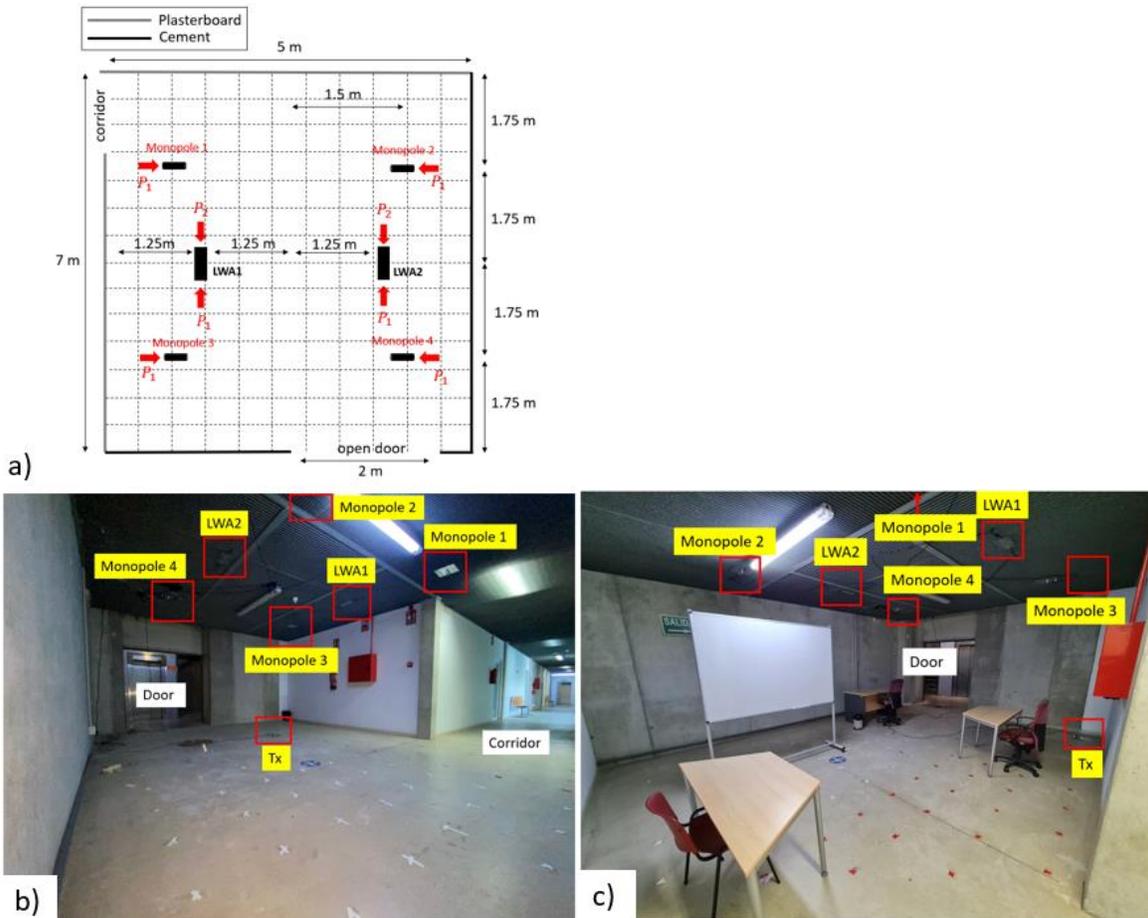


Figura 17. a) Esquema del escenario; b) Imagen del escenario; c) Imagen del escenario con muebles

La medida de las RSSI en cada punto nos permitirá procesar los datos para cada puerto y canal con el fin de obtener un fingerprint característico de cada punto. Con ese fingerprint, llevaremos a cabo una correlación respecto de una primera medida más extensa que utilizaremos como medida de calibración. Esta calibración la usaremos para comparar con las medidas de testeo de los días posteriores. La toma de medidas se realizará conectando los 8 puertos de las antenas receptoras, que se pueden observar en la Figura 17, tanto en el esquema como en las imágenes del escenario con y sin muebles, y el puerto correspondiente al monopolo usado para transmitir a un ordenador que gracias al código desarrollado en Python y explicado en el apartado 4, es capaz de tomar de manera simultánea las medidas necesarias.

Previamente a la toma de medidas es necesario evaluar una estimación teórica de la distribución de las potencias en el entorno de pruebas. Las estimaciones las podemos ver en las Figura 18 y Figura 19 correspondientes a las LWA en SC y UC respectivamente, y a la Figura 20 y Figura 21 correspondiente a los monopolos en SC y UC respectivamente. Cabe destacar que en la Figura 18 las LWA tienen un distinto mapa de potencia para cada canal y puerto y este es bastante diferenciado, tal y como pudimos ver en las medidas analógicas y

digitales en la cámara anecoica, permitiendo así añadir diversidad espacial con el fin de tener una mejor estimación de la localización del transmisor.

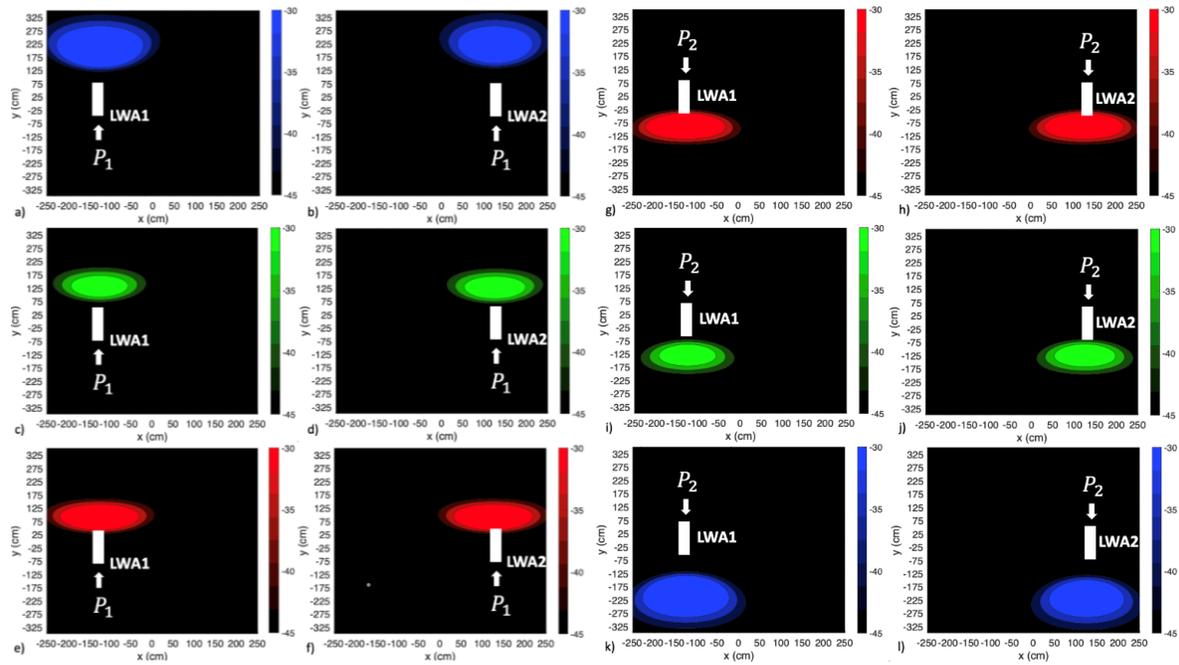


Figura 18. Estimación teórica de potencias en SC para a) LWA1 P1 CH39; b) LWA2 P1 CH39; c) LWA1 P1 CH38; d) LWA2 P1 CH38; e) LWA1 P1 CH37; f) LWA2 P1 CH37; g) LWA1 P2 CH37; h) LWA2 P2 CH37; i) LWA1 P2 CH38; j) LWA2 P2 CH38; k) LWA1 P2 CH39; l) LWA2 P2 CH39

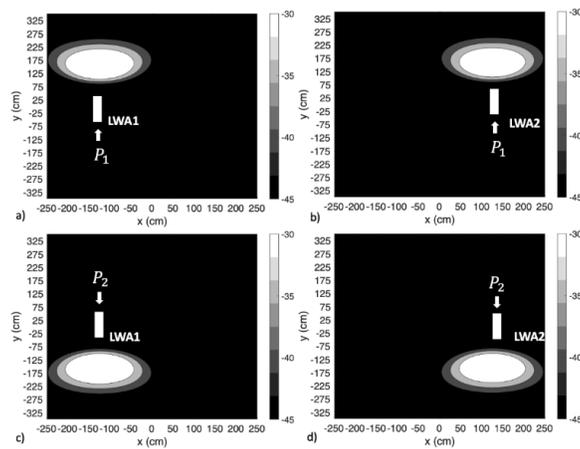


Figura 19. Estimación teórica de potencias en UC para a) LWA1 P1; b) LWA2 P1; c) LWA1 P2; d) LWA2 P2

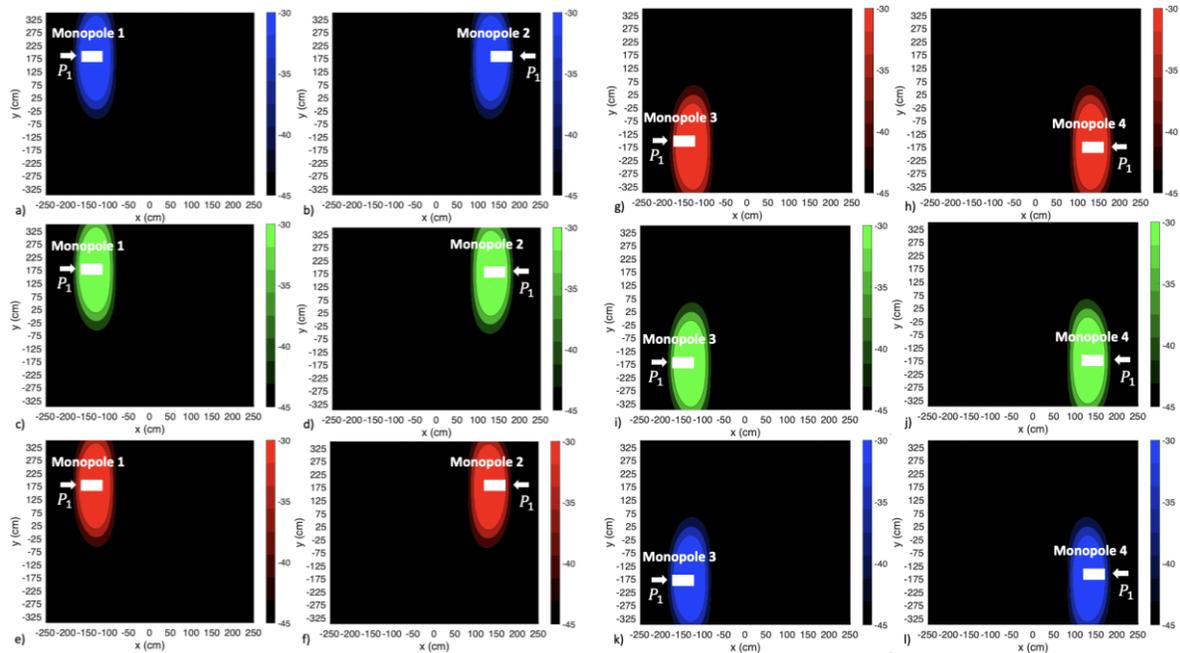


Figura 20. Estimación teórica de potencias en SC para a) Monopolo1 CH39; b) Monopolo2 CH39; c) Monopolo1 CH38; d) Monopolo2 CH38; e) Monopolo1 CH37; f) Monopolo2 CH37; g) Monopolo3 CH37; h) Monopolo4 CH37; i) Monopolo3 CH38; j) Monopolo4 CH38; k) Monopolo3 CH39; l) Monopolo4 CH39

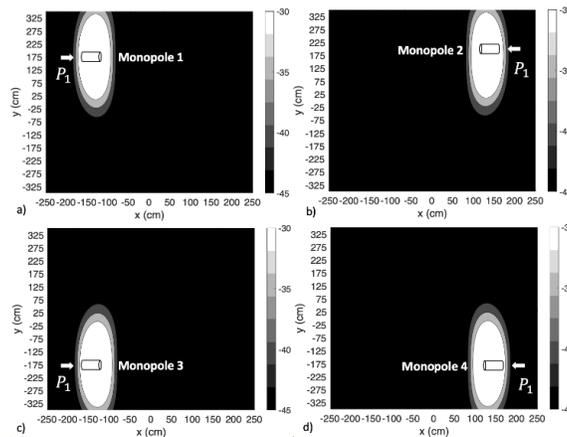


Figura 21. Estimación teórica de potencias en UC para a) Monopolo1; b) Monopolo2; c) Monopolo3; d) Monopolo4

Una vez generada la estimación teórica de los diagramas de propagación, se procede con el montaje en el entorno real que podemos observar en la Figura 22.a donde se muestra el entorno de pruebas con los puntos (cruces) en el suelo en las que se tomarán las medidas, además se pueden observar los monopolos y las LWA montadas en el techo como se especifica en la Figura 17. En la Figura 22.b se puede observar una de las antenas leaky-wave en el techo con más detalle mientras que de la misma forma, en la Figura 22.c se observa uno de los monopolos montados en el techo. En la Figura 22.d se observa el transmisor el cual moveremos por los puntos marcados en el suelo para ir tomando medidas y finalmente en la Figura 22.e se ve el entorno de medidas con los obstáculos (mesas, sillas,

pizarra y papelerera metálica) para comprobar la eficiencia de las LWA respecto a los monopolos en un entorno con una mayor diversidad espacial.

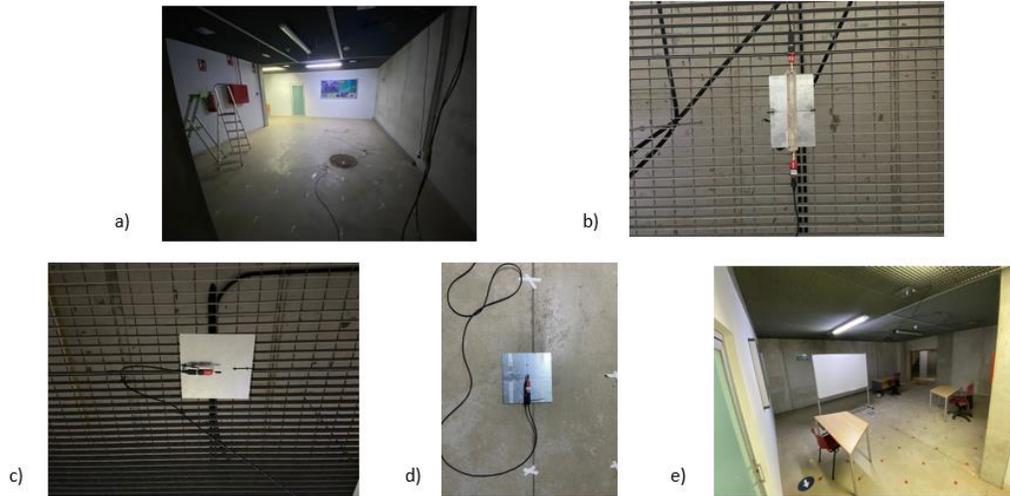


Figura 22. a) Entorno de medidas con montaje de antenas en el techo. b) Antena LWA en techo. c) Monopolo en techo. d) Monopolo transmisor. e) Entorno de medidas con obstáculos

7. Resultados obtenidos en el escenario de pruebas

Tras realizar el montaje de las antenas en el escenario de pruebas y su correcta configuración, se comienza entonces con la toma de medidas. Cabe destacar que la primera medida que se realiza es la medida de calibración donde se toma 100 muestras por cada canal y puerto en cada uno de los 130 puntos a medir. Posteriormente, los días 1, 8, 14, 21, 28 y 51, tras la calibración se realizaron las medidas tipo “test” en las que se tomarán diez muestras por canal y por puerto en cada uno de los puntos con el fin de añadir diversidad temporal a las medidas. Dichas medidas tipo test se hacen para el caso de SC y UC, configurando el monopolo transmisor para que la transmisión sea la deseada para cada caso. También se añadirán obstáculos con el fin de aportar diversidad espacial entre medidas y varias mediciones con obstáculos dejando tiempo entre las mismas para tener también diversidad temporal, dichos obstáculos son siempre los mismos y se encuentran en las mismas posiciones cada vez que se va a realizar las medidas tipo test con obstáculos. Una vez tenemos los ficheros de texto con los datos recogidos en las medidas, los procesamos en Matlab para obtener tanto para monopolos como LWA los mapas de calor que muestran la RSSI (en UC y SC), la distribución de RSSI en SC, la correlación de medidas (en UC y SC) y finalmente el error medio (en UC y SC). Luego se mostrará una tabla resumen en la que podremos observar la media del error y el error cuadrático medio. Además, se verá una gráfica comparativa entre los monopolos y el uso de LWA y se procederá a comentar los resultados. Cabe destacar que en la distribución de RSSI y los apartados de correlación se visualizarán los resultados para unos puntos de la zona de pruebas en concreto.

7.1. Medidas de RSSI para medidas de calibración en SC

Tras la primera toma de medidas de calibración en el entorno de pruebas y el posterior procesado de las medidas de calibración en Matlab, en este apartado se va a mostrar el diagrama de propagación en cada punto del entorno de pruebas para cada puerto de cada antena. Como se puede observar en la Figura 23, las LWA se comportan de manera similar a la Figura 18.a y Figura 18.b respectivamente, en la que podemos observar como las propiedades de las antenas leaky-wave añaden la diversidad espacial en función del canal BLE. De la misma forma, en la Figura 24, se observa un comportamiento similar al descrito en la Figura 18.c referente a los monopolos.

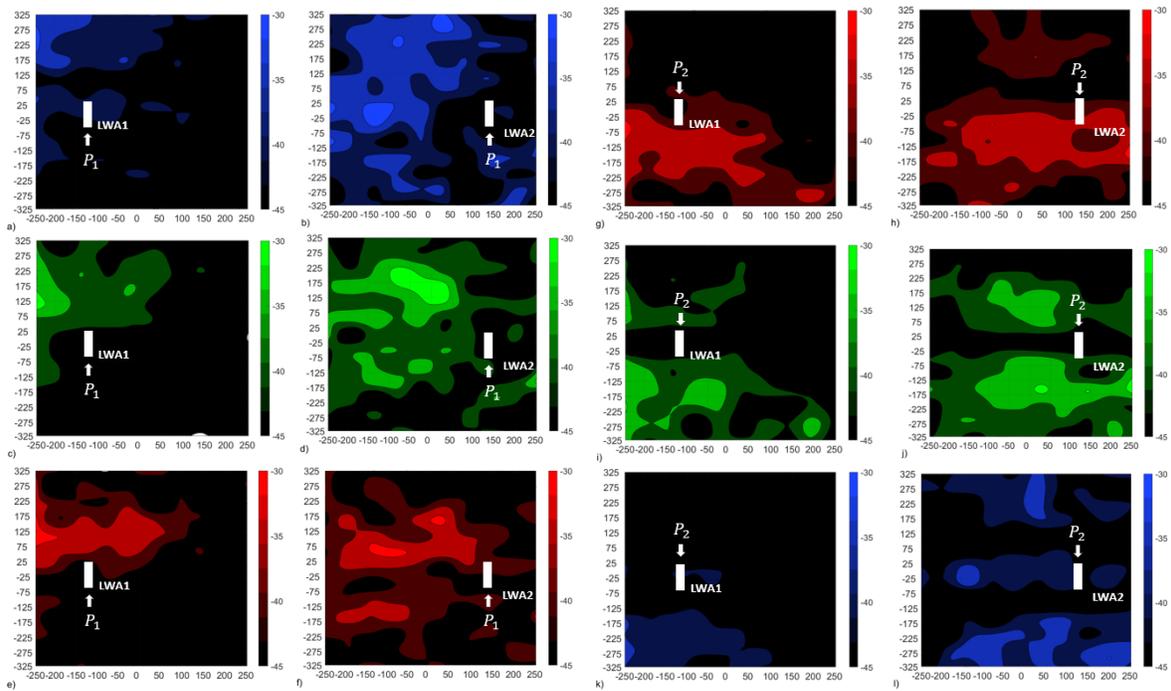


Figura 23. Diagrama de radiación mediante SC para a) LWA1 P1 CH39; b) LWA2 P1 CH39; c) LWA1 P1 CH38; d) LWA2 P1 CH38; e) LWA1 P1 CH37; f) LWA2 P1 CH37; g) LWA1 P2 CH37; h) LWA2 P2 CH37; i) LWA1 P2 CH38; j) LWA2 P2 CH38; k) LWA1 P2 CH39; l) LWA2 P2 CH39

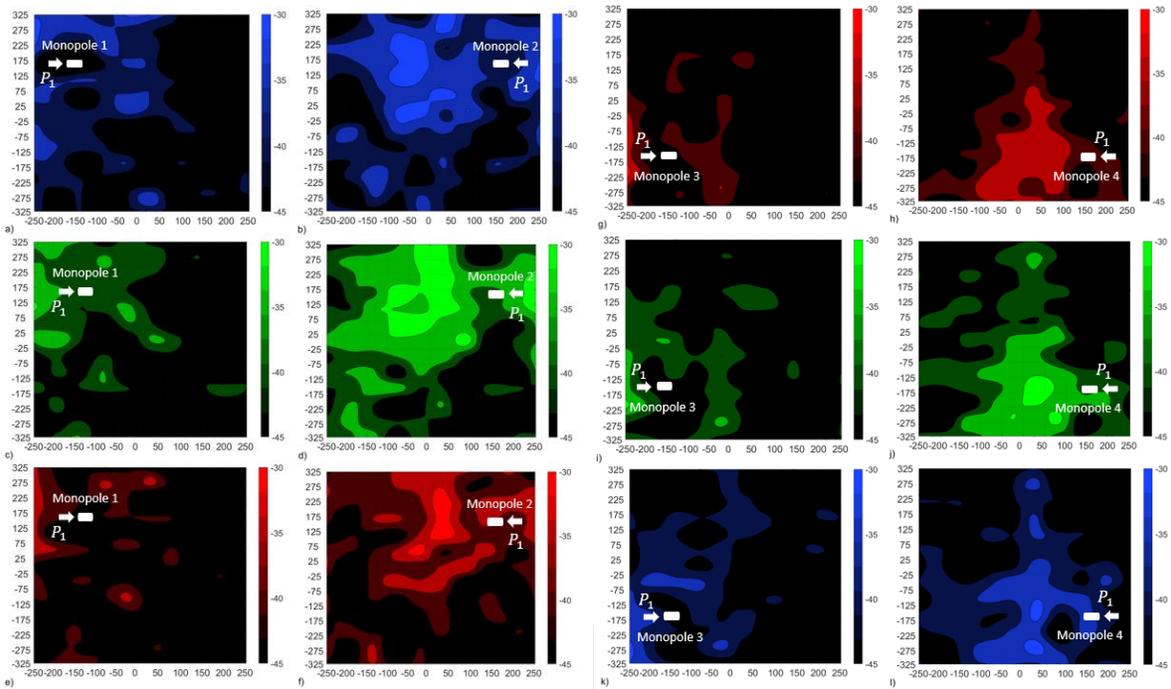


Figura 24. Diagrama de radiación mediante SC para a) Monopolo1 CH39; b) Monopolo2 CH39; c) Monopolo1 CH38; d) Monopolo2 CH38; e) Monopolo1 CH37; f) Monopolo2 CH37; g) Monopolo3 CH37; h) Monopolo4 CH37; i) Monopolo3 CH38; j) Monopolo4 CH38; k) Monopolo3 CH39; l) Monopolo4 CH39

7.2. Medidas de RSSI para medidas de calibración en UC

Como se explicó anteriormente, en el caso de UC, la potencia la medimos sin distinguir el canal de publicidad que recibimos. En la Figura 25, podemos observar los mapas de calor de cada puerto de las LWA, de igual forma ocurre en la Figura 26 que hace referencia a las medidas de potencia para los monopolos.

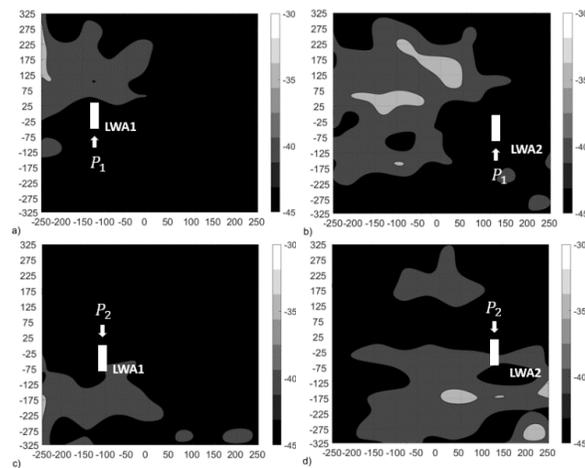


Figura 25. Diagrama de radiación mediante UC para a) LWA1 P1; b) LWA2 P1; c) LWA1 P2; d) LWA2 P2

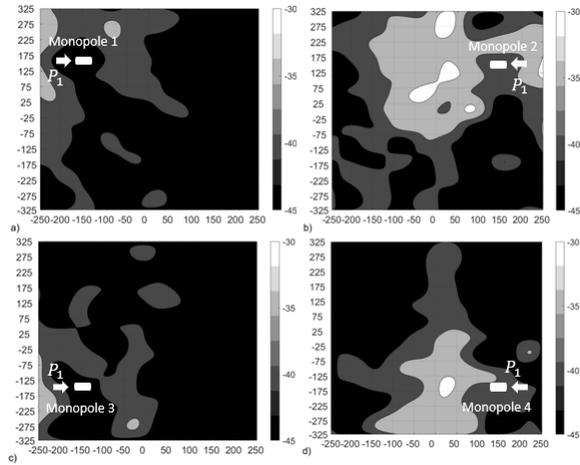


Figura 26. Diagrama de radiación mediante UC para a) Monopolo1; b) Monopolo2; c) Monopolo3; d) Monopolo4

7.3. Correlación con LWA y monopolos usando como testeo las muestras de calibración para SC y UC

Como paso inicial, para comprobar el correcto funcionamiento del sistema, se ha realizado una correlación a una medida obtenida en la calibración consigo misma y para los puntos que se muestran en las figuras de este apartado. El objetivo es comprobar que la correlación que se va a realizar es correcta y muestra el punto concreto que se ha seleccionado. Por lo tanto, en la Figura 27 se puede ver como para los puntos seleccionados, en su punto correspondiente la correlación obtiene el valor 1 indicando el 100% de similitud con dicho punto en el caso de SC y que como vemos, no hay ningún error a la hora de hacer la correlación. De la misma forma que para el caso de correlación en SC, en la Figura 28 podemos ver no hay errores en la autocorrelación que llevamos a cabo para UC con las LWA ya que para cada punto seleccionado se obtiene la máxima correlación.

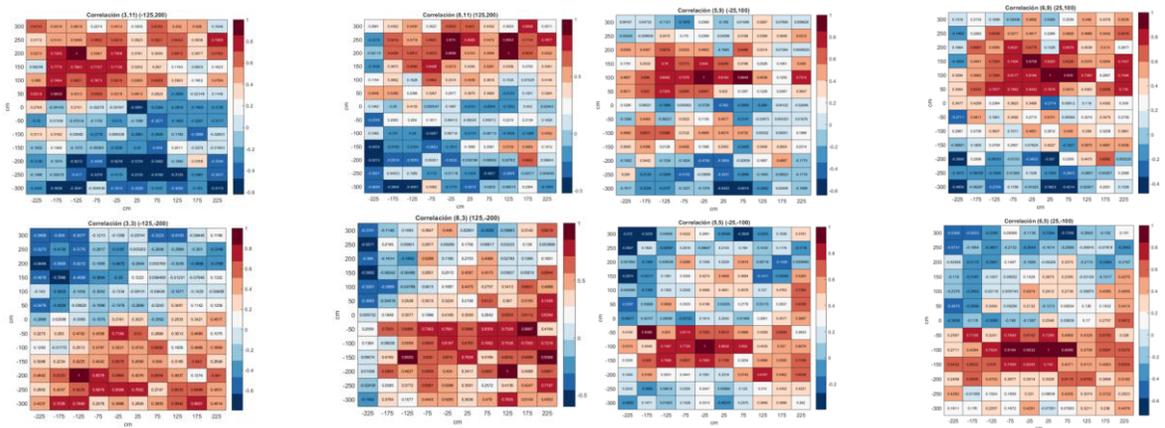


Figura 27. Correlación de las medidas de calibración consigo mismas para LWA en SC

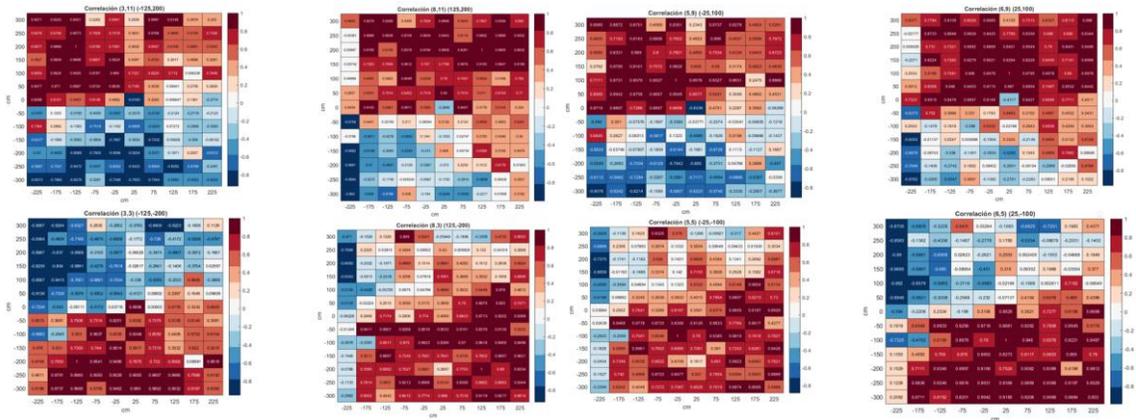


Figura 28. Correlación de las medidas de calibración consigo mismas para LWA en UC

Del mismo modo que la correlación anterior de las medidas de calibración de las LWA, comprobamos si las medidas de calibración para los monopolos y en los puntos seleccionados son correctas, podemos ver que en la Figura 29 es para SC y en la Figura 30 es para UC y que en ambas no se percibe error en las medidas puesto que tenemos la máxima correlación en el lugar exacto de los puntos seleccionados.

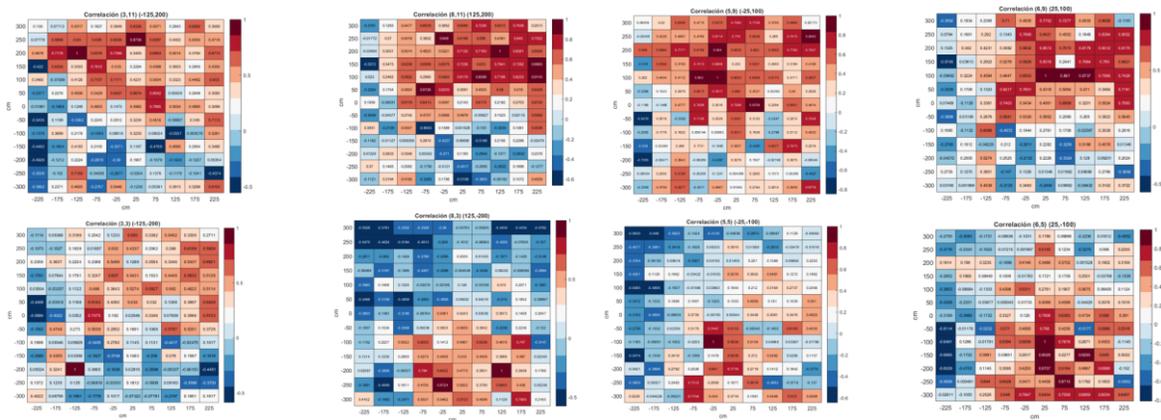


Figura 29. Correlación de las medidas de calibración consigo mismas para Monopoles en SC

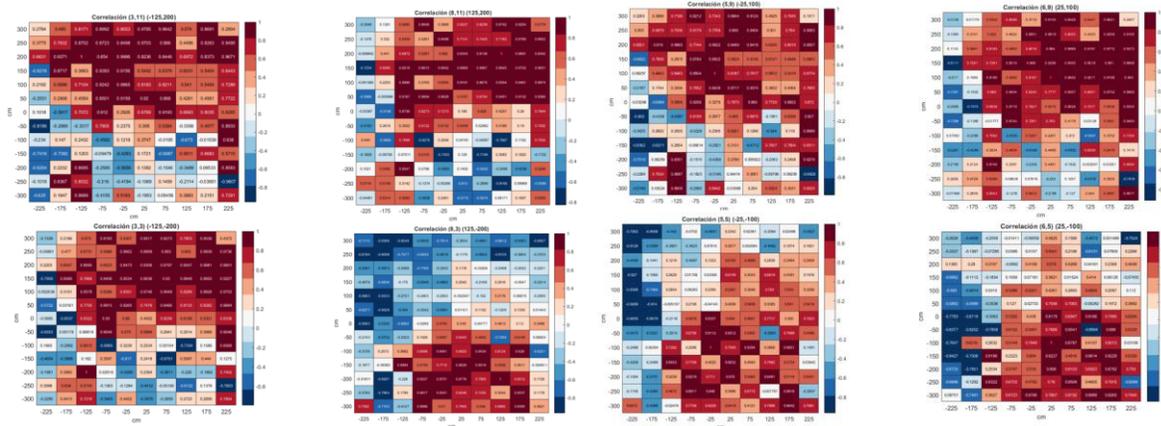


Figura 30. Correlación de las medidas de calibración consigo mismas para Monopoles en UC

Como hemos visto anteriormente para LWA y monopolos, la distribución de la correlación es muy diferente ente SC y UC donde se puede apreciar claramente que en el caso de emplear SC se tiene una mayor precisión, esto es debido a que hay menos puntos con alta correlación por lo tanto se puede estimar mejor la localización en comparación a UC donde existe un mayor número de puntos con alta correlación haciendo que la estimación de la localización sea más imprecisa.

7.4. Correlación con LWA usando como testeo una muestra del día 1

Una vez que hemos comprobado que con la correlación de las muestras de calibración no se detecta ningún error, vamos a visualizar ahora la correlación interpolada de las muestras tipo test del primer día con las muestras de calibración para el punto (0,0). Este resultado se muestra en la Figura 31. Se puede observar que para con el uso de SC, tanto para el sistema generado empleando LWA como para el sistema generado empleando monopolos se tiene una menor distribución de la probabilidad de correlación que en el caso UC. Por lo tanto, tal y como observamos en el apartado anterior, el empleo de LWA con la técnica SC es la que muestra una mayor precisión en la correlación interpolada ya que como vimos

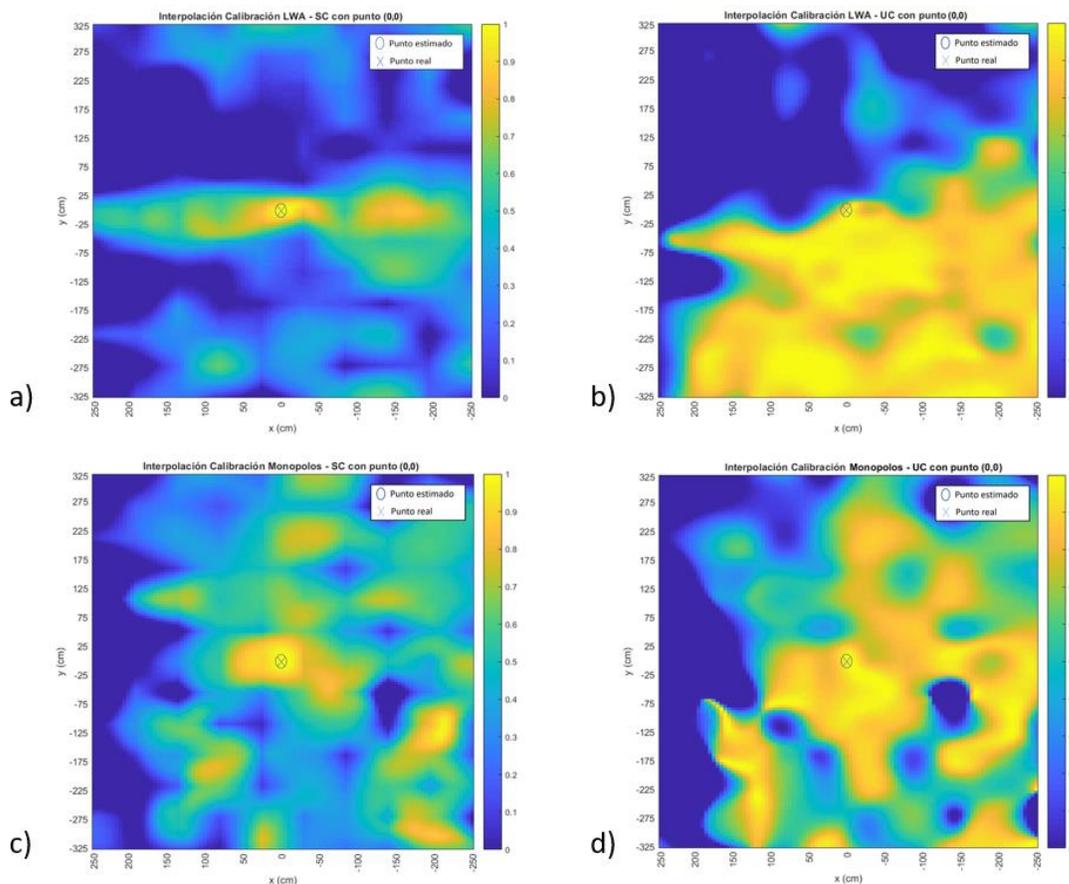


Figura 31. Correlación interpolada para a) LWA – SC; b) LWA – UC; c) Monopulos – SC; d) Monopulos – UC

7.5. Errores medios por puntos para cada día de medidas en LWA

Continuando con el análisis de los datos obtenidos en el entorno de pruebas, en este apartado se podrá visualizar el error (en centímetros) de cada punto del grid de todas las medidas realizadas en distintos días para las LWA en los casos de SC y UC, y para el sistema generado con los cuatro monopolos tanto para UC como para SC. En la Figura 32 podemos observar el error medio en cada punto en el caso de SC mientras que en la Figura 33 se representa el error medio para el caso de UC. Como vemos, empleando SC el error medio es mucho menor que en UC en todos los días tanto para LWA como para monopolos.

Tras mostrar los resultados de los errores medios de las LWA a continuación veremos los errores medios para los monopolos. En la Figura 34 se muestra el error medio en SC y en la Figura 35 en UC. Tal y como ocurría en las LWA, el error al emplear SC es menor que al emplear UC.

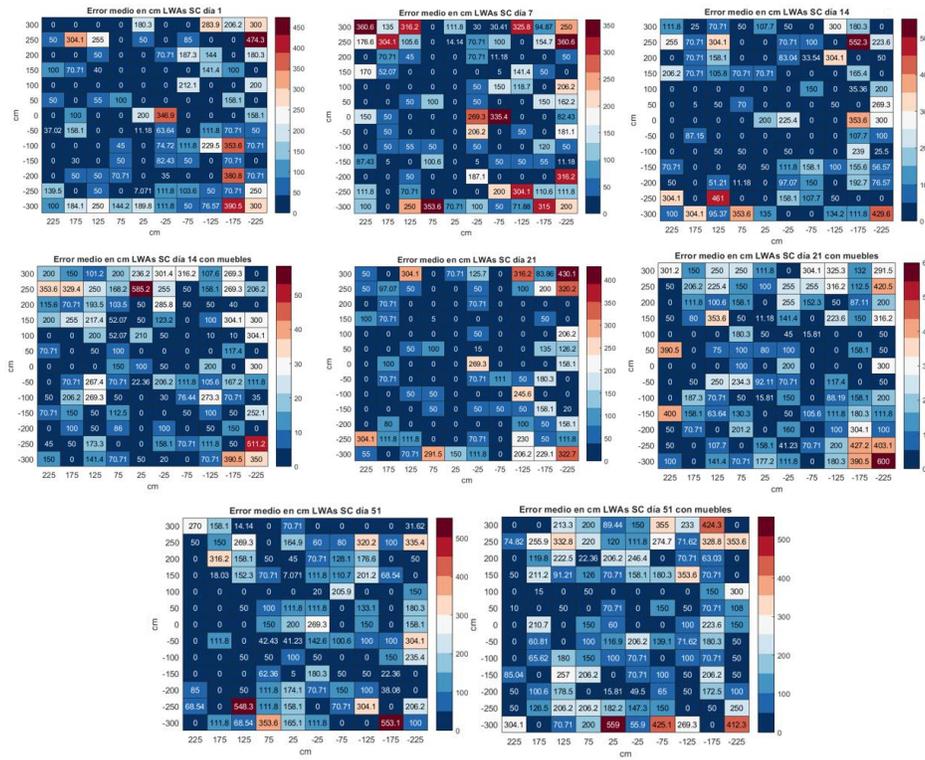


Figura 32. Errores medios de diferentes días para LWA en SC

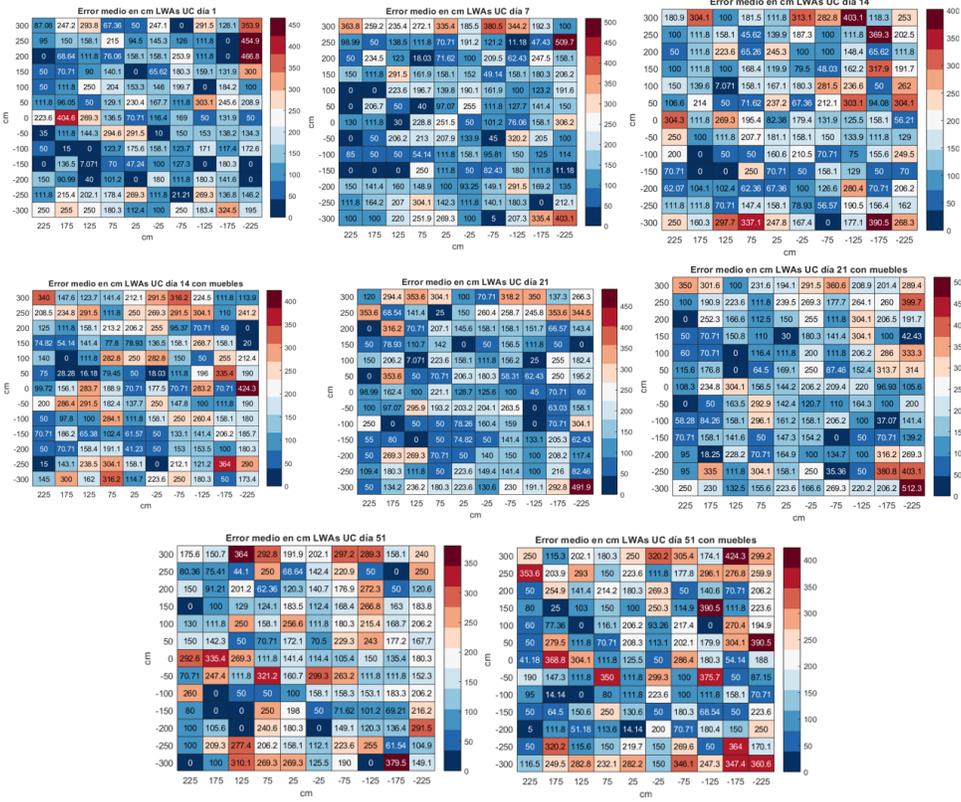


Figura 33. Errores medios de diferentes días para LWA en UC

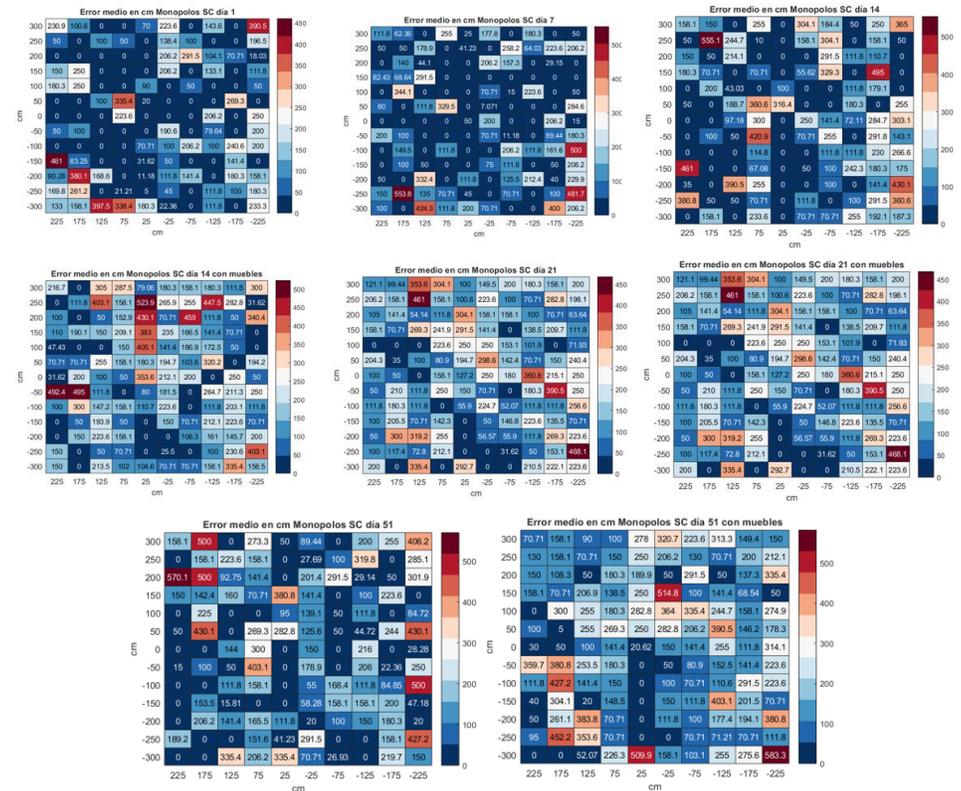


Figura 34. Errores medios de diferentes días para monopolos en SC

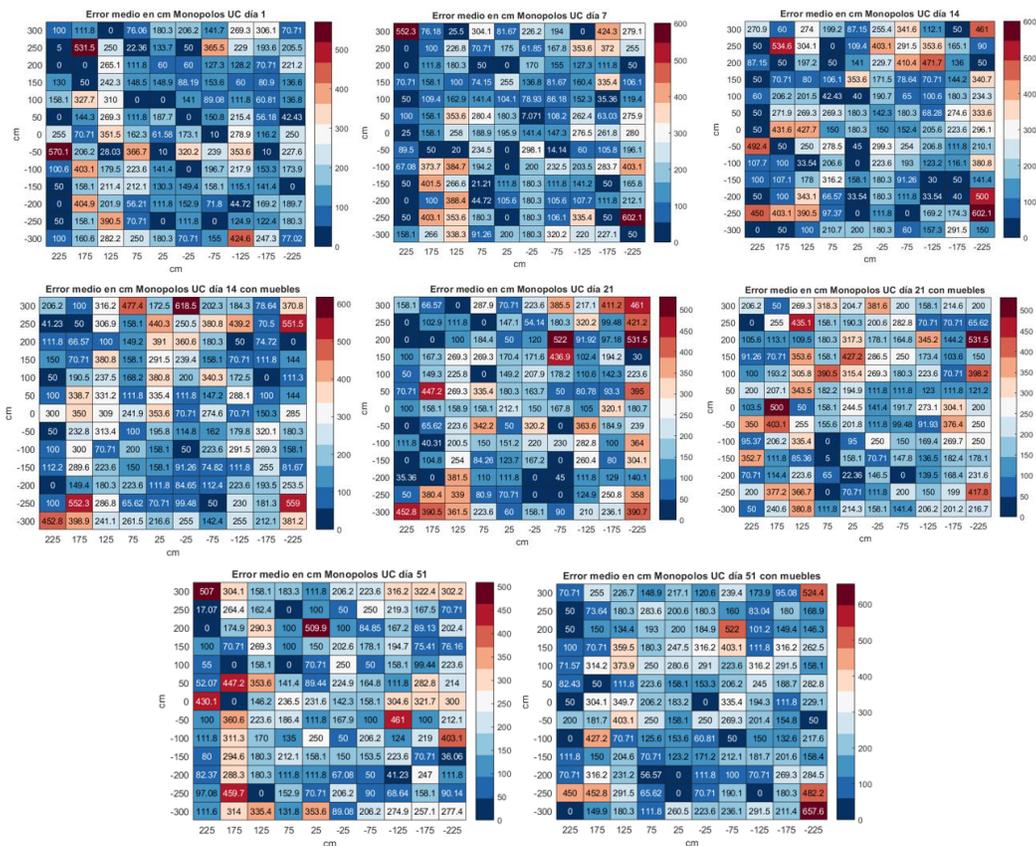


Figura 35. Errores medios de diferentes días para monopolos en UC

8. Análisis de resultados

Finalmente, tras mostrar los distintos datos procesados sobre el error medio obtenido en cada uno de los puntos, en este apartado se llevará a cabo un análisis numérico de los resultados obtenidos con respecto del uso del usar LWA vs Monopulos empleando las técnicas de SC y de UC para la localización de dispositivos IoT. Para ello, en la

Tabla 10 podemos ver un resumen de todas las medidas (a lo largo de los días y con o sin muebles) y diferenciando entre el uso de SC o UC. Las métricas que se han empleado para este análisis numérico son el error medio, el RMSE (Root Mean Square Error) y el percentil 90th. Como hemos comentado anteriormente, se analizan los resultados tanto en el escenario original como introduciendo muebles en el escenario de medidas para comprobar la fiabilidad y resistencia de las técnicas empleadas frente a las variaciones del entorno.

Tabla 10. Resumen de resultados

	LWA SC			Monopolos SC			LWA UC			Monopolos UC		
	Mean	RMSE	90th percentile	Mean	RMSE	90th percentile	Mean	RMSE	90th percentile	Mean	RMSE	90th percentile
Día 1	75.08cm	126.42cm	220.79cm	87.35cm	137.99cm	236.94cm	142.93cm	171.71cm	269.25cm	153.7cm	190.76cm	308.06cm
Día 8	74.85cm	123.42cm	228.07cm	89.62cm	147.72cm	226.76cm	147.99cm	175.97cm	270.68cm	167.08cm	205.77cm	345.94cm
Día 14	81.57cm	137.12cm	246.95cm	124.51cm	181.57cm	304.13cm	150.99cm	174.08cm	280.95cm	181.71cm	223.96cm	385.65cm
Día 14 muebles	115.54cm	163.19cm	279.55cm	153.68cm	197.11cm	327.78cm	162.38cm	185.88cm	290.77cm	205.40cm	241.14cm	380.78cm
Día 21	60.35cm	108.26cm	203.07cm	91.13cm	146.59cm	250.56cm	147.69cm	176.98cm	293.60cm	175.95cm	218.05cm	380.96cm
Día 21 muebles	122.34cm	171.23cm	302.68cm	148.76cm	180.45cm	287.19cm	171.80cm	197.94cm	304.13cm	194.21cm	223.11cm	360.11cm
Día 28	88.88cm	143.68cm	295.77cm	113.29cm	169.48cm	283.85cm	159.58cm	190.65cm	304.74cm	173.73cm	207.28cm	327.78cm
Día 28 muebles	110.29cm	156.27cm	300cm	155.62cm	202.17cm	340.56cm	163.48cm	189.97cm	292.41cm	184.50cm	216.15cm	349.67cm
Día 51	88.15cm	137.31cm	206.04cm	131.74cm	187.47cm	310.81cm	157.60cm	179.47cm	270.79cm	177.61cm	209.72cm	318.96cm
Día 51 muebles	116.72cm	166.20cm	263.12cm	173.49cm	212.02cm	344.44cm	172.90cm	200.89cm	312.76cm	193.66cm	226.47cm	325.82cm

Para una mejor visualización de los resultados de la

Tabla 10, en la Figura 36 podemos ver la evolución temporal de la media del error y el error cuadrático medio donde en la Figura 36.a y Figura 36.b se muestra la evolución temporal del error medio en centímetros para los casos con y sin muebles. De forma similar, en la Figura 36.c y Figura 36.d se muestra la evolución temporal del RMSE para los casos con y sin muebles.

De los resultados mostrados en la

Tabla 10 y la Figura 36, se puede comprobar como el uso de LWA con la técnica de SC tiene el mejor desempeño que el resto de sistemas empleados, tanto frente a LWA con UC como para los sistemas generados con Monopolos SC y Monopolos UC. Estos resultados concuerdan con la dispersión de la función de probabilidad de la correlación que se muestra en la Figura 31. Si dejamos a un lado las mediciones con muebles, la mejora respecto del error medio entre LWA y monopolos con SC es de 12.27 cm el día 1 (14.04%), 14.77 cm día 8 (16.48%), 42.94 cm día 14 (34.48%), 30.78 cm (33,77%) para el día 24.41 cm (21.54%) para el día 28 y 43.59 cm (33.08%) para el día 51.

En los monopolos específicamente, con SC se tiene un mejor desempeño que los monopolos con UC. Aunque las frecuencias de los 3 canales están próximas y, teóricamente, las RSSI medidas en cada canal deberían de ser parecidas en cada punto, si nos fijamos en la Figura 24 y Figura 26, en la práctica, las medidas de RSSI presentan diferencias espaciales. En algunos casos se ven variaciones de hasta 10 dB para un mismo punto y diferente canal. También es importante tener en cuenta que, además de estas variaciones, para el caso de SC se caracteriza cada punto con 12 RSSI (4 monopolos y 3 canales) mientras que para UC se tiene solo 4 RSSI por punto. Entonces, se tiene un vector característico con mayores

componentes en el caso de SC que en UC. Esto se traduce en una mayor posibilidad de correlación. En cuanto a UC, el empleo de LWA presenta un mejor funcionamiento que en caso del empleo de monopolos.

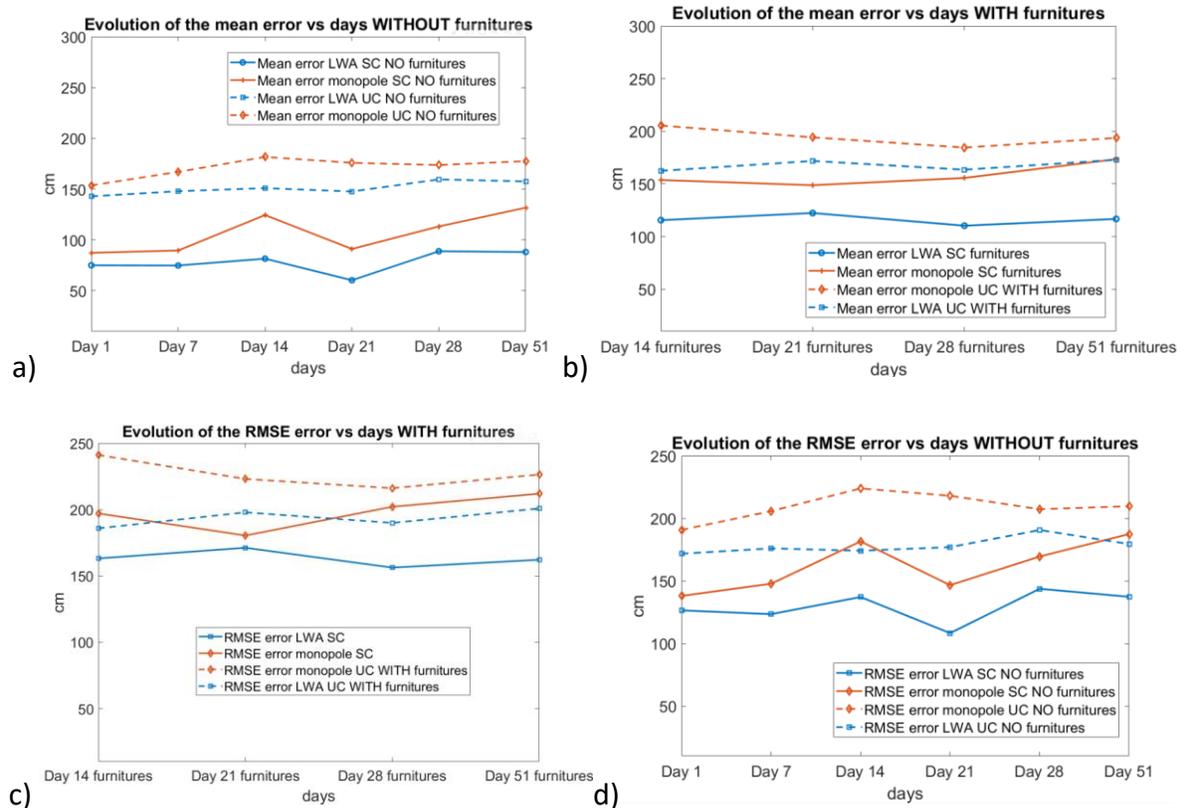


Figura 36. a) Evolución temporal de las medidas de la media del error; b) Evolución temporal del error cuadrático medio; c) Evolución temporal de la media del error sin muebles; d) Evolución temporal de la media del error con muebles; e) Evolución temporal del error cuadrático medio sin muebles; f) Evolución temporal del error cuadrático medio con muebles

También es importante observar cómo absorben los cambios en el entorno ambos sistemas SC. Se puede ver que para el día 14 con muebles, usando el error medio, LWA SC tiene 38.14 cm (24.81%) menos de error que Monopolo SC para el día 14, 26.42 cm (17.76%) para el día 21, 45.33 cm (29.12%) para el día 28 y 56.77 cm (32.72%) para el día 51. Si los comparamos entre ellos, parece poca variación, pero si los comparamos con respecto del día 1, sí que se tiene mucha mejor variación. Es decir, las variaciones con respecto del día 1 para LWA SC son 40.46 cm, 47.26 cm, 35.21 cm y 41.64 cm peores en los días 14, 21, 28 y 51 con muebles respectivamente, mientras que aumenta el error en el caso de Monopolo SC 66.33 cm, 61.41 cm, 68.27 cm y 86.14 cm para los días 14, 21, 28 y 51 con muebles respectivamente.

9. Conclusiones

Como primera conclusión de este trabajo, se ha demostrado que se puede generar un sistema de localización de dispositivos IoT mediante tecnología BLE empleando antenas LWA y la técnica de Fingerprinting Separate Channel. Esto ha sido posible empleando el hardware de módulos Sena Parani UD100 junto con el software de Ubuntu y programando

en Python con la librería BlueZ, que nos permite modificar los campos necesarios de la comunicación BLE para poder personalizar el canal de advertising en que los paquetes son enviados con el fin de poder generar un fingerprinting con un mayor número de componentes y mayor diferencia en cuanto a su distribución espacial se refiere.

Como conclusión a los diagramas de radiación medidos experimentalmente, se muestra la diferencia en la distribución de la RSSI tal y como se esperaba de los resultados teóricos. Sin embargo, debido al multipath, se puede observar que están desplazados hacia la izquierda (Figura 23 y Figura 24).

Por último, como conclusión final de este trabajo, podemos afirmar que el uso de antenas LWA con la técnica SC aportan una notable mejoría en los sistemas de localización de dispositivos IoT que se generan habitualmente sin tener en cuenta la diversidad espacial que aportan este tipo de antenas. Dicha mejora supone de hasta aproximadamente un 30% en la precisión de la localización debido al uso de LWA frente a los monopolos tradicionales.

10. Bibliografía

- [1]- F. Khelifi, A. Bradai, A. Benslimane, P. Rawat, and M. Atri, "A survey of localization systems in Internet of Things," *Mobile Netw. Appl.*, vol. 24, no. 3, pp. 761–785, Jun. 2019.
- [2]- P. Spachos, I. Papapanagiotou, and K. N. Plataniotis, "Microlocation for smart buildings in the era of the Internet of Things: A survey of technologies, techniques, and approaches," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 35, no. 5, pp. 140–152, 2018.
- [3]- F. Liu et al., "Survey on WiFi-based indoor positioning techniques," *IET Commun.*, vol. 14, no. 9, pp. 1372–1383, Jun. 2020,
- [4]- K. E. Jeon, J. She, P. Soonsawad, and P. C. Ng, "BLE beacons for Internet of Things applications: Survey, challenges, and opportunities," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 2, pp. 811–828, 2018.
- [5]- Bluetooth, "Specification of the Bluetooth System. Core Version 4.0.," vol. 0, no. June, 2010. https://es.wikipedia.org/wiki/Bluetooth_de_baja_energ%C3%ADa
- [6]- Bluetooth, "Specification of the Bluetooth System. Core Version 5.1.," vol. 0, no. January, 2019.
- [7]- S. He and S.-H. G. Chan, "Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 1, pp. 466–490, 1st Quart., 2016
BLE fingerprinting
- [8]- R. Faragher and R. Harle, "Location fingerprinting with Bluetooth low energy beacons," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 33, no. 11, pp. 2418–2428, Nov. 2015.
- [9]- L. Kanaris, A. Kokkinis, M. Raspopoulos, A. Liotta and S. Stavrou, "Improving RSS fingerprint-based localization using directional antennas," in *Proc. 8th Eur. Conf. Antennas Propag.* (EuCAP 2014), pp. 1593- 1597, 2014.
- [10]- Q. Cheng, A. Alomainy, Y. Hao, "Effect of antenna directivity on the accuracy of fingerprint-based localisation," in *Proc. Int. Conf. on Wireless Mobile Communication and Healthcare*, 2015.
- [11]- R. Guzman-Quiros, A.J. Martinez-Salas, J. L. Gomez-Tornero, and J. Garcia-Haro, "Integration of directional antennas in an RSS fingerprinting-based indoor localization system," *Sensors*, vol. 16, no. 1:4:, Dec. 2015.
- [12]- G. Giorgetti, A. Cidronali, S. K. S. Gupta and G. Manes, "Single-anchor indoor localization using a switchedbeam antenna," *IEEE Comm. Lett.*, vol. 13, no. 1, pp. 58-60, Jan. 2009. SBA.

- [13]- S. Maddio, M. Passafiume, A. Cidronali and G. Manes, "A distributed positioning system based on a predictive fingerprinting method enabling sub-metric precision in IEEE 802.11 networks," *IEEE Trans. On Microwave Theory and Tech.*, vol. 63, no. 12, pp. 4567-4580, Dec. 2015. SBA
- [14]- A. Kokkinis, L. Kanaris, A. Liotta, S. Stavrou, "RSS indoor localization based on a single access point," *Sensors*, vol. 19, no.17:3711, 2019 à single AP to create efficient radiomap / fingerprinting
- [15]- Y. Zhang and K. Psounis, "Efficient indoor localization via switched-beam antennas," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 19, no. 9, pp. 2101-2115, Sep. 2020. SBA
- [16]- S. Ishida, Y. Takashima, S. Tagashira, and A. Fukuda, "Proposal of separate channel fingerprinting using Bluetooth Low Energy", in *Proc. IIAI Int. Congress Adv. Appl. Inf. (AAI), ESKM*, pp. 230-233, Jul. 2016.
- [17]- J. Powar, C. Gao, and R. Harle, "Assessing the impact of multi-channel BLE beacons on fingerprint based positioning", *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2017, pp. 1–8.
- [18]-S. Ishida, Y. Takashima, S. Tagashira, and A. Fukuda, "Design and initial evaluation of Bluetooth Low Energy separate channel fingerprinting," in *New Trends in E-Service and Smart Computing, Studies in Computational Intelligence*, T. Matsuo, T. Mine, and S. Hirokawa, Ed. Springer Verlag, vol. 742, pp. 19-33, 2018.
- [19]- G. De Blasio, A. Quesada-Arencibia, C. R. Garcia, J. C.Rodriguez-Rodriguez, R. Moreno-Diaz, "A protocol channel-based indoor positioning performance study for Bluetooth Low Energy", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 33440-33450, 2018.
- [20]- S. Ishida, S. Takaki, T. Yamamoto, S. Tagashira, A. Fukuda, "Evaluation of BLE separate channel fingerprinting in practical environment", *Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI) 2018 7th International Congress on*, pp. 121-124, 2018.
- [21]- B. Huang, J. Liu, W. Sun, and F. Yang, "A robust indoor positioning method based on Bluetooth Low Energy with separate channel information" *Sensors*, vol.19, no. 16: 3487, 2019.
- [22]- T. Yamamoto, S. Ishida, R. Kimoto, S. Tagashira and A. Fukuda, "Design of BLE 2-step separate channel fingerprinting," in *Proc. IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, pp. 1-6, 2020.
- [23]- M. Nikodem, P. Szeliński, "Channel diversity for indoor localization using Bluetooth Low Energy and extended advertisements", *IEEE Access*, vol.9, pp.169261-169269, 2021.
- [24]- C. Gentner, D. Gunther, P. H. Kindt, "Identifying the BLE advertising channel for reliable distance estimation on smartphones", *IEEE Access*, vol.10, pp.9563-9575, 2022.

[25]- B. Yao, W. Wang, W. Han and Q. Yin, "Distributed angle estimation by multiple frequencies synthetic array in wireless sensor localization system," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 2, pp. 876-887, February 2014.

[26]- S. Rozum and J. Sebesta, "SIMO RSS measurement in Bluetooth low power indoor positioning system," in *Proc. 2018 28th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, pp. 1-5, 2018.

[27]- B.K.P. Horn, "Doubling the accuracy of indoor positioning: Frequency diversity," *Sensors*, vol. 20, no.5:1489, 2020.

[28]- A.J. Martinez-Ros, J.L. Gómez-Tornero and G. Goussetis, "Frequency scanning leaky wave antenna for positioning and identification of RFID tags," 2011 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications, Sitges, 2011, pp. 451-456.

[29]- M. Poveda-Garcia, D. Canete-Rebenaque, and J.L. Gomez-Tornero, "Frequency-Scanned Monopulse Pattern Synthesis Using Leaky-Wave Antennas for Enhanced Power-Based Direction-of-Arrival Estimation", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 11, pp. 7071-7086, Nov. 2019.

[30]- J.L. Gomez-Tornero, "Smart leaky-wave antennas for iridescent IoT wireless networks", Ch.4 in *Antenna and Array Technologies for Future Wireless Ecosystems*, Y. J. Guo and R. W. Ziolkowski (editors), Ed. John Wiley & Sons. 2022.

[31]- M. Poveda-Garcia, et al., "Dynamic Wireless Power Transfer for Cost-Effective Wireless Sensor Networks using Frequency-Scanned Beaming", *IEEE Access Journal Special Section on Wirelessly Powered Networks*, vol. 7, pp. 8081-8094, Jan. 2019.

[32]- A. Gil-Martínez, M. Poveda-García, and J.L. Gómez-Tornero, "Wi-Fi Direction Finding with Frequency-Scanned Antenna and Channel-Hopping Scheme", *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 6, pp. 5210-5222, Mar. 2022.

[33]- J.A. Lopez-Pastor, M. Poveda-García, A. Gil-Martínez, D. Cañete-Rebenaque, and J.L. Gómez-Tornero, "2-D localization system for mobile IoT devices using a single Wi-Fi access point with a passive frequency-scanned antenna", *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 17, pp. 14995-15011, 1 Sept.1, 2023.

[34]- A. Gil-Martínez, M. Poveda-García, D. Cañete-Rebenaque, and J.L. Gómez-Tornero, "Metasurface antenna for fast frequency scanning with application to conical direction finding", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 7, pp. 1632-1636, Jul. 2023.

[35]- A. Gil-Martinez, M. Poveda-Garcia, D. Canete-Rebenaque, and J.L. Gomez-Tornero, "Frequency-scanned monopulse antenna for RSSI-based direction finding of UHF RFID tags", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 1, pp. 158-162, Jan. 2022.

- [36]- A. Gil-Martinez, M. Poveda-Garcia, J. Garcia-Fernandez, M. M. Campo-Valera, D. Canete-Rebenaque, and J.L. Gomez-Tornero, "Direction finding of RFID tags in UHF band using a passive beam-scanning leaky-wave antenna", *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 6, pp. 552-563, Jun. 2022.
- [37]- M. Campo-Valera, M. Poveda-Garcia, J. Garcia-Fernandez, A. Gil-Martinez, D. Canete-Rebenaque and J. L. Gomez-Tornero, "Laboratory to Develop a Practical Hand-Made Monopulse Antenna for RFID Localization Systems," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 132108-132120, Dec. 2022
- [38]- J.L. Gomez-Tornero, A. Gil-Martinez, M. Poveda-Garcia, and D. Canete-Rebenaque, "ARIEL: passive beamscanning Antenna terminal for Iridescent and Efficient LEO satellite connectivity", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Special Cluster on Disruptive Beam-Steering Antenna Technologies for Emerging and Future Satellite Services*, vol. 21, no. 11, pp. 2268-2272, Nov. 2022.
- [39]- M. Poveda-García, A. Gómez-Alcaraz, D. Cañete-Rebenaque A. S. Martínez-Sala, J.L. Gómez-Tornero, "RSSIbased direction-of-departure estimation in Bluetooth Low Energy using an array of frequency-steered leaky-wave antennas", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 9380-9394, Jan. 2020.
- [40]- M. Poveda-Garcia, A. G. Martinez and J. L. Gomez-Tornero, "Frequency-scanned focused leaky-wave antennas for direction-of-arrival detection in proximity BLE sensing applications," in *Proc. 14th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP 2014)*, Mar. 2020, pp. 1–4.
- [41]- M. Poveda-García, E. Andreu-García, J. García-Fernández, D. Cañete-Rebenaque, J.L. Gómez-Tornero, "Frequency-scanned leaky-wave antenna topologies for two-dimensional direction of arrival estimation in IoT wireless networks," in *Proc. 15th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP 2021)*, Mar, 2021, pp. 1–4.
- [42]- J.L. Gomez-Tornero, M. Poveda-Garcia, R. Romero-Justiniano, A. Gil-Martinez, D. Canete-Rebenaque, "Design of frequency-beam scanning antenna for Ultra Wide Band impulse RADAR applications", in *17th European Conf. on Antenna and Propag. (EuCAP 2023)*, pp. 1- 4. Mar. 2023.
- [43]- D. Zelenchuk, A.J. Martinez-Ros, T. Zvolensky, J.L Gomez-Tornero, G. Goussetis, N. Buchanan, D. Linton, and V. Fusco, "W-band planar wide-angle scanning antenna architecture," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 34, Issue 2, pp.127-139, Jan. 2013
- [44]- M. Poveda-Garcia, A. Gil-Martinez, F. Salmeron, J.L. Gomez-Tornero, "Frequency-beam-scanning mmwave antennas for direction finding RADAR", *19th European Radar Conference*, pp.1-4, Sep. 2022.

- [45]- R. Guzman-Quiros, A.J. Martinez-Salas, J. L. Gomez-Tornero, and J. Garcia-Haro, "Integration of directional antennas in an RSS fingerprinting-based indoor localization system," *Sensors*, vol. 16, no. 1:4, Dec. 2015.
- [46]- [J.L. Gomez-Tornero, D. Canete-Rebenaque, J.A. Lopez-Pastor, and A. Martinez-Salas, "Hybrid analogdigital processing system for amplitude-monopulse RSSI-based MiMo WiFi direction-of-arrival estimation", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol.12, no.3, pp. 529-540, June 2018
- [47]- J.A. Lopez-Pastor, A. Gomez-Alcaraz, D. Canete-Rebenaque, A.S. Martinez-Sala, and J.L. Gomez-Tornero, "Near-field monopulse doa estimation for angle-sensitive proximity WiFi readers", *IEEE Access*, vol. 7, no. 1, pp. 88450- 88460, June. 2019.
- [48]- J.A. Lopez-Pastor, P. Arques-Lara, J.J Franco-Penaranda, A.J. Garcia-Sanchez and J.L. Gomez-Tornero, "Wi-Fi RTT-based active monopulse RADAR for single access point localization", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 34755-34766, Feb. 2021.
- [49]- A. Gil-Martinez, J.A. Lopez Pastor, M. Poveda-Garcia, A. Algaba-Brazalez, D. Canete-Rebenaque, and J.L. Gomez-Tornero, "Monopulse leaky-wave antennas for RSSI-based direction finding in wireless local área networks," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, in press 2023.
- [50]- A. Oliner and K. Lee, "Microstrip leaky wave strip antennas," in *Antennas and Propagation Society Int. Symp.*, Jun. 1986, vol. 24, pp. 443–446.
- [51]- A. A. Oliner, "Leakage from higher modes on microstrip line with application to antennas," *Radio Sci.*, vol. 22, pp. 907–912, Nov. 1987.
- [52]- K. S. Lee, "Microstrip Line Leaky Wave Antenna," Ph.D. dissertation, Polytechnic Inst., Brooklyn, New York, Jun. 1986.
- [53]- J.L. Gomez-Tornero, D. Canete, and A. Alvarez, "Microstrip leaky-wave antenna with control of leakage rate and only one main beam in the azimuthal plane ", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.56, No.2, pp. 335–344, Feb. 2008.
- [54]- A. Gil-Martinez, M. Poveda-Garcia, and J. L. Gómez-Tornero, "Direct synthesis of frequency-scanned monopulse half-width microstrip leaky-wave antennas," in *Proc. Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP 2020)*, pp. 1–4, 2020.
- [55]- L.O. Goldstone, A.A Oliner, "Leaky-Wave Antennas I: Rectangular Waveguide", *IRE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 7, no. 4, Oct. 1959.
- [56]- J.L. Gomez and A.A. Melcon, "Non-orthogonality relations between complex-hybrid-modes: an application for the leaky-wave analysis of laterally-shielded top-open planar transmission lines", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 52, No.3, pp. 760-767, March 2004.

- [57]- J.L. Gomez-Tornero, D. Canete and A. Alvarez-Melcon, "Printed-circuit leaky-wave antenna with pointing and illumination flexibility", *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, Vol.15, No.8, pp.536-538, August 2005.
- [58]- J.L. Gomez-Tornero, G.Goussetis, A.Feresidis, and A.A.Melcon, "Control of leaky-mode propagation and radiation properties in hybrid dielectric-waveguide printed-circuit technology: experimental results", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.54, No.11, pp.3383-3390, Nov. 2006.
- [59]- M. Garcia-Vigueras, J.L. Gomez-Tornero, G. Goussetis, J.S. Gomez-Diaz, and A. Alvarez-Melcon, "A modified pole-zero technique for the synthesis of waveguide leaky-wave antennas loaded with dipole-based FSS", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol.58, No.6, pp. 1971–1979, June 2010.
- [60]- M. Garcia-Vigueras, J.L. Gomez-Tornero, G. Goussetis, A. R. Wiley, and Y. Jay Guo, "Efficient synthesis of 1D fabry-perot antennas with low sidelobe levels," *IEEE Antennas and Wireless Propagat. Lett.*, vol.11, pp. 869 - 872, August 2012
- [61]- F. Xu and K. Wu, "Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 1, pp. 66–73, Jan. 2005.
- [62]- D. Deslandes and K.Wu, "Substrate integrated waveguide leaky-wave antenna: Concept and design considerations," in *Proc. APMC, Suzhou, China*, Dec. 2005, pp. 346–349.
- [63]- A.J. Martinez-Ros, J.L. Gomez-Tornero, and G. Goussetis, "Planar leaky-wave antenna with flexible control of the complex propagation constant", *IEEE Trans. Antennas Propagat*, vol.60, no.3, pp. 1625 - 1630, Mar. 2012.
- [64]- A. J. Martinez-Ros, J. L. Gomez-Tornero and G. Goussetis, "Broadside radiation from radial arrays of substrate integrated leaky-wave antennas," *European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 252-254, 2012.
- [65]- J.L. Gomez-Tornero , A.J. Martinez-Ros, A. Alvarez-Melcon, F. Mesa and F. Medina, "Substrate integrated waveguide leaky-wave antenna with reduced beam squint", *European Microwave Conference*, pp. 491-494, 2013.4
- [66]- A.J. Martinez-Ros, J.L. Gomez-Tornero, and G. Goussetis, "Multifunctional angular bandpass filter SIW leaky-wave antenna", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, no. , pp. 936-939, Oct. 2016.
- [67]- M. Poveda-García, and J.L. Gómez-Tornero, "Ambiguity resolution in amplitude-monopulse systems using broad-beam patterns", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 4, pp. 503-507, April 2021.
- [68]- J.L. Gomez Tornero, "Analysis and design of conformal tapered leaky wave antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.10, pp. 1068 - 1071, Oct. 2011.

- [69]- A.J. Martinez-Ros, J.L. Gomez-Tornero, and G. Goussetis, "Conformal tapered substrate integrated waveguide leaky-wave antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.62, no.12, pp.5983-5991, Dec. 2014
- [70]- A. Foroozesh, R. Paknys, D. R. Jackson and J. -J. Laurin, "Beam focusing using backward-radiating waves on conformal leaky-wave antennas based on a metal strip grating," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 11, pp. 4667-4677, Nov. 2015.
- [71]- I. Yoo and D. R. Smith, "Design of conformal array of rectangular waveguide-fed metasurfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 7, pp. 6060-6065, July 2022.
- [72]- H. Lee and D.-H. Kwon, "Conformal metasurfaces on a grounded dielectric substrate for leaky-wave antennas," *2022 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/URSI)*, pp. 451-452, 2022.
- [73]- H. Guerboukha, R. Shrestha, J. Neronha, Z. Fang, and D. M. Mittleman, "Conformal leaky-wave antennas for wireless terahertz communications," *Nat. Commun Eng*, vol, 2, no. 17 , pp. 1-9, 2023.
- [74]- Y. Ma, X. Shi, J. Wang, Y. Zhang, F. Sun, and F. Wu, "Millimeter-wave conformal directional leaky-wave antenna based on substrate-integrated waveguide," *Electronics*, vol.12, no. 14:3111, 2023.
- [75]- M. Poveda-Garcia, D. Canete-Rebenaque, G- Goussetis, J.L. Gomez-Tornero, "Coupling substrate-integrated waveguides to increase the gain bandwidth of leaky-wave antennas", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Special Issue on SIW Circuits and Systems, vol.66, no.6, pp. 3099-3109, June 2018.
- [76]- M. Poveda-Garcia and J. L. Gomez-Tornero, "Spectral analysis of broadband Fabry–Perot antennas with multiple coupled cavities," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 1, pp. 167-179, Jan. 2022.
- [77]- L. Wang, J.L. Gomez-Tornero, O. Quevedo-Teruel, "Substrate integrated waveguide leaky-wave antenna with wide bandwidth via prism coupling", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Special Issue on SIW Circuits and Systems, vol.66, no.6, pp. 3110 - 3118, June 2018.
- [78] - L. Wang, J.L. Gomez-Tornero, E. Rajo-Iglesias, O. Quevedo-Teruel, "Low-dispersive leaky-wave antenna integrated in groove gap waveguide technology", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.66, no.11, pp. 5727 - 5736, Nov. 2018
- [79]- D. Zheng, G. -B. Wu, D. Wang, K. F. Chan, K. Wu and C. H. Chan, "Planar leaky-wave antenna featuring wideband fixed-beam radiation and tailorable directional angle for millimeter-wave applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 4, pp. 3238-3250, Apr. 2023.

- [80]- Y. Pan, T. Ao and Y. Dong, "Fully planar single/fixed-beam ultrawideband leaky-wave antenna based on leaky grounded coplanar waveguide," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 22, no. 3, pp. 606-610, Mar. 2023
- [81]- A. Algaba-Brazalez and E. Rajo-Iglesias, "Design of a Butler matrix at 60GHz in inverted microstrip gap waveguide technology," in *Proc. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation* pp. 2125-2126, 2015.
- [82]- F. Pizarro, D. Ramirez-Gil, A. Algaba-Brazalez, L. Fernando Herran-Ontanon, and E. Rajo-Iglesias, "Comparison study of 4x4 Butler matrices in microstrip technologies for Ka-band," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 122, July 2020.
- [83]- L.-F. Herran, A. Algaba-Brazalez, and E. Rajo-Iglesias, "Ka-Band Planar Slotted Waveguide array based on groove gap waveguide technology with a glide-symmetric holey metasurface," *Scientific Reports, Nature*, vol. 11, no. 1, pp. 1-9, April 2021.
- [84]- F. V. Vidarsson et al., "Conformal Parallel Plate Waveguide Polarizer Integrated in a Geodesic Lens Antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 11, pp. 10327-10337, Nov. 2022
- [85]- P. Castillo-Tapia et al., "Two-dimensional beam steering using a stacked modulated geodesic luneburg lens array antenna for 5G and beyond," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 1, pp. 487- 496, Jan. 2023.
- [86]- A. Algaba-Brazalez, et al. "Flexible 6G antenna systems based on innovative lenses combined with array antennas." *2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2023.
- [87]- O. Zetterstrom et al. "V-Band geodesic generalized luneburg lens antenna with high beam crossover gain," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, in press 2023.
- [88] O. Zetterstrom, J. Rico-Fernández, J.L. Gómez-Tornero, and A. Algaba-Brazález, "Industrial Evolution of Lens Antennas towards 6G Radio Access Applications" in *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, in press 2024.
- [89] I. Andersson, L. Manholm, A. A. Brazalez and P. Aghdam, "Antenna System Requirements and Challenges Towards 6G - An Industrial View," *2023 International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, Aalborg, Denmark, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/iWAT57058.2023.10171734.
- [90]- S. Abielmona, H. V. Nguyen, and C. Caloz, "Analog direction of arrival estimation using an electronically scanned CRLH leaky-wave antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 4, pp. 1408–1412, Apr. 2011

[91]- H. Paaso et al., "DoA estimation using compact CRLH leaky-wave antennas: Novel algorithms and measured performance," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 65, no. 9, pp. 4836–4849, Sep. 2017.

[92]- M. K. Emara, D. J. King, H. V. Nguyen, S. Abielmona and S. Gupta, "Millimeter-wave slot array antenna front-end for amplitude-only direction finding," IEEE Trans. Antennas Propag, vol. 68, no. 7, pp. 5365-5374, Jul. 2020.

[93]- H. -J. Zhao, H. Chu, X. Zhu and Y. -X. Guo, "A 1-D electronic beam-scanning monopulse antenna array based on a compact stripline phase-shifter," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 19, no. 12, pp. 2477-2481, Dec. 2020.