

# Laboratorio de Ingeniería de Microondas: Aplicación de Antenas Impresas UHF Para Sistema de Localización



María Campo Valera  
Miguel Poveda García  
Joaquín García Fernández

José Antonio López Pastor  
Alejandro Gil Martínez  
David Cañete Rebenaque



---

# Laboratorio de Ingeniería de Microondas: Aplicación de Antenas Impresas UHF Para Sistema de Localización

Enero de 2024

---

María Campo Valera  
Miguel Poveda García  
Joaquín García Fernández  
José Antonio López Pastor  
Alejandro Gil Martínez  
David Cañete Rebenaque

© UMA Editorial. Universidad de Málaga  
Bulevar Louis Pasteur, 30 (Campus de Teatinos) - 29071 Málaga  
www.umaeditorial.uma.es

© Los autores ORCID 

Diseño y maquetación: Los autores

ISBN: 978-84-1335-323-4



Esta obra está sujeta a una licencia Creative Commons:  
Reconocimiento - No comercial - SinObraDerivada (cc-by-nc-nd):  
<http://creativecommons.org/licences/by-nc-nd/4.0/es>  
Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización  
pero con el reconocimiento y atribución de los autores.  
No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar,  
transformar o hacer obras derivadas.



# Índice general

Índice general	5
Índice de figuras	7
Índice de tablas	9
Introducción	11
Descripción y Objetivos del Proyecto	13
Estado del arte	15
<b>1 Introducción al sistema y especificaciones</b>	<b>19</b>
1.1 Objetivos . . . . .	19
1.2 Trabajo previo a la sesión de laboratorio . . . . .	21
1.3 Trabajo durante la sesión de laboratorio . . . . .	22
<b>2 Diseño, fabricación y prueba de la antena. Medidas analógicas</b>	<b>25</b>
2.1 Objetivos . . . . .	25
2.2 Trabajo previo a la sesión de laboratorio . . . . .	27
2.3 PARTE 1: Trabajo durante la sesión de laboratorio . . . . .	31
2.4 PARTE 2: Trabajo durante la sesión de laboratorio . . . . .	37
<b>3 Integración del Sistema con el lector RFID programado. Medidas digitales</b>	<b>41</b>
3.1 Objetivos . . . . .	41
3.2 Trabajo previo a la sesión de laboratorio . . . . .	43
3.3 Trabajo durante la sesión de laboratorio . . . . .	43
<b>4 Procesamiento de señales para la estimación de la DOA</b>	<b>47</b>
4.1 Objetivos . . . . .	47
4.2 Trabajo previo a la sesión de laboratorio . . . . .	48

---

4.3 Trabajo durante la sesión de laboratorio . . . . .	48
<b>5 Montaje experimental y pruebas en exteriores</b>	<b>55</b>
5.1 Objetivos . . . . .	55
5.2 Trabajo previo a la sesión de laboratorio . . . . .	57
5.3 Trabajo durante a la sesión de laboratorio . . . . .	57
<b>Conclusiones</b>	<b>60</b>
<b>A Recursos disponibles en IEEE APS</b>	<b>63</b>
<b>B Coste de los materiales</b>	<b>65</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>65</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>67</b>

# Índice de figuras

1	Esquema del sistema de localización de tags RFID propuesto . . . . .	15
1.1	Materiales proporcionados para la sesión práctica I . . . . .	20
1.2	Equipos de laboratorio utilizados para la sesión práctica I . . . . .	20
1.3	Esquema del sistema monopulso basado en PLWA. . . . .	22
2.1	Materiales proporcionados para la sesión práctica II . . . . .	26
2.2	Equipos de laboratorio utilizados para la sesión práctica II . . . . .	26
2.3	Antena Leaky-Wave . . . . .	28
2.4	Diseño de la antena a fabricar . . . . .	29
2.5	Optimización del ancho $W$ de la cinta radiante . . . . .	32
2.6	Parámetros S de la antena simulados en HFSS . . . . .	33
2.7	Proceso de fabricación de la HWM LWA . . . . .	36
2.8	Medidas experimentales de los diagramas de radiación analógicos . . . . .	37
2.9	Parámetros S medidos . . . . .	39
3.1	Materiales proporcionados para la sesión práctica III . . . . .	42
3.2	Equipos de laboratorio utilizados para la sesión práctica III . . . . .	42
3.3	Montaje experimental e integración del sistema . . . . .	44
3.4	Montaje experimental en cámara anecoica . . . . .	44
3.5	Patrones de radiación digitales normalizados . . . . .	46
4.1	Equipos de laboratorio utilizados para la sesión práctica IV . . . . .	48
4.2	Patrón de radiación digital normalizado . . . . .	50
4.3	Estimación de la DoA . . . . .	52
5.1	Materiales proporcionados para la sesión práctica V . . . . .	56
5.2	Equipos de laboratorio utilizados para la sesión práctica V . . . . .	56
5.3	Montaje experimental en escenario real . . . . .	57
5.4	Pseudoespectro Angular (APS) para los tres canales empleados. . . . .	59





# Índice de tablas

2.1	Valores analíticos y numéricos de las dimensiones de la antena . . . . .	32
2.2	Dimensiones de la red de alimentación . . . . .	33
5.1	Ángulos esperados y medidos en escenario real . . . . .	60



# INTRODUCCIÓN

En el paradigma del Internet de las Cosas (IoT), la localización de dispositivos móviles usando redes de comunicaciones inalámbricas, es una de las tecnologías habilitadoras claves para el desarrollo de nuevas aplicaciones con una mayor eficiencia energética y por lo tanto tecnologías más verdes y sostenibles [1, 2].

Dentro del contexto del posicionamiento en interiores, en los últimos años se vienen desarrollando diferentes sistemas de antenas 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 [3]. Entre las distintas tecnologías de antenas disponibles, las antenas de ondas de fuga (*Leaky-Wave Antenna*, LWA), presentan unas propiedades interesantes por su sencilla alimentación, estructura compacta y capacidad de generar haces directivos escaneados en frecuencia [2, 3]. Estos sistemas se muestran muy eficientes cuando se han aplicado en redes inalámbricas de sensores (WSN) de tipo Zigbee (IEEE 802.15.4) [4], redes de área local (WLAN) de tipo Wi-Fi (IEEE 802.11) [5–7], sensores pasivos RFID y sensores activos LoRa en la banda de UHF [8–11], y también con radiobalizas o beacons BLE 4.0 [12–14]. Todos estos diseños de sistemas de antenas [4–14] operan en bandas por debajo de 6 GHz (banda UHF de 900 MHz para RFID y LoRa, banda de 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 entre los 5 GHz a 8 GHz [15], y de antenas en bandas milimétricas para RADAR [16, 17].

Además de las antenas LWA, se vienen desarrollando sistemas de antenas para localización en redes WiFi usando agrupaciones de antenas comerciales directivas, ya sea de forma distribuída [18], o en configuración compacta monopulso [19–21]. Tal y como se explica en [22], las LWAs permiten realizar diseños más compactos y con mejores prestaciones que las agrupaciones de antenas. Estas antenas se pueden realizar en tecnología impresa [2, 23–27], en tecnología guía de onda [28], en tecnologías híbridas que combinan guías y circuitos impresos [29–33], o en guía de onda integrada en substrato (*Substrate Integrated Waveguide*, SIW) [34–40].

Por último, conviene mencionar que las LWAs se pueden usar para transferencia inalámbrica de energía [4, 41, 42] como antenas multi-haz para comunicaciones 5G [43, 44] y para sistemas de antenas con comunicaciones y capacidades de sensorización conjuntas (joint communication and sensing systems) [45–47], siendo por tanto un tipo de antenas muy prometedor para aplicaciones 6G [48–52].

Por otra parte, el aprendizaje basado en proyectos es una metodología que permite a los estudiantes adquirir los conocimientos y competencias claves en el siglo XXI mediante la elaboración de proyectos que dan respuesta a problemas de la vida real. Se trata de una metodología activa, en la que los estudiantes son los protagonistas de su aprendizaje: investigan, crean, aprenden, aplican lo aprendido en una situación real, comparten su experiencia con otras personas y analizan los resultados.

Este libro pretende servir como una base para prácticas de laboratorio de una asignatura dentro de la rama de la Ingeniería de Microondas presente en las titulaciones de Grado de Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación, Tecnologías de Telecomunicación, Ingeniería Electrónica o equivalentes. Se trata de una asignatura eminentemente práctica que contempla la generación de subsistemas y sistemas completos basados en microondas. Por lo que se cree necesario 30 horas de sesiones formativas para desarrollar el conocimiento práctico aplicado.

Se proponen 5 prácticas de laboratorio donde en cada una de ellas se le introduce al estudiante el problema a desarrollar en cuestión y se le hacen preguntas que tendrá que responder sobre la base de los resultados obtenidos y/o explicaciones contenidas dentro de las mismas prácticas.

Gracias a esto y mediante un enfoque de docencia orientada a proyectos, los alumnos serán capaces de realizar sus propios diseños de antenas de microondas. Posteriormente, los podrán construir mediante técnicas de fabricación manuales y realizar medidas experimentales que permitan la caracterización de las antenas fabricadas. Con todo, los estudiantes implementarán un sistema de detección similar al radar utilizando las antenas fabricadas.

Por último, se espera que los estudiantes obtengan los siguientes conocimientos que abarcan desde las competencias generales hasta las específicas, detalladas a continuación:

1. Competencias generales.

- (a) Conocimiento de materias básicas y tecnologías, que le capacite para el aprendizaje de nuevos métodos y tecnologías, así como que le dote de una gran versatilidad para adaptarse a nuevas situaciones.

2. Competencias específicas.

- (a) Capacidad para la selección de circuitos, subsistemas y sistemas de radiofrecuencia, microondas, radiodifusión, radioenlaces y radiodeterminación.

3. Competencias transversales.

- (a) Aplicar a la práctica los conocimientos adquiridos.
- (b) Aplicar criterios éticos y de sostenibilidad en la toma de decisiones.



# DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

A lo largo del proyecto, los estudiantes desarrollarán un sistema para localizar etiquetas o tags RFID pasivos mediante la estimación de la dirección de llegada (*Direction-of-Arrival*, DoA) monopulso. Un esquema del sistema se ilustra en la figura 1, el cual consiste de una antena conectada a un lector RFID comercial y un computador portátil para realizar la estimación de la DoA. Además, se utilizarán etiquetas pasivas RFID comerciales que demuestran la capacidad del sistema para estimar su posición angular.

Cada una de las 5 sesiones prácticas de laboratorio propuestas se explicarán con detalle a lo largo del texto, especificando los materiales necesarios y el software proporcionado a los estudiantes. La duración del proyecto tiene un total de 30 horas, conformado por 23 horas de laboratorio y 7 horas de trabajo en casa. Las horas de casa se utilizan para la preparación previa de la sesión de laboratorio así como la elaboración un informe del trabajo y resultados obtenidos en cada sesión.

Como se comentó en la Introducción, estas prácticas de laboratorio pueden ser incluidas en un módulo dentro de un Grado o Máster en Ingeniería de Telecomunicaciones o afín.

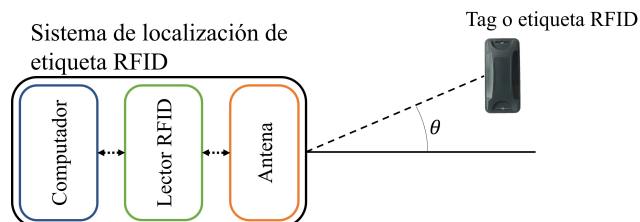


Figura 1: Esquema del sistema de localización de tags RFID propuesto.





## ESTADO DEL ARTE

La enseñanza del electromagnetismo (EM) ha sido un tema que viene evolucionando a lo largo de los años [53–57], y como resultado, se han desarrollado diversas propuestas para que los estudiantes tomen un papel activo en el proceso de aprendizaje. En [54] se expone cómo los estudiantes valoran positivamente los laboratorios prácticos y las simulaciones, mientras que en [55], la fabricación de dispositivos de EM hechos a mano con materiales simples muestran la viabilidad de introducir este tipo de laboratorios de enseñanza con un presupuesto reducido. En particular, la enseñanza a través de proyectos ha ganado mucho interés en los últimos años [58–62] ya que permite a los alumnos desarrollar un sistema completo, lo que les ayuda a comprender mejor el papel que juega cada dispositivo.

Por ejemplo, en [58] se propone a los alumnos desarrollar el sistema de control de un pequeño radiotelescopio, bajo la supervisión de los profesores, desde el diseño y fabricación de los circuitos de radiofrecuencia (RF) hasta el uso de diferentes herramientas de software para controlar los motores de la antena receptora. La forma de implementar el aprendizaje basado en proyectos en los cursos de EM se expone en [60–62].

Este enfoque se ha aplicado específicamente a la enseñanza de antenas [62–65], donde un papel activo por parte de los estudiantes es clave para desarrollar las habilidades necesarias para un ingeniero de antenas. De este modo, la teoría se relaciona con las aplicaciones del mundo real y se pueden comprender en profundidad los diferentes requisitos de un diseño de antena específico; como el diagrama de radiación, la eficiencia de radiación o el ancho de banda. Los requisitos pueden comprenderse mejor si las antenas forman parte de un sistema real, de modo que se establezcan las especificaciones para el diseño, presentando así a los estudiantes un escenario real para la ingeniería de las antenas. En este sentido, los sistemas de radar monopulso son de gran interés ya que combinan el diseño de la antena con el procesamiento de la señal. Por esta razón, se han presentado diferentes laboratorios de sistemas monopulso en la literatura [66–68]. En [66] y [68] se utilizan antenas comerciales para desarrollar el sistema monopulso, implicando una selección

adecuada de la topología de antena restringida a los requisitos del sistema. Sin embargo, no se lleva a cabo el proceso completo de diseño y fabricación de estas antenas. Por ejemplo, en [67], se diseña una antena dipolo Yagi planar específicamente para el sistema monopulso. A través de este proceso, los estudiantes también pueden adquirir conocimientos sobre técnicas de fabricación.

Recientemente se han propuesto sistemas monopulso utilizando antenas planas [3,69–71]. Este tipo de antenas resulta muy interesante debido a su capacidad para fabricarse fácilmente con materiales de bajo costo y la instrumentación típicamente disponible en las instalaciones universitarias. Específicamente, las Antenas Planas de Onda de Fuga (*Planar Leake-Wave Antenna*, PLWA) han despertado un gran interés como elementos receptores en sistemas de estimación de la Dirección de Llegada (*Direction-of-Arrival*, DoA) [3,71–73]. Estas antenas ofrecen un mecanismo de barrido del haz sin necesidad de circuitos electrónicos de control, evitando así la complejidad adicional, la complicación del diseño y el aumento de los costos en hardware.

Considerando lo anterior, los autores proponen un proyecto basado en 5 sesiones prácticas de laboratorio aplicado a la localización de etiquetas RFID. Este proyecto forma parte de un curso educativo que abarca tanto el diseño de la antena como la integración del sistema y la programación necesaria para el procesamiento de los datos. En [74], solo se informó sobre el diseño manual de la antena utilizada en este laboratorio. Como se ha mencionado, en este trabajo los estudiantes sintonizan la antena y la integran en un sistema RFID completo, demostrando así la capacidad para estimar la localización angular de etiquetas RFID reales. Estas prácticas están pensadas para ser llevadas a cabo por estudiantes de grado o postgrado que hayan cursado asignaturas (o equivalentes) de ‘campos electromagnéticos’, ‘ingeniería de microondas’ e ‘ingeniería de antenas’ para el diseño de antenas; ‘instrumentación’ e ‘ingeniería de software’ para la interconexión entre todos los equipos y ‘procesado digital de señal’ para la adquisición y procesamiento de los datos relevantes utilizados por los diferentes algoritmos.

# 1. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA Y ESPECIFICACIONES

## 1.1. OBJETIVOS

- *Establecer el esquema y los requisitos del sistema.* Los estudiantes comprenderán las especificaciones que determinan los ángulos de barrido y las anchuras de media potencia de los dos haces que debe generar la antena monopulso. Estas especificaciones establecen los requisitos de la antena que se diseñará y fabricará de forma práctica en la sesión de laboratorio II, en términos de características de radiación.

### Organización de la práctica

Esta primera práctica consta de una sola sesión de laboratorio de 2 horas de duración que consiste en presentar el sistema propuesto a desarrollar mediante la realización de las prácticas contenidas en este libro. Durante esta sesión, se establecerán los requerimientos y especificaciones del sistema de localización de dispositivos RFID propuestos.

Además del trabajo realizado durante las 2 horas de sesión presencial, el estudiante deberá realizar un trabajo previo que consiste en la lectura del guión de la sesión, que se estima tendrá una duración aproximada de 1 hora.

## Material necesario

Para esta primera sesión práctica de laboratorio, el estudiante deberá hacer uso de sus apuntes, cuaderno y lápices.



Figura 1.1: Apuntes, cuaderno y lápices.

## Equipos de laboratorio que se van a utilizar

El material necesario para la realización de esta sesión de laboratorio consiste simplemente en un PC con cualquier software de programación instalado (preferiblemente Matlab, ya que en prácticas posteriores se usará código programado en este lenguaje). El alumno puede usar su propio computador portátil.



Figura 1.2: Computador con software Matlab.

## 1.2. TRABAJO PREVIO A LA SESIÓN DE LABORATORIO

El sistema de localización se basa en el procesamiento de amplitud-monopulso para estimar la DoA de las señales retrodispersadas procedentes de una etiqueta RFID pasiva. Para llevar a cabo dicha técnica, es necesario sintetizar al menos dos haces inclinados directivos que se solapen en su punto de media potencia ( $-3$  dB), tal y como se representa en la figura 1.3. Las PLWAs alimentadas bidireccionalmente con haces inclinados inherentes, pueden ser utilizados con fines de localización y aplicado a diferentes redes inalámbricas como Zigbee, Bluetooth Low Energy (BLE), WiFi o más recientemente sistemas RFID. Para ello, se utilizan los puertos P1 y P2 de la PLWA para sintetizar dos haces simétricos en espejo, tal y como se ilustra en la figura 1.3. Por lo tanto, es necesario utilizar un lector RFID que permita conectarlo a antenas externas con al menos dos puertos. Se debe tener en cuenta que la antena debe estar diseñada para operar en la banda de frecuencias del lector RFID.

Para localizar la etiqueta RFID, el lector RFID envía una señal y lee la señal retrodispersada recibida con un identificador de etiqueta único (tag ID). Además, el lector proporciona al paquete de datos el campo Indicador de Intensidad de Señal Recibida (*Received Signal Strength Indicator*, RSSI), que es un indicador de la potencia recibida por cada uno de los dos puertos de la antena. El lector envía al PC los datos de ID de etiqueta y RSSI medidos en los puertos P1 y P2. Finalmente, la estimación de la DoA se realiza comparando los valores de RSSI obtenidos a través de cada puerto, como se hace habitualmente en los sistemas monopulso de comparación de amplitud. En cuanto al diseño de la antena, se selecciona una PLWA de media longitud de onda para mantener una topología simple que pueda ser fácilmente desarrollada y fabricada por los estudiantes. De esta forma, la antena se fabricará a mano con materiales baratos como el FR4. Esto se verá en la Sesión práctica II.

**NOTA:** Respecto a la configuración monopulso, esta se puede implementar de otras formas. Como por ejemplo, 2 antenas iguales e independientes con inclinación mecánica.

Indique cuáles son los tres elementos que componen el sistema global y explique cada uno de ellos.

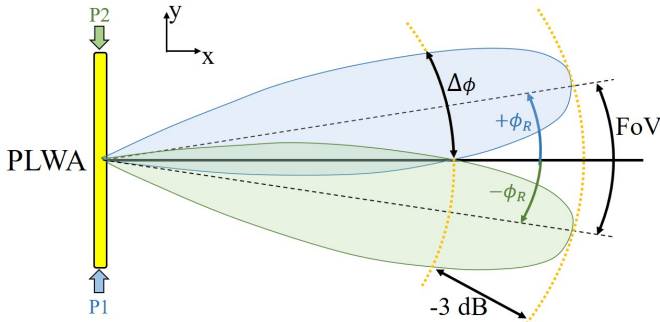
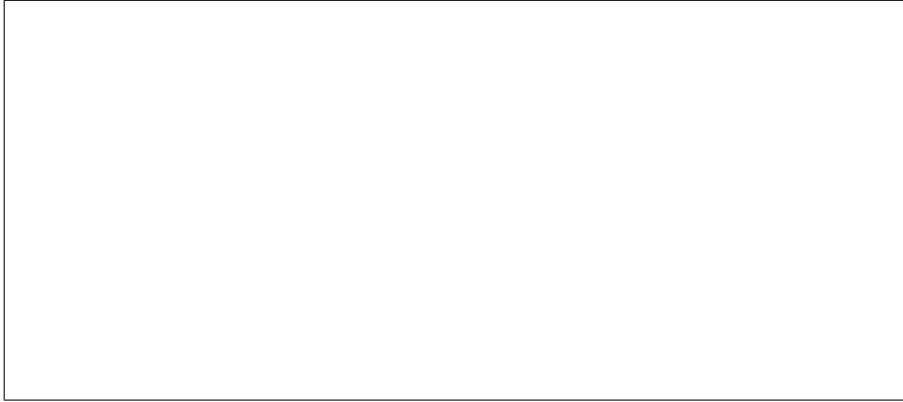


Figura 1.3: Esquema del sistema monopulso basado en PLWA.  $\Delta\phi$ , es el ancho de haz del patrón de radiación a la caída de  $-3$  dB.  $\phi_R$ , es el ángulo de escaneo a cualquier frecuencia y el campo de visión (*Field-of-View*, FoV), es la región angular donde la DoA de una señal radioeléctrica puede ser estimada sin ambigüedad (en este último concepto se ahondará más adelante).

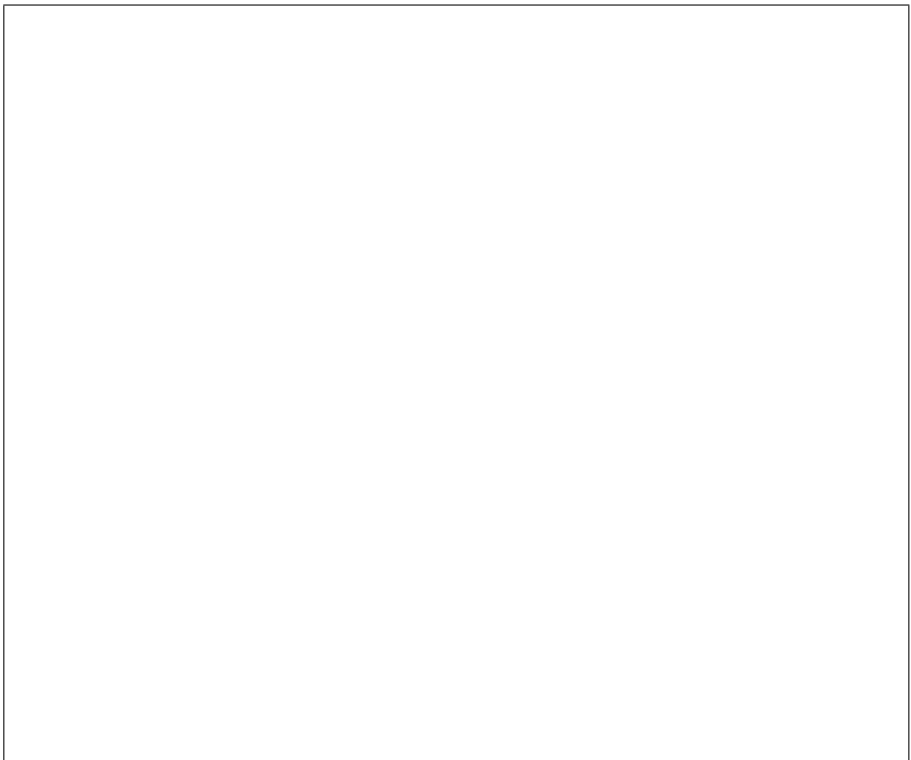
### 1.3. TRABAJO DURANTE LA SESIÓN DE LABORATORIO

Hay una serie de parámetros que deben especificarse antes de desarrollar el sistema. En primer lugar, hay que seleccionar la banda de frecuencia de trabajo para las aplicaciones RFID. Para estas sesiones prácticas, se ha seleccionado la banda de frecuencias UHF 900 MHz por dos razones. En primer lugar, dado que necesitamos antenas eléctricamente grandes para sintetizar haces relativamente directivos, es conveniente utilizar la frecuencia más alta posible lo que permite dimensiones de

antena más pequeñas si se compara con frecuencias más bajas. Por otro lado, si las frecuencias de operación son demasiado altas, las tolerancias de fabricación son más críticas, y esto puede comprometer la capacidad de fabricar las antenas a mano.

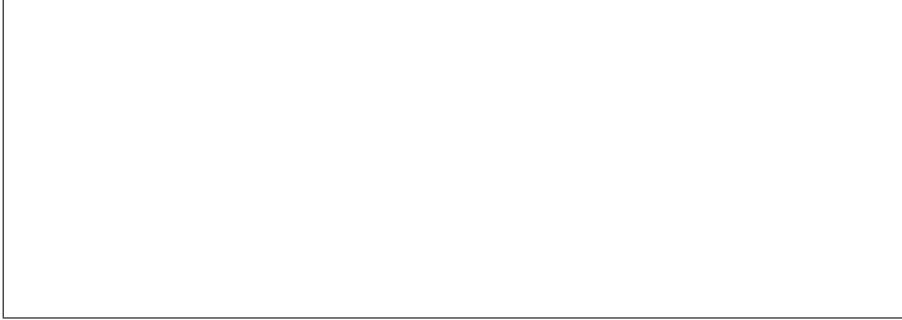
En la banda UHF de 900 MHz existe un equilibrio entre el tamaño de la antena y la tolerancia de fabricación. Además, puede haber diferencias entre las frecuencias operativas de las distintas regiones geográficas. Por ejemplo, la banda UHF RFID en Norteamérica trabaja desde los 900 MHz a 928 MHz, mientras que en Europa los sistemas UHF RFID tienen asignada la gama de frecuencias de 865 MHz a 868 MHz. Se ha comprobado que los lectores RFID de la banda norteamericana ofrecen una mayor flexibilidad a la hora de seleccionar el canal de frecuencia para transmitir la señal, por lo que para el diseño de la antena el estudiante deberá seleccionar esta banda de frecuencias.

Amplíe la información anterior, escribiendo a continuación las características de estas dos bandas frecuenciales y sus principales usos.





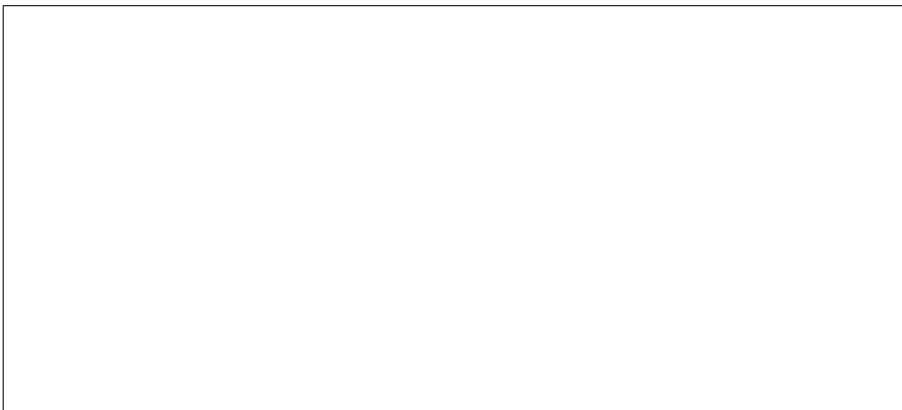
Según la figura 1.3 comente las características de radiación del sistema mono-pulso. ¿Qué relación presentan con el campo de visión (FoV)?



**NOTA:** Para obtener un FoV amplio se deben sintetizar haces anchos, pero esto implica una reducción en la resolución del sistema para discernir cambios angulares más pequeños en la estimación. Para obtener una mejor resolución, los haces sintetizados deben ser más estrechos. En este caso, el FoV elegido es  $[-20^\circ, +20^\circ]$ , fijando el ancho del haz en  $\Delta\phi = 40^\circ$  y el ángulo de apuntamiento del haz en  $\phi_R = \pm 20^\circ$  (Ecuación 1.1). Así, el sistema podrá estimar la DoA de una etiqueta RFID pasiva que se encuentre en el rango angular  $[-20^\circ, +20^\circ]$ .

$$\phi_R = \Delta\phi/2 = FoV/2 \quad (1.1)$$

Establezca los requisitos y especificaciones necesarios para la antena que se desea fabricar según lo comentado en párrafos anteriores.



## 2. DISEÑO, FABRICACIÓN Y PRUEBA DE LA ANTENA. MEDIDAS ANALÓGICAS

### 2.1. OBJETIVOS

- *Diseñar y fabricar la antena.* Los estudiantes fabricarán un prototipo de antena siguiendo una serie de requisitos dados, que les permitirá encontrar la topología de antena adecuada y optimizar el diseño según sea necesario.
- *Medir la antena en cámara anecoica y ajustar los diseños.* Los estudiantes aprenderán a utilizar la instrumentación necesaria para las medidas con la antena y el entorno de prueba.

### Organización de la práctica

Esta segunda práctica se divide en dos partes: (i) la primera mitad de la sesión de laboratorio, estará dedicada al diseño asistido por ordenador de la antena y a su fabricación a mano, con una duración de 4 horas y, (ii) la segunda mitad de la sesión, consistirá en la caracterización de la antena con medidas experimentales en la cámara anecoica, y ajuste del diseño si fuera necesario, con una duración de 4 horas.

El trabajo previo lo realizará el estudiante en casa y tendrá una duración aproximada de 1 hora.

## Material necesario

Para esta segunda sesión práctica de laboratorio, se le proporcionará al estudiante los siguientes materiales.

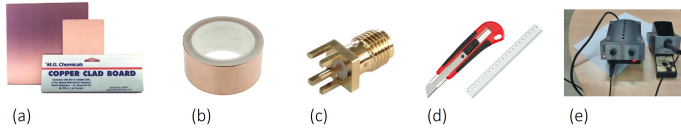


Figura 2.1: (a) Placas FR4 metalizadas en sólo una cara, (b) Cinta adhesiva conductiva de cobre, (c) Conectores SMA, (d) Cúter y regla, (e) Material de soldadura.

## Equipos de laboratorio que se van a utilizar

El computador con Matlab y el software comercial electromagnético Ansys HFSS se utilizarán para realizar el diseño de la antena previo a su fabricación. El analizador vectorial de redes (VNA) permitirá calibrar la antena y determinar los parámetros  $S$ . Por otro lado, la antena bicónica será la antena de referencia que se utilizará en las medidas en cámara anecoica para la obtención del patrón de radiación.

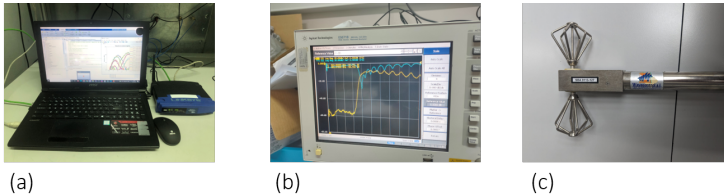


Figura 2.2: (a) Computador con software Matlab y HFSS, (b) Analizador vectorial de redes, (c) Antena bicónica.

## 2.2. TRABAJO PREVIO A LA SESIÓN DE LABORATORIO

El mecanismo de radiación de una antena leaky-wave se basa en el modo fundamental de una estructura guiada. Debido a las condiciones de contorno de la guía, las antenas de onda de fuga son generalmente dispersivas. Cuando se excita a una frecuencia apropiada, la antena presenta una resonancia en el plano transversal a la dirección de propagación (figura 2.3b). Como consecuencia, se dice que las ondas guiadas son veloces ('fast-waves') y gracias a estas aparecen las ondas de fuga. Una 'fast-wave' presenta una velocidad de fase  $c$  mayor que la de la luz, esto es equivalente a decir que a una cierta frecuencia, los frentes de fase de la onda guiada están más separados en la dirección de propagación con respecto al espacio libre. Por tanto, se define un ángulo de radiación que depende de la constante de fase y por ende, de la frecuencia. Esto se observa en la (Ecuación 2.1).

$$\sin(\theta_{RAD}) = \beta_x(f)/k_0 \quad (2.1)$$

Donde  $\beta_x$  es la constante de fase en  $\frac{rad}{m}$  y  $k_0$  es el número de onda en el espacio libre.

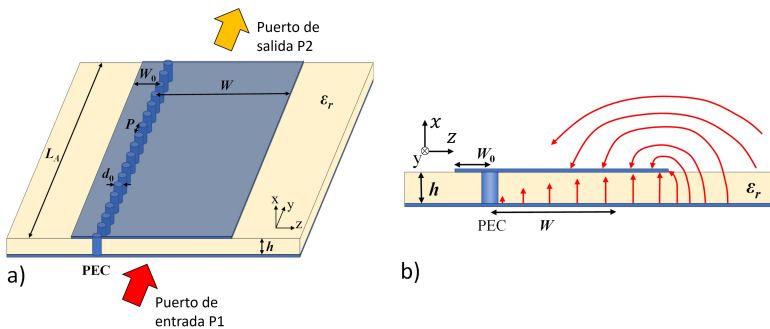
La (Ecuación 2.2) muestra cómo el ángulo de radiación puede ajustarse variando la frecuencia de operación. Además, dado que estas estructuras son de naturaleza abierta (figura 2.3a), las ondas de fuga van perdiendo amplitud a lo largo de la guía. Esto implica que estén caracterizadas por una constante de propagación compleja donde la ya mencionada  $\beta_x$ , es la parte real y describe el ángulo de apuntamiento y  $\alpha_x$  es la parte imaginaria, que modela la amplitud de las ondas guiadas (tasa de radiación).

$$k_x = \beta_x - j\alpha_x \quad (2.2)$$

Las antenas LW propuestas en estas prácticas de laboratorio son de tipo 'Half-width Microstrip' (HWM). A continuación se presenta una descripción más detallada acerca de su funcionamiento:

1. Estructura de postes: la distancia  $P$  entre los postes metálicos, como se observa en la figura 2.3, es lo suficientemente pequeña como para conseguir que las ondas incidentes sufran una reflexión total. De esta forma, la red de pines se comporta como una pared eléctrica o 'PEC', permitiendo guiar las ondas y por tanto, la posibilidad de conseguir un haz de radiación adecuado.

2. Velocidad de fase variable: la velocidad de fase de las ondas de fuga varía con la frecuencia. A mayor frecuencia, mayor  $\beta_x$  y el ángulo de radiación  $\theta_{RAD}$  crece (menor velocidad de fase). Esto puede lograrse mediante la modificación de la geometría  $W$  de la estructura.
3. Control de ángulo de radiación: como se ha explicado previamente, debido a la variación de la velocidad de fase, la antena puede radiar a diferentes ángulos a medida que la frecuencia de operación cambia. Esto proporciona un método para controlar el ángulo de radiación de la antena sin necesidad de elementos mecánicos.
4. Frecuencia de operación ajustable: al ajustar la frecuencia de operación de la antena, se puede seleccionar el ángulo de radiación deseado. Esto hace que las antenas leaky-wave sean útiles en diversas aplicaciones como radares, comunicaciones inalámbricas y sistemas de imágenes, tal como se comentó en la Introducción de este texto.



**Figura 2.3: Antena Leaky-Wave. (a) Vista superior, (b) Vista lateral.**

Con este trabajo previo el estudiante podrá entender cómo al aumentar o disminuir las dos dimensiones principales de la antena: (i) el ancho de la cinta microstrip radiante  $W$  y, (ii) la longitud de la antena  $L_A$ , variará el ángulo de escaneo y el ancho de los haces radiados respectivamente, partiendo de dos expresiones matemáticas que se detallan a continuación. Para ello, el estudiante deberá diseñar estas dos dimensiones de la HWM LWA esbozadas en la figura 2.4a.

El estudiante ha de tener en cuenta que el  $W$  determina el ángulo de escaneo  $\phi_R$  deseado para la frecuencia de funcionamiento, que se aproxima por medio de la (Ecuación 2.3):

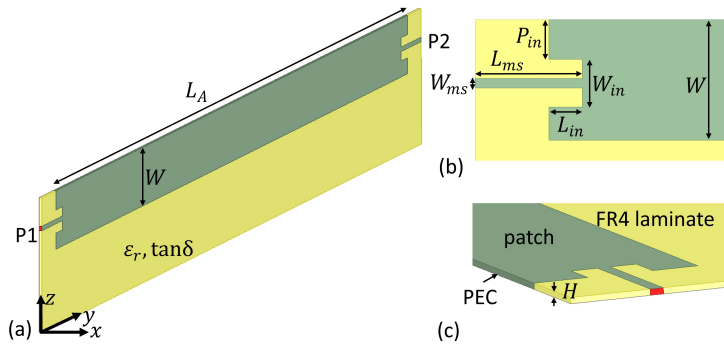


Figura 2.4: HWM LWA diseño. (a) Antena completa, (b) Red de alimentación, (c) Vista lateral.

$$W \approx \frac{\lambda_o}{4} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \phi_R}} \quad (2.3)$$

Teniendo en cuenta lo anterior y una longitud de onda  $\lambda_o = 33$  cm a una frecuencia de diseño de  $f_0 = 902$  MHz, el valor de la constante dieléctrica  $\epsilon_r = 4,5$  del sustrato FR4 que se empleará en la fabricación de la antena, más un ángulo de radiación deseado de  $\phi_R = 20^\circ$ . El estudiante deberá obtener el valor del ancho de la antena  $W$ .

A partir de la (Ecuación 2.3), el alumno entenderá que al aumentar o disminuir el ancho de la cinta radiante  $W$ , la dirección de barrido  $\phi_R$  podrá ajustarse teóricamente hacia ángulos mayores o menores, respectivamente.

Para el caso de la longitud de la antena  $L_A$ , el estudiante la podrá obtener mediante la conocida aproximación que la relaciona con el ancho de haz  $\Delta\phi$ . Para el diseño con  $\Delta\phi = 40^\circ$  y  $\phi_R = 20^\circ$ , deberá hallar el valor de  $L_A$  por medio de la siguiente expresión (Ecuación 2.4):

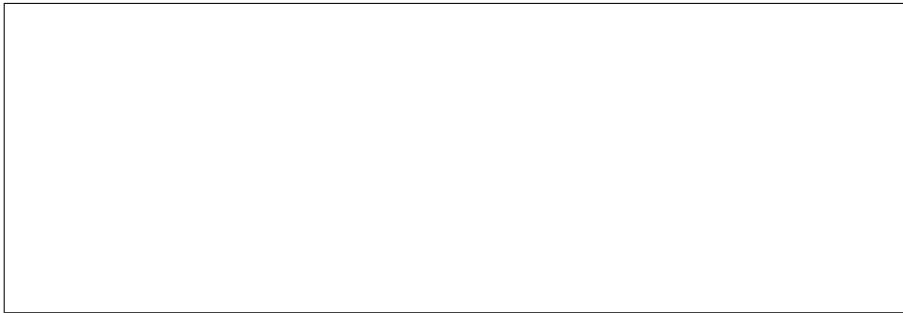
$$L_A \approx \lambda_o \frac{57^\circ}{\Delta\phi \cos \phi_R} \quad (2.4)$$

Con todo, el alumno entenderá que aumentando o disminuyendo la longitud de la antena  $L_A$ , los haces radiados pueden ajustarse teóricamente para hacerse más estrechos o más anchos, respectivamente.

Como resumen, se presentan los principales parámetros de diseño de la antena:

- $W$ : el ancho, controla el **ángulo de radiación** de los haces escaneados.
- $L$ : el largo, afecta a la **ganancia de la antena** y el **ancho de haz**.
- $\epsilon_r$ : la constante dieléctrica, modifica la sensibilidad del ángulo de apuntamiento con la frecuencia. A mayor  $\epsilon_r$ , se puede separar más los haces de dos frecuencias consecutivas. Por tanto, se controla el **rango de los haces escaneados**.
- $H$ : el espesor del sustrato o laminado, controla la **eficiencia de radiación**.

Profundice sobre  $\epsilon_r$  y  $H$ . ¿Qué puede decir de ellos?



La red de alimentación de la figura 2.4b, muestra la transición entre el cable mas el conector a la antena. La anchura de la línea (*microstrip*, ms)  $W_{ms}$  debe alcanzar una impedancia de  $50 \Omega$ .

Profundice sobre la red de alimentación. ¿Cómo se puede obtener una buena adaptación de la antena?



## 2.3. PARTE 1: TRABAJO DURANTE LA SESIÓN DE LABORATORIO

### 2.3.1. Diseño numérico de la antena y optimización en Matlab y Ansys HFSS

Una vez calculado teóricamente las dimensiones principales de la cinta radiante,  $W$  y  $L_A$ , mediante las expresiones aproximadas (Ecuación 2.3) y (Ecuación 2.4), la HWM LWA debe ser optimizada antes de su fabricación. **Para ello, el estudiante deberá realizar los siguientes pasos:**

1. Analizar y diseñar la antena con una herramienta propia programada en Matlab, basada en un método de resonancia transversal que se le facilitará al estudiante en esta sesión, para considerar los parámetros de las pérdidas y el espesor del laminado ( $\tan \delta = 0,018$  y  $H = 1,6$  mm).

Se le brindará al estudiante el manual en PDF de la herramienta propia titulada "User's Guide Analytical Design in MATLAB of DIY LWA".

2. En la interfaz gráfica de usuario de Matlab proporcionada, el estudiante debe optimizar  $W$  y  $L_A$  simultáneamente para ajustar el patrón de radiación (dirección de barrido y ancho de haz).
3. Dado que la antena se fabricará a mano, la anchura  $W$  y la longitud  $L_A$  se deberá variar en pasos de 1 mm debido a las tolerancias de fabricación que se pueden conseguir manualmente.

Como un ejemplo de este proceso de sintonización, la figura 2.5 muestra los diagramas de radiación obtenidos cuando se varía  $W$  desde 37 mm hasta 40 mm en los pasos de 1 mm antes mencionados. Como se observa en la figura 2.5 las líneas discontinuas, predicen un incremento de unos  $10^\circ$  en la dirección de barrido al variar 1 mm el ancho, mostrando que  $\phi_R = 8^\circ$  con  $W = 37$  mm mientras que,  $\phi_R = 39^\circ$  con  $W = 40$  mm.

**¿Cómo varían los parámetros eléctricos con las dimensiones: ancho  $W$  y longitud  $L$ ?**

**Comente y explique cual sería el diseño óptimo, con sus correspondientes valores. El ancho  $W$ , la dirección de escaneo  $\phi_R$  y el ancho del haz  $\Delta\phi$  a  $-3$  dB.**



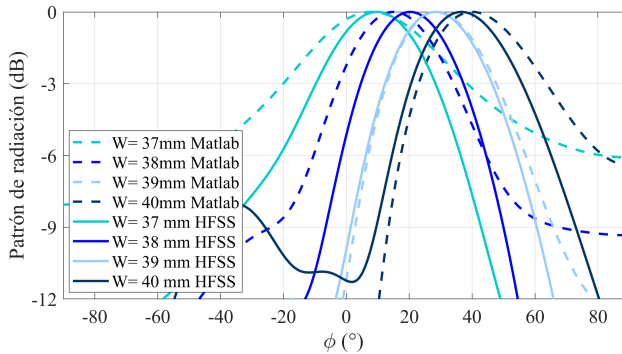
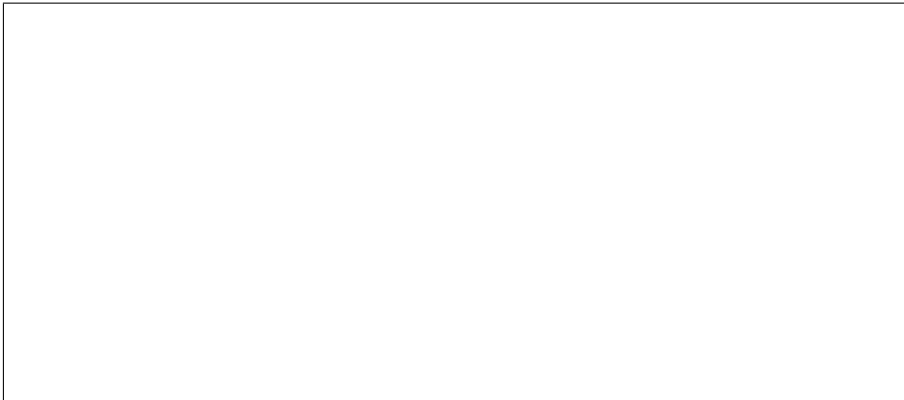


Figura 2.5: Optimización del ancho  $W$  de la cinta con  $L=58$  cm.



Escriba en la siguiente tabla los valores teóricos, analíticos (Matlab) y numéricos (HFSS) obtenidos para el ancho, la longitud, el ángulo de escaneo y el ancho de haz.

Tabla 2.1: Valores analíticos y numéricos de las dimensiones de la antena

	Teórico	Analítico (Matlab)	Numérico (HFSS)
$W$ (mm)			
$L$ (cm)			
$\phi_R$ (°)			
$\Delta\phi$ (°)			

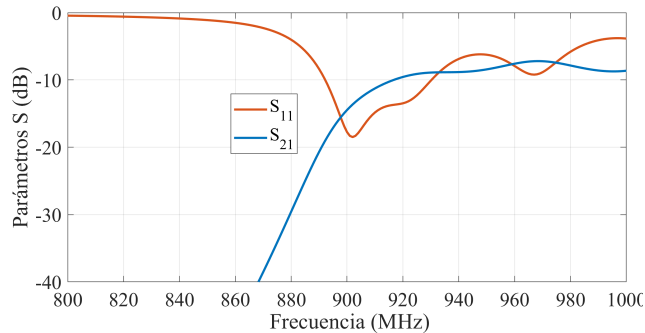
- Este paso consiste en realizar simulaciones más precisas con el software comercial Ansys HFSS para verificar los resultados y optimizar la red de alimentación (figura 2.4b), con el fin de mantener una buena adaptación (parámetro  $S_{11}$  inferior a  $-10$  dB) a las frecuencias de funcionamiento. Para ello, se le entregará a cada estudiante la sesión en HFSS con el diseño geométrico de la antena. **Compare estos resultados experimentales con la versión final del diseño de la antena.**

Escriba en la siguiente tabla los valores obtenidos de las dimensiones optimizadas de la red de alimentación.

**Tabla 2.2: Dimensiones de la red de alimentación**

Dimensiones	Valor (mm)
$W_{ms}$	
$W_{in}$	
$L_{in}$	
$L_{ms}$	
$P_{in}$	

Posteriormente, deberá obtener y representar las curvas de los parámetros  $S$ , que serán valores próximos a la figura 2.6, presentada a continuación.



**Figura 2.6: Parámetros S de la antena simulados en HFSS.**

Los parámetros de Scattering (parámetros  $S$ ) brindan una descripción de un circuito de microondas en cuanto a nivel de señal o voltaje saliente de los diferentes puertos del circuito (propagándose en dirección opuesta al circuito) cuando se aplica un voltaje incidente en cualquiera de los puertos. Así, a través de los

parámetros  $S$  se puede saber cómo se distribuye la potencia de entrada entre todos los puertos y el desfase que sufre la señal de salida con respecto a la de entrada.

Para saber la potencia reflejada  $P_{REF}$ , se tiene en cuenta el parámetro  $S_{11}$  que da una idea de cuánta potencia de la que se tiene disponible  $P_{DIS}$  se refleja hacia la fuente de señal:

$$P_{REF} = |S_{11}|^2 P_{DIS} \quad (2.5)$$

Esto dará una idea de cómo de bien adaptada está la antena. En el caso ideal, toda la potencia disponible entrará en la antena y no será reflejada, por lo que se busca que el  $|S_{11}| = 0$ . Sin embargo, en un caso real habrá cierta potencia reflejada, lo que se denomina como desadaptación, ya que esto se debe a que la impedancia de entrada del circuito no coincide con la de la línea de transmisión en la que va la señal incidente. Normalmente, un requerimiento de adaptación consiste en que al menos el 90% de la potencia entre en la antena, o que solo se refleje el 10%, lo que lleva a que el  $|S_{11}|^2 = 0.1$ , o  $|S_{11}| = -10$  dB expresado en decibelios.

Por otro lado, en una LWA cierta parte de la potencia que entra a la antena no se radia y llega al puerto de salida,  $P_{OUT}$ . Se puede obtener esta potencia a través del parámetro  $S_{21}$ :

$$P_{OUT} = |S_{21}|^2 P_{DIS} \quad (2.6)$$

Lo ideal es que se refleje poca potencia ( $S_{11}$  pequeño) y que llegue poca potencia al puerto 2 (un bajo  $S_{21}$ ), de forma que asumiendo que las pérdidas son despreciables, la mayoría de la potencia se radia.

Escriba y explique qué concluye de los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{21}$  de la figura 2.6 obtenidos en HFSS.

### 2.3.2. Fabricación de la antena HWM LWA hecha a mano

Para la fabricación de la HWM LWA, se adquirió una placa FR4 de bajo coste que tiene metalización por una sola cara y actuará como plano de masa, por lo que la banda radiante se añadirá en la otra cara de la placa. Las dimensiones de la placa son  $91,4 \times 60,9$  cm, lo que permite fabricar varias antenas a lo largo de la dimensión más corta esta. Para crear la banda radiante y la red de alimentación se utiliza cinta de cobre. Esta cinta tiene una longitud de 16 m y una anchura de 50 mm, suficiente para construir la banda radiante.

Con todos estos materiales, el estudiante realizará los pasos de fabricación como se ilustra en la figura 2.7:

1. El primer paso es pegar la cinta de cobre desde el borde de la placa hasta la anchura de diseño  $W = 38$  mm, como se ve en la figura 2.7a.
2. Para crear la pared del Conductor Eléctrico Perfecto (PEC) en el lado conectado a tierra de la LWA microstrip, se envuelve la cinta de cobre alrededor del borde de la placa FR4 y se pega a tierra, como se muestra en la figura 2.7b.
3. A continuación, se dibuja la red de alimentación y se retira el exceso de cinta con la ayuda de un cúter, véase la figura 2.7c.
4. Luego, se sueldan los conectores SMA a las líneas microstrip y al plano de masa, observe la figura 2.7d.
5. El penúltimo paso será cortar la placa FR4 para separar la antena fabricada del resto de la placa, como se muestra en la figura 2.7e. Este paso también se puede hacer antes del proceso de fabricación.
6. Por último, la antena fabricada se presenta en la figura 2.7f. Un plano de tierra de aluminio con dimensiones de  $59,5 \times 30$  cm se utiliza para evitar la radiación trasera de la antena y aumentar la ganancia en la parte frontal y facilitar el acoplamiento al posicionador en la medida de la antena.

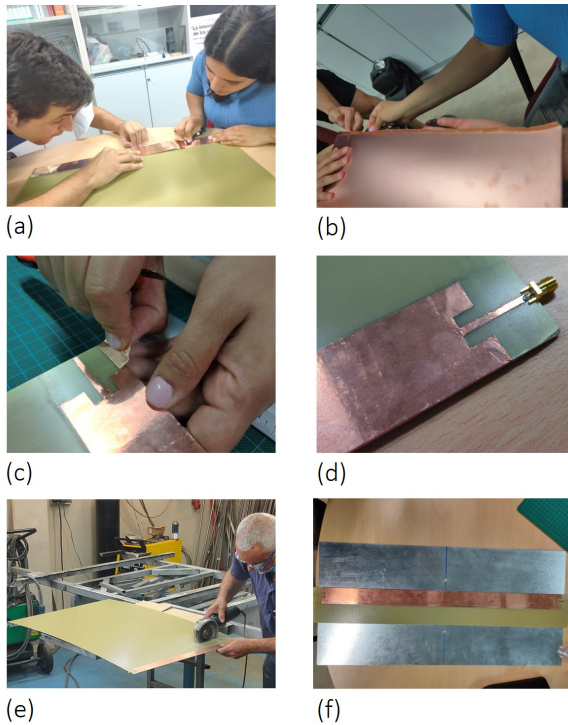


Figura 2.7: Proceso de fabricación de la HWM LWA. (a) Pegado de la cinta de cobre a la placa FR4 revestida, (b) Creación de la pared PEC envolviendo la cinta de cobre, (c) Corte y retirada de la cinta de cobre para crear la red de alimentación, (d) Conector SMA soldado, (e) Corte de la placa FR4, y (f) Prototipo final.

## 2.4. PARTE 2: TRABAJO DURANTE LA SESIÓN DE LABORATORIO

### 2.4.1. Pruebas y puesta a punto: Experimentos analógicos obtenidos en cámara anecoica

Para validar el correcto funcionamiento de la antena, el estudiante deberá medir el diagrama de radiación y compararlo con el obtenido analíticamente (ver: "User's Guide Analytical Design in MATLAB of DIY LWA"). Esto se hace en una cámara anecoica con la ayuda de un VNA, un sistema de posicionamiento y una antena de referencia. La configuración se muestra en la figura 2.8a, donde el puerto 1 de la LWA está conectado al puerto 1 del VNA mientras que una antena de referencia está conectada al puerto 2 del VNA (la LWA fabricada presenta polarización vertical, esto debe tenerse en cuenta en la antena de referencia). El puerto 2 de la LWA se conectará a una carga adaptada para evitar que la potencia restante no radiada se refleje y vuelva a radiar.

Se proporciona a los alumnos el software necesario para obtener las medidas del parámetro  $S_{21}$  del VNA al mismo tiempo que se mueve la mesa giratoria de  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$ .

Finalmente, el diagrama de radiación obtenido se muestra en la figura 2.8b en línea discontinua azul.

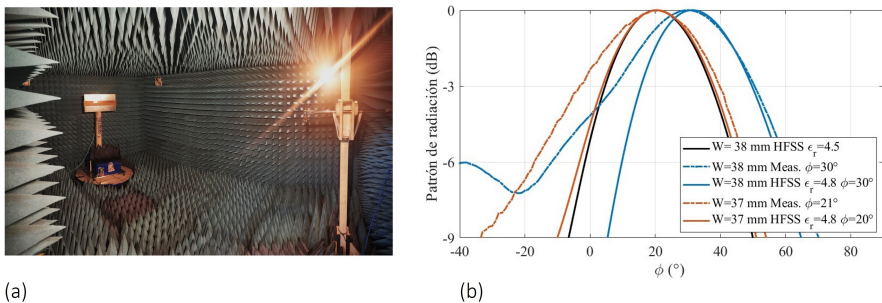


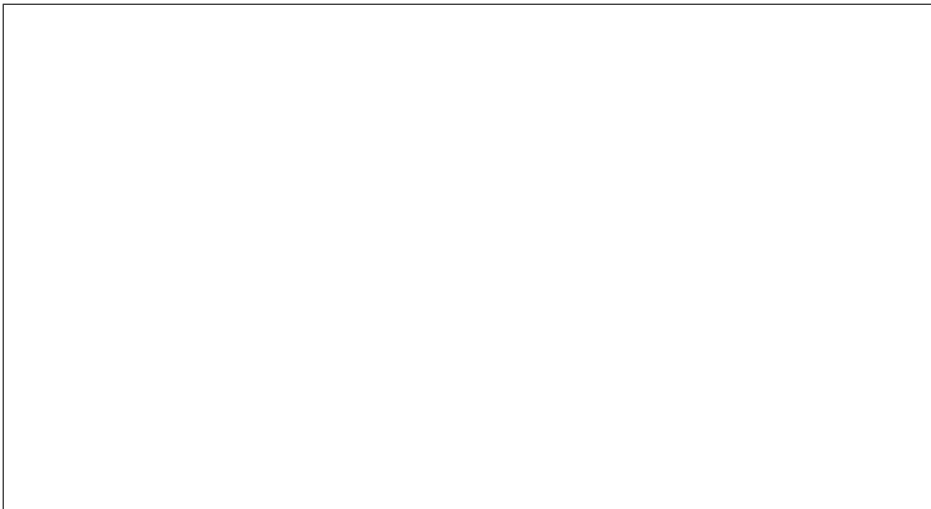
Figura 2.8: Medidas experimentales de los diagramas de radiación analógicos. (a) Configuración en cámara anecoica, (b) Sintonización de los diagramas de radiación ajustando la anchura de la banda  $W$ .

Comente qué puede concluir en la figura 2.8b respecto al patrón de radiación obtenido experimentalmente comparado con el numérico en HFSS.

¿A qué se debe la diferencia entre los patrones de radiación (línea azul discontinua (medido) Vs. línea continua azul y negra (HFSS)), influye el material FR4 de bajo coste?. Escriba su respuesta.

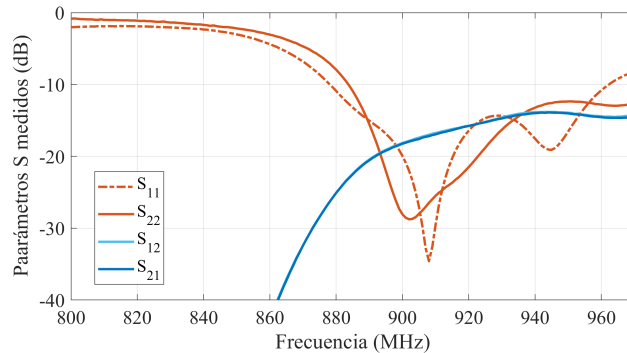


Comente si es necesario ajustar la antena quitando o añadiendo cinta radiante teniendo en cuenta que la dirección de escaneo deseada es de  $\phi = 20^\circ$  ¿Cuántos milímetros hay que eliminar o añadir?



Una vez ajustada la antena, mida los parámetros  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{12}$  y  $S_{21}$  en el VNA y obtenga nuevamente el patrón de radiación en la cámara anecoica.

A continuación se muestra un ejemplo de los parámetros  $S$  medidos de la antena en la figura 2.9. El estudiante deberá obtener unos valores similares a los de esta figura, dado que lo importante es que en la banda de trabajo los parámetros  $S$  se mantengan por debajo de  $-10$  dB, tal como se explicó anteriormente.



**Figura 2.9: Parámetros S medidos.**

Escriba a continuación, qué puede concluir de esta figura.





## 3. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA CON EL LECTOR RFID PROGRAMADO. MEDIDAS DIGITALES

### 3.1. OBJETIVOS

- *Conectar y programar los dispositivos comerciales que forman el sistema final.* Los alumnos comprenderán cómo se conectan y comunican entre sí los distintos dispositivos comerciales.
- *Medir los patrones de radiación digitales.* Los estudiantes aprenderán las diferencias entre las medidas analógicas y las digitales obteniendo los patrones de radiación digitales que se utilizarán como referencia para el algoritmo de estimación de la distancia de llegada (*Distance-of-Arrival, DoA*).

### Organización de la práctica

Esta tercera práctica se divide en dos partes: (i) la primera parte estará dedicada a la comprensión y práctica de los estudiantes sobre el conexionado entre los distintos dispositivos comerciales. El objetivo es que realicen las medidas del patrón de radiación digital. Esta parte tendrá una duración de 3 horas y, (ii) la segunda parte de la sesión, consistirá en la realización de diferentes medidas digitales en la cámara anecoica para obtener el patrón de radiación. También tendrá una duración de 3 horas.

El trabajo previo lo realizará el estudiante en casa con un tiempo de trabajo aproximado de 1 hora.

## Material necesario

Para esta tercera sesión práctica de laboratorio, los estudiantes necesitarán la antena que fabricaron y caracterizaron en la anterior práctica.



Figura 3.1: Antena hecha a mano por los estudiantes.

## Equipos de laboratorio que se van a utilizar

Un computador con el software Matlab y Eclipse que se utilizará para poder realizar las medidas en digital del patrón de radiación en la cámara anecoica. También será necesario un router, un tag pasivo y un lector RFID que se detallan en la figura 3.2.

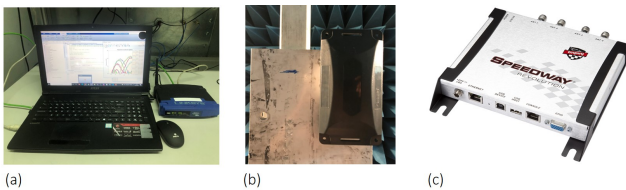


Figura 3.2: (a) PC con software Eclipse y Matlab, mas router marca: LINKSYS WRT54G, con cables de conexión, (b) Tag pasivo RFID marca: OMNI-ID UHF, (c) Lector RFID marca: Impinj Speedway R420.

### 3.2. TRABAJO PREVIO A LA SESIÓN DE LABORATORIO

En este trabajo previo el alumno deberá estudiar la rutina que ha sido desarrollada utilizando el software Matlab a través del PDF “User’s Guide Commercial Reader” que permite obtener los patrones de radiación, con el fin de llegar familiarizado a la sesión práctica en la cámara anecoica.

### 3.3. TRABAJO DURANTE LA SESIÓN DE LABORATORIO

Una vez fabricada y sintonizada la antena, la integración de todos los dispositivos del sistema se realiza en esta sesión de laboratorio.

El estudiante deberá realizar el esquema de interconexión de los dispositivos tal como se muestra en la figura 3.3.

Se ha elegido el lector RFID UHF comercial Impinj Speedway R-420, que opera en el rango de frecuencias de 860 MHz a 960 MHz y ofrece cuatro puertos de antena. Los dos puertos de la HWM LWA están conectados a dos puertos del lector RFID con cables coaxiales. El lector RFID se controla mediante un PC a través de una conexión Ethernet utilizando un router. La comunicación TCP/IP con el lector se controla por software mediante Eclipse. El controlador del lector permite adquirir tramas RFID que contienen en la cabecera el ID de la etiqueta, el nivel RSSI y el canal de frecuencia utilizado. De esta forma, las señales RFID son capturadas y post-procesadas en Matlab. Para ello, ambas entidades de software deben estar sincronizadas con el sistema de medición.

Cuando los distintos programas estén sincronizados, el estudiante podrá medir los patrones de radiación digital. El montaje experimental se muestra en la figura 3.4, donde deberá ubicar la antena y el lector RFID dentro de la cámara anecoica sobre una mesa giratoria, que también se controla con un script adicional de Matlab. La etiqueta pasiva RFID comercial Omni-ID Dura 3000 debe colocarla a 2,5 m de la HWM LWA para retrodispersar la señal. Esta etiqueta comercial puede funcionar a una distancia de hasta 35 m y está diseñada para aplicaciones UHF en exteriores.

El estudiante deberá cambiar el tag de posición, observar su respuesta y anotar el ID.

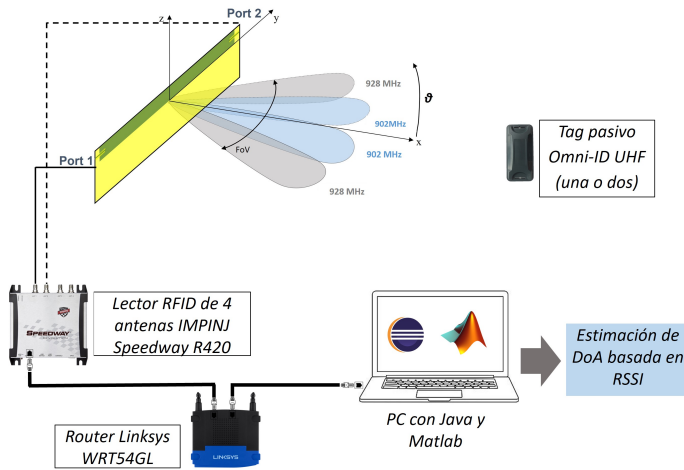


Figura 3.3: Montaje experimental e integración del sistema.

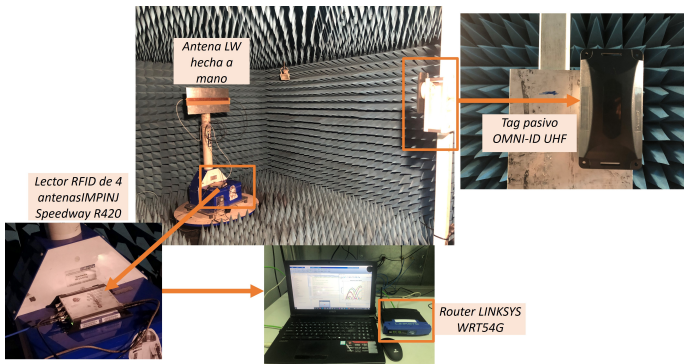


Figura 3.4: Montaje experimental en cámara anecoica.



Una vez configurado el escenario, los diagramas de radiación se deberán medir girando la mesa entre  $-90^\circ$  a  $+90^\circ$  con una resolución de un grado. El lector realizará varias detecciones en cada uno de los 181 ángulos de test y desde cada puerto de la antena para mejorar la precisión. Una vez procesada la información anterior, el alumno podrá obtener un RSSI promediado de todas las detecciones individuales para cada posición de la mesa, conformando los patrones de radiación presentados en la figura 3.5, que están normalizados respecto a su valor máximo. Los patrones digitales para otros canales RFID se obtienen igualmente reconfigurando la frecuencia de transmisión del lector.

**NOTA:** Si se incluyen más canales en el algoritmo, es posible reducir la ambigüedad de la estimación de la DoA.

La figura 3.5 muestra un ejemplo de los diagramas de radiación digital medidos que el estudiante deberá obtener en tres frecuencias diferentes de la banda americana de RFID: 902 MHz, 914 MHz y 928 MHz, aunque pueden utilizarse los 50 canales disponibles en esta banda.

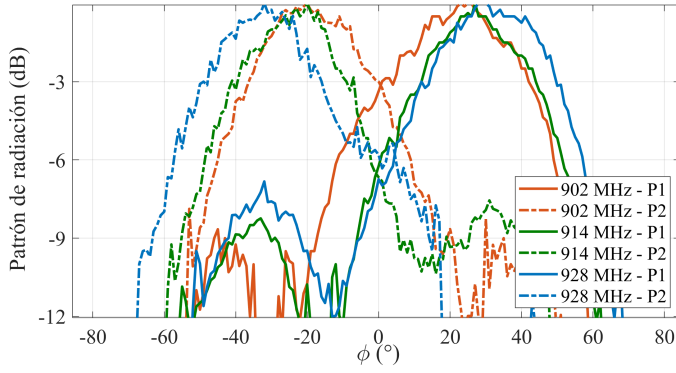


Figura 3.5: Patrones de radiación digitales normalizados.

Comente los resultados observados.

## 4. PROCESAMIENTO DE SEÑALES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DoA

### 4.1. OBJETIVOS

- *Programar los algoritmos en Matlab para la estimación de la DoA.* En esta sesión, se desarrollan las habilidades de procesamiento de señales de los estudiantes.

#### **Organización de la práctica**

Esta cuarta práctica consiste en 3 horas de laboratorio y 2 horas de trabajo en casa. Durante las 3 horas de laboratorio el estudiante programará y probará el algoritmo de estimación de la DoA con los datos obtenidos de las medidas realizadas en la sesión práctica anterior.

Durante el trabajo en casa, el alumno deberá repasar los conceptos teóricos explicados en clase e iniciar con la propuesta de su rutina para el postprocesado de los datos medidos.

#### **Material necesario**

En esta cuarta sesión el estudiante necesitará sus apuntes y bolígrafo para hacer cualquier anotación que considere oportuno.



### Equipos de laboratorio que se van a utilizar

Sólo será necesario un computador con el software Matlab.



Figura 4.1: Computador con software Matlab.

### 4.2. TRABAJO PREVIO A LA SESIÓN DE LABORATORIO

El estudiante, deberá repasar los conceptos teóricos de la Función Monopulso (*Monopulse Function*, MF), Campo de Visión (*Field of View*, FoV), Pseudoespectro Angular (*Angular Pseudo-Spectrum*, FoV), Dirección de Llegada (*Direction-of-Arrival*, DoA), potencia recibida (*Received Signal Strength Indicator*, RSSI), vistos en la sesión práctica de laboratorio I y II. Además, deberá iniciar con la propuesta de su rutina para el postprocesado de los datos medidos.

### 4.3. TRABAJO DURANTE LA SESIÓN DE LABORATORIO

Durante esta sesión de laboratorio, el estudiante deberá tener en cuenta los siguientes aspectos y seguirlos paso a paso en la programación y procesado en la estimación de la DoA. Para ello, los datos obtenidos en la anterior práctica deberá cargarlos en la rutina que realice para la obtención de la Función Monopulso de referencia, que resulta de la combinación de la suma y diferencia de los patrones de radiación siguiendo la conocida expresión:

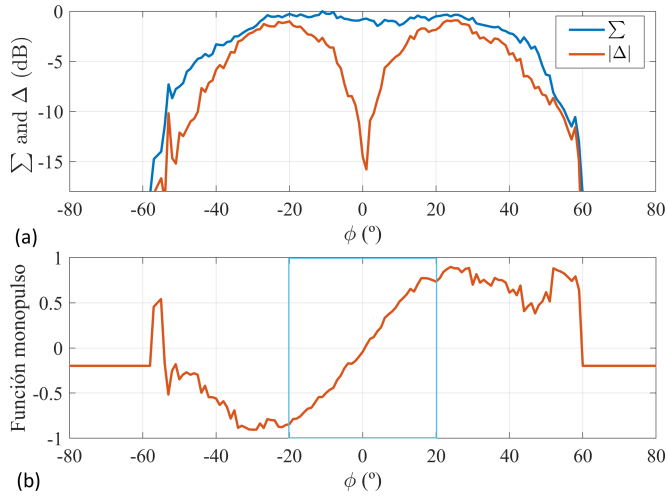
$$MF(\phi) = \frac{\Delta(\phi)}{\Sigma(\phi)} = \frac{RP_1(\phi) - RP_2(\phi)}{RP_1(\phi) + RP_2(\phi)} \quad (4.1)$$

Donde  $RP_1(\phi)$  y  $RP_2(\phi)$  corresponden a los diagramas de radiación digital normalizados obtenidos previamente de los puertos de la antena 1 y 2 del lector RFID respectivamente. El FoV, se define como el rango angular en el que la Función Monopulso (*Monopulse Function*, MF) aumenta linealmente. En este rango, cada Valor Monopulso (*Monopulse Value*, MV), que puede variar de -1 a 1 se relaciona de forma única con un ángulo. Es decir, cuando se aplican técnicas monopulso en amplitud, se compara la señal recibida desde dos haces (que pueden ser generados por dos puertos o a través de diferentes técnicas de escaneo), después de un procesamiento sencillo para obtener un Valor Monopulso, con una Función Monopulso calibrada. Esta  $MF$  se define dentro de un rango angular. La DoA se determina en el ángulo en el que el valor monopulso obtenido es más parecido a la  $MF$ .

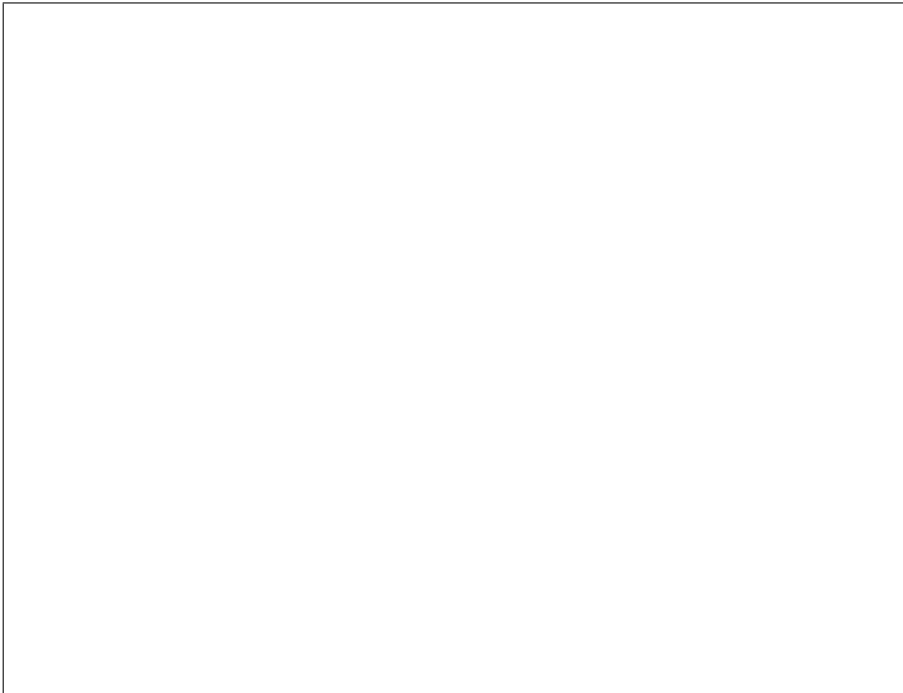
Una **ambigüedad** se produce cuando la  $MF$  tiene el mismo valor para diferentes ángulos, por lo que se no se puede distinguir desde cual de esos ángulos ha llegado la señal. De este modo, se define un FoV como el rango angular en el que la  $MF$  es lineal y no repite valores, de modo que si se tiene el conocimiento previo de que la señal viene desde dentro de ese rango, se puede estimar la DoA sin ambigüedad y cada valor monopulso se relacione unívocamente con cada ángulo.

**1. Estimación dentro del FoV con una sola MF:** los patrones digitales de suma y diferencia obtenidos para el canal más bajo a 902 MHz se ilustran en la figura 4.2a y la  $MF$  correspondiente se muestra en la figura 4.2b donde el FoV obtenido marcado en un recuadro azul, se sitúa en torno a  $[-20^\circ, +20^\circ]$ , lo que es coherente con los requisitos definidos en la Sesión de Laboratorio I.

Realice una estimación de la  $MF$  en matlab utilizando los datos de otros canales medidos (medio y alto) o frecuencias, por ejemplo 914 MHz y 928 MHz. Copie y pegue a continuación la figura obtenida de dichos análisis y comente sus resultados.



**Figura 4.2: Patrón de radiación digital normalizado a 902 MHz. (a) Patrón suma  $\Sigma$  y diferencia  $\Delta$ , (b) Función Monopulso (MF).**



**2. Estimación fuera del FoV con una sola MF:** para reducir la ambigüedad en sistemas de amplitud-monopulso con LWAs (de forma que una señal procedente de fuera del FoV no cree una falsa estimación dentro del FoV), se pueden utilizar *MFs* a diferentes frecuencias.

Tanto la *MF* como los patrones de radiación suma y diferencia, son funciones que dependen del ángulo, por lo que habrá un valor para cada ángulo medido como se observa en la figura 4.3a donde cada *MF* presenta un FoV y una forma ligeramente diferentes. El *MV* es un valor único que corresponde a una medida concreta. El objetivo es estimar la DoA a partir de una señal retrodispersada que podrá calcularse obteniendo el *MV* con el RSSI recibido de ambos puertos y comparándolo con la *MF* a la misma frecuencia.

$$MV = \frac{RSSI_{P1} - RSSI_{P2}}{RSSI_{P1} + RSSI_{P2}} \quad (4.2)$$

A partir de esa comparación, se obtiene un pseudoespectro angular (APS), con un pico en la DoA estimada:

$$APS = 10 \log \frac{1}{EF(\phi)} \quad (4.3)$$

$$EF(\phi) = |MF(\phi) - MV| \quad (4.4)$$

Donde *EF* es la Función de Error (*Error Function*, *EF*) de la comparación entre el *VM* y la *MF* correspondiente. Esto se representa en la figura 4.3b para una señal procedente de  $\phi = 10^\circ$ . Como se observa, hay muchos otros picos aparte del de la dirección real, cuando se utiliza una sola *MF*.

**Reducción de ambigüedad:** utilizando diferentes *MF* de diferentes canales de frecuencia, se puede reducir la ambigüedad, obteniendo un único pico con la estimación final de la DoA. Así, para realizar una estimación de la DoA, el lector debe enviar la siguiente información al ordenador que ejecuta el algoritmo: RSSI, puerto de antena asociado, ID de la etiqueta RFID y canal de frecuencia.

Escriba a continuación el código donde obtiene el APS teniendo en cuenta las anteriores explicaciones y expresiones matemáticas. Comente las líneas de su código.

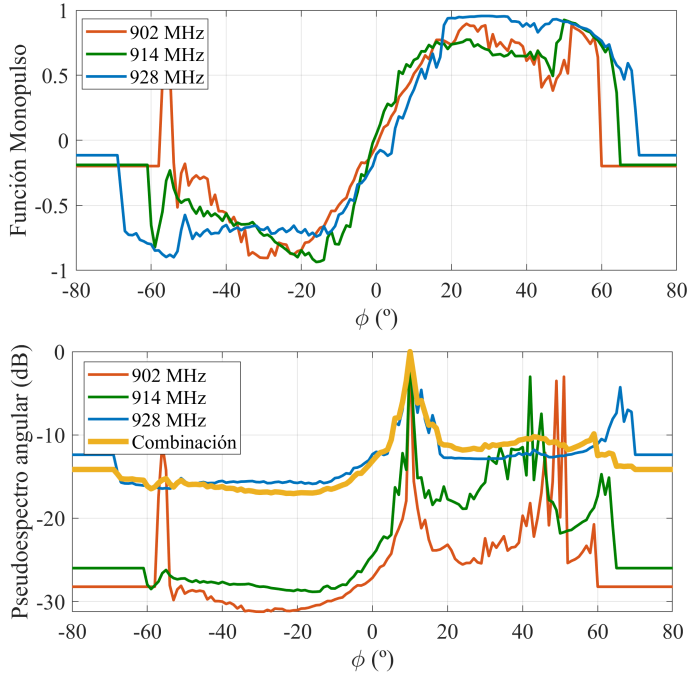
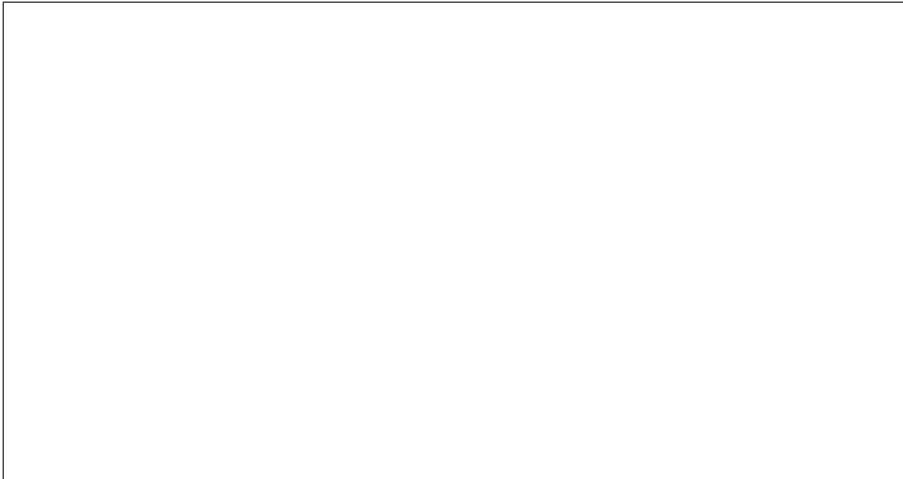


Figura 4.3: Estimación de la DoA para  $\phi = 10^\circ$ . (a) Función Monopulso a diferentes frecuencias, (b) Pseudoespectro Angular con Función Monopulso única y con todas combinadas.



Una vez recibida la información de ambos puertos y de todas las frecuencias utilizadas, se puede calcular la estimación de la DoA. Para combinar la información de las distintas  $MF$  en los distintos canales, la  $EF$  de la Ecuación 4.4 debe sustituirse por el error acumulativo global (*Overall Cumulative Error*, OCE), a partir del cual se obtiene un APS combinado (CAPS):

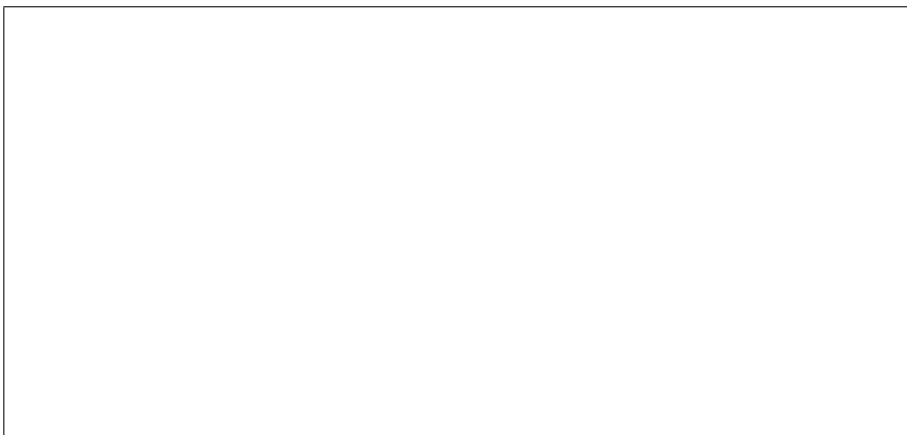
$$OCE(\phi) = \sqrt{\sum_{m=1}^M \frac{1}{M} EF_m(\phi)^2} \quad (4.5)$$

$$CAPS = 10 \log(1/OCE(\phi)) \quad (4.6)$$

Donde  $m$  representa cada  $MF$  a diferentes canales (bajo, medio y alto) o frecuencias (902, 914 y 928 MHz) y  $M = 3$ , el número total de  $MFs$  utilizadas. El  $CAPS$  obtenido de la combinación de tres canales RFID diferentes se muestra en color naranja en la figura 4.3b. Como puede observarse, los múltiples picos en el  $CAPS$  obtenidos para cada canal individual, se reducen a un único pico correspondiente a la DoA común que es la real, una vez eliminada la ambigüedad. Este proceso puede realizarse para múltiples etiquetas simultáneamente, ya que el ID de la etiqueta RFID está incluido en la información recibida por el lector RFID.

Parte de este algoritmo, se le explicará a los alumnos para que sean capaces de programarlo en Matlab, junto con las rutinas de adquisición de datos.

De acuerdo a la explicación en clase del algoritmo, escriba a continuación la segunda parte de su código y comente cada línea del mismo.





## 5. MONTAJE EXPERIMENTAL Y PRUEBAS EN EXTERIORES

### 5.1. OBJETIVOS

- *Probar el sistema con etiquetas en un escenario real al aire libre.* Los estudiantes aprenderán a analizar y evaluar los resultados para mostrar los puntos fuertes y débiles del sistema propuesto.

### Organización de la práctica

Esta quinta práctica será la última sesión de laboratorio propuesta, y estará dedicada a poner a prueba el sistema monopolso RFID desarrollado en un escenario real, cuya duración total será de 4 horas. El trabajo previo lo realizará el alumno en casa que tendrá una duración de una 1 hora.

### Material necesario

En esta quinta práctica se usarán cables para el conexionado de los equipos en exterior, dos bases para sostener las etiquetas pasivas y una tercera para sostener la antena, tal como se observa en la figura 5.1.



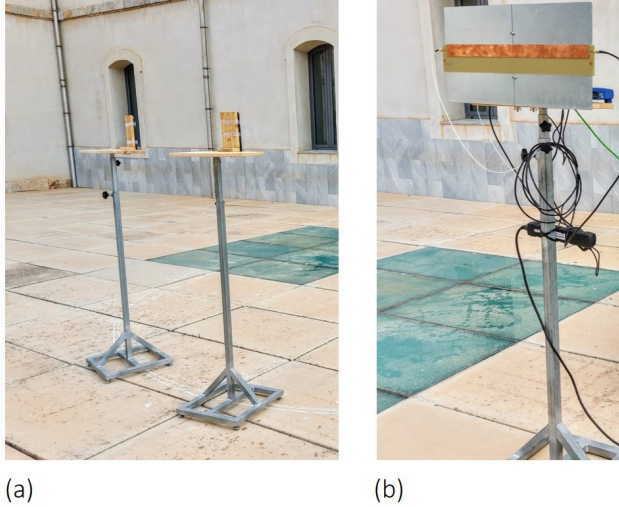


Figura 5.1: (a) Base o soporte para las dos etiquetas pasivas, (b) Base o soporte con la antena fabricada por los estudiantes.

### Equipos de laboratorio que se van a utilizar

Los equipos utilizados en esta práctica de laboratorio serán los mismos de la Sesión 3. A continuación se presentan en la figura 5.2.

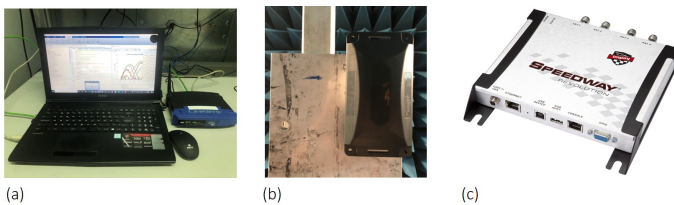


Figura 5.2: (a) Computador con router, (b) 2 Tags o etiquetas pasivas, (c) Lector RFID.

## 5.2. TRABAJO PREVIO A LA SESIÓN DE LABORATORIO

En este trabajo previo, el alumno deberá repasar la rutina que ha sido desarrollada utilizando el software Matlab a través del PDF "User's Guide Commercial Reader" que permite obtener los patrones de radiación, con el fin de que el estudiante llegue familiarizado a la sesión práctica. Además, deberá repasar los conceptos de la Función Monopulso y el Pseudoespectro Angular (*Angular Pseudo-Spectrum, APS*) y proponer un pequeño código para la obtención de la misma una vez se realicen las medidas en exterior y se obtengan los datos.

## 5.3. TRABAJO DURANTE A LA SESIÓN DE LABORATORIO

El estudiante deberá realizar el montaje experimental en un escenario real, (aire libre). Para ello, deberá ubicar sobre una base la antena, el lector RFID y el router en una posición fija y, por otro lado, montar los dos tags o etiquetas pasivas a una distancia similar a la que calibró en cámara anecoica (el estudiante deberá probar otras distancias mayores, y revisar si sigue recibiendo señal) cada uno sobre una base que se irán moviendo en diferentes posiciones (ángulos). Tal como se observa en la siguiente figura. El computador portátil ejecutará el programa en Eclipse que recibirá los datos del lector RFID y los envía al script que ejecutará el algoritmo de estimación de la DoA en Matlab.

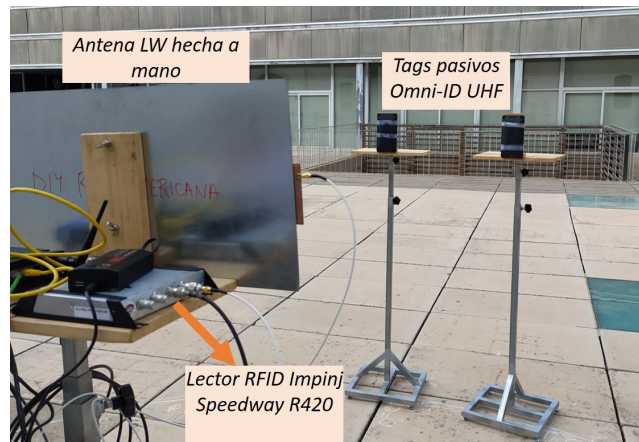
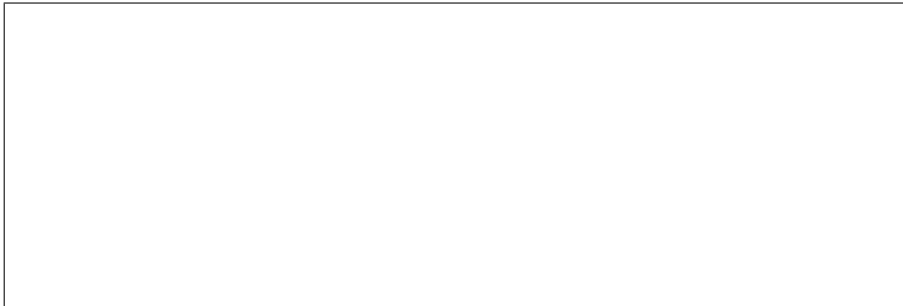


Figura 5.3: Montaje experimental en escenario real.

Una vez haya terminado el montaje, el estudiante deberá realizar las medidas experimentales (toma de datos). Deberá tener en cuenta que el programa Matlab reciba al menos 4 muestras RSSI por cada puerto y frecuencia, con el fin de realizar una estimación más precisa de la DoA.

A continuación deberá promediar estas muestras y las comparará con las funciones monopolso de referencia que se obtuvieron en la sesión de laboratorio 4. En esta fase, el sistema puede distinguir entre diferentes etiquetas RFID, ya que su ID único está codificado en la señal retrodispersada, por lo que la localización puede realizarse para más de una etiqueta al mismo tiempo.

Las etiquetas RFID se localizan a la misma distancia de 2,5 m (esta distancia depende de la cámara anecoica que se emplee para realizar las medidas) que se utilizó para calibrar las funciones monopolso de la antena. Halle para una frecuencia de funcionamiento de 900 MHz y un tamaño máximo de la antena de  $L_A = 58$  cm, la distancia de campo lejano. Indique a continuación su respuesta con las expresiones matemáticas que sustenten el resultado.



Si se intenta localización a unos pocos centímetros de la antena, ¿Por qué es necesario tener en cuenta los efectos de campo cercano?



Estime la DoA de las dos etiquetas RFID para tres ángulos diferentes. La etiqueta 1 en ángulos positivos y la etiqueta 2 en ángulos negativos. A continuación verá un ejemplo real en la figura 5.4 de las medidas realizadas, donde los tags o etiquetas se mueven a diferentes ángulos  $\phi = 5^\circ, -5^\circ, 10^\circ, -10^\circ, 15^\circ, -15^\circ$  y se obtiene el pseudoespectro angular (APS).

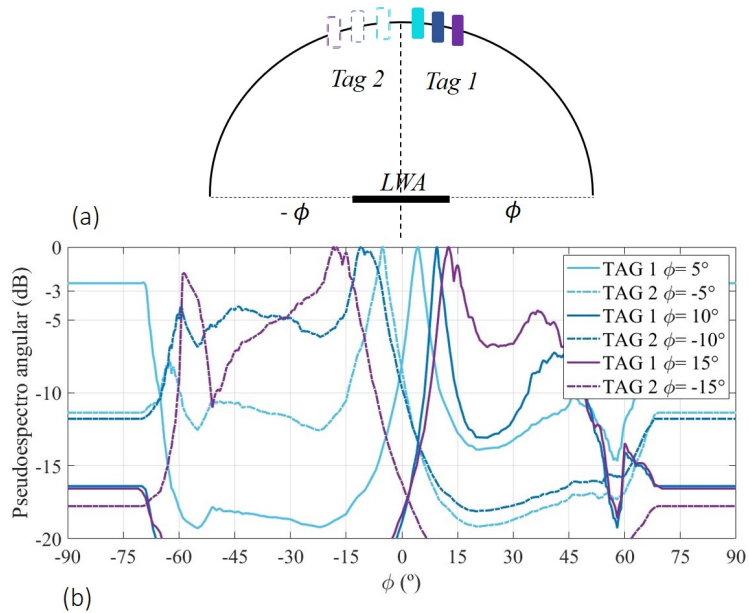


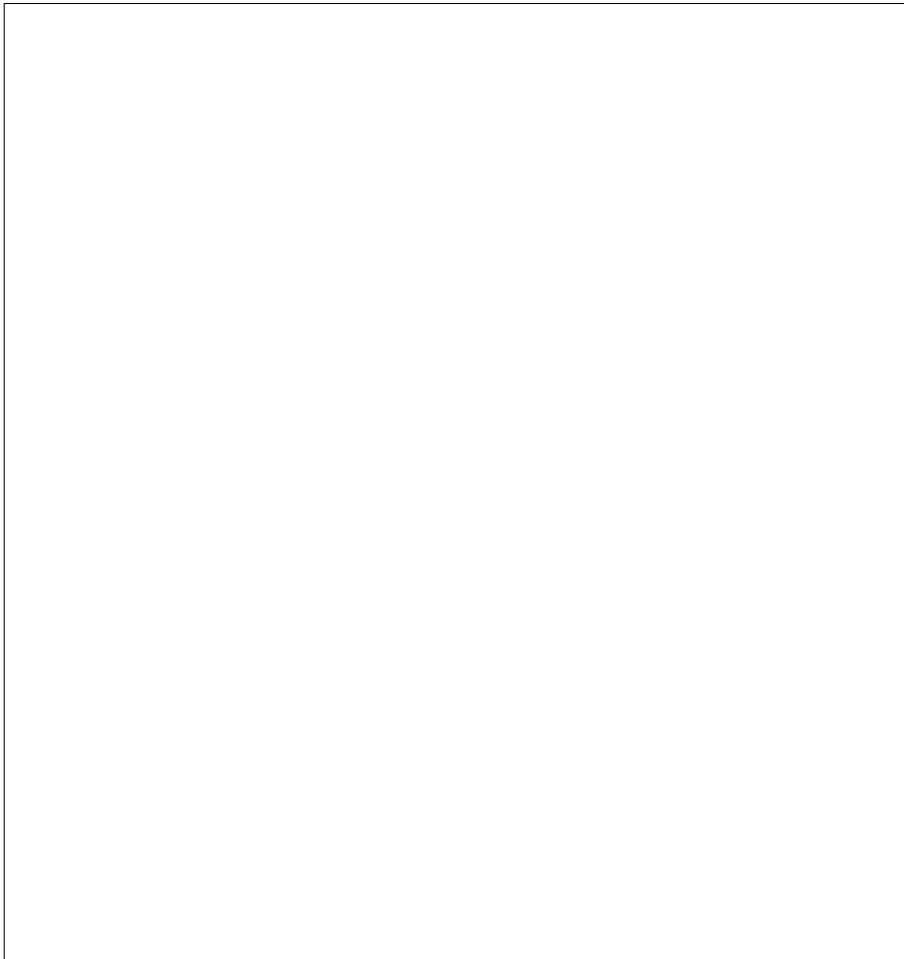
Figura 5.4: (a) Diferentes posiciones de las etiquetas, (b) Pseudoespectro angular (APS) para los tres canales empleados.

Escriba en la siguiente tabla los ángulos que ha medido y comente los resultados obtenidos. ¿A qué se debe la desviación de los ángulos medidos respecto a los esperados?

El estudiante deberán registrar el APS obtenido para cada posición angular y escribir la DoA estimada a partir de los picos del APS en la siguiente tabla.

**Tabla 5.1: Ángulos esperados y medidos en escenario real**

Ángulo esperado (°)	Ángulo medido (°)
-15	
-10	
-5	
5	
10	
15	



## CONCLUSIONES

Los autores han propuesto un laboratorio para desarrollar un sistema práctico de localización monopulso RFID, que se divide en cinco sesiones prácticas de laboratorio. En la primera sesión los estudiantes pueden comprender las especificaciones de una antena monopulso de amplitud para cubrir un determinado campo de visión angular mediante la creación de dos haces inclinados directivos que se solapan en la dirección perpendicular. En la segunda práctica, estas especificaciones se traducen en un diseño real de una antena monopulso de onda de fuga microstrip sencilla, que es fabricada por ellos mismos utilizando materiales de bajo coste y procesos manuales. También en esta segunda sesión, el prototipo de antena fabricado se prueba en una cámara anecoica, y los estudiantes aprenden a sintonizar manualmente la dirección de barrido con sólo ajustar la anchura del microstrip. Las habilidades de comunicación entre un lector RFID real y un ordenador personal se desarrollan en la tercera práctica, donde programan un lector RFID comercial para obtener datos importantes, como el ID de la etiqueta, la frecuencia utilizada y los valores RSSI. Además, en esta sesión aprenden a obtener el diagrama de radiación digital de la antena monopulso conectada al RFID. En la cuarta sesión, se ponen en práctica los principios básicos de comparación de amplitud programando el procesamiento de la señal para estimar la dirección de llegada a partir del RSSI medido. Por último, en la quinta práctica se prueban las prestaciones del sistema de localización RFID desarrollado, estimando simultáneamente la ubicación angular de dos etiquetas en tiempo real.

Esta iniciativa de laboratorio propuesta puede ayudar al estudiante a adquirir una visión más interdisciplinar del mundo de la ingeniería de antenas, que requiere un diseño interdependiente que incluya electromagnetismo, comunicaciones de hardware digital y programación de procesamiento de señales. A partir de la retroalimentación de los estudiantes, este importante reto se proporciona con esta iniciativa educativa práctica. El Anexo A resume los recursos disponibles para los estudiantes, y se encuentran en el Centro de Recursos de la IEEE Antennas and Propagation Society (APS).



## A. RECURSOS DISPONIBLES EN IEEE APS

Los siguientes recursos para los estudiantes están disponibles en el IEEE APS Resource Center, véase [75]:










1. Archivos PDF con instrucciones detalladas para comprar los materiales solicitados, diseñar y fabricar la Antena LW.
2. Programa en Matlab para el diseño la Antena LW.
3. Códigos Eclipse en Matlab.
4. Archivo PDF. User's Guide Analytical Design in Matlab of DIY LWA.
5. Archivo PDF. User's Guide Commercial Reader Impinj R420.
6. Video para guiar al alumno a lo largo de la realización del proyecto.





## B. COSTE DE LOS MATERIALES

La siguiente tabla resume el coste de los materiales asociados a este laboratorio (no se incluye la cámara anecoica ni la instrumentación asociada):

	Materiales	Unidades	Precio Unitario (euros)
	Placa revestida de cobre en una cara: 1,6 mm de espesor [76]	1	€86,17
	Cinta adhesiva de cobre conductora: 50,8 mm x 16 m [77]	1	€151,17
	Conector coaxial [78]	2	€2,58
	Cuter, regla y lápices	1	€18,0
	Lector RFID IMPINJ Speedway R420 [79]	1	€1500
	Computador	1	€599
	Tag pasivo RFID Omni-ID Dura 3000 [80]	5	€24
	Router Linksys WRT54GL [81]	1	€29,90
	Cables Ethernet	4	€9
	<b>PRECIO TOTAL</b>		<b>€2420,11</b>



# AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) a través del marco del Educational Initiatives Program (EIP) de la Antennas and Propagation Society (APS), y en parte por el Proyecto Nacional Español PID2019-103982RB-C42.



## Bibliografía

- [1] 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 Processing Magazine*, vol. 35, no. 5, pp. 140–152, 2018.
- [2] J. L. Gómez-Tornero, "Smart leaky-wave antennas for iridescent IoT wireless networks," *Antenna and Array Technologies for Future Wireless Ecosystems*, pp. 119–181, 2022.
- [3] M. Poveda-García, D. Cañete-Rebenaque, and J. L. Gómez-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, 2019.
- [4] M. Poveda-García, J. Oliva-Sánchez, R. Sanchez-Iborra, D. Cañete-Rebenaque, and J. L. Gomez-Tornero, "Dynamic wireless power transfer for cost-effective wireless sensor networks using frequency-scanned beaming," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 8081–8094, 2019.
- [5] A. Gil-Martínez, M. Poveda-García, J. A. López-Pastor, J. C. Sánchez-Aarnoutse, 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, 2021.
- [6] J. A. López-Pastor, A. Gil-Martínez, M. Poveda-García, 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, pp. 14 995–15 011, 2023.
- [7] A. Gil-Martínez, M. Poveda-García, D. Cañete-Rebenaque, and J. Gómez-Tornero, "Metasurface antenna for fast frequency scanning with application to conical direction finding," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2023.

- [8] A. Gil-Martínez, M. Poveda-García, D. Cañete-Rebenaque, and J. L. Gómez-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, 2021.
- [9] A. Gil-Martínez, M. Poveda-García, J. García-Fernández, M. Campo-Valera, D. Cañete-Rebenaque, and J. L. G. 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, 2022.
- [10] M. Campo-Valera, M. Poveda-García, J. García-Fernández, A. Gil-Martínez, D. Cañete-Rebenaque, and J. L. Gómez-Tornero, "Laboratory to develop a practical hand-made monopulse antenna for RFID localization systems," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 132 108–132 120, 2022.
- [11] J. L. Gómez-Tornero, A. G. Martínez, M. Poveda-García, and D. Cañete-Rebenaque, "ARIEL: passive beam-scanning Antenna terminal for Iridescent and Efficient LEO satellite connectivity," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 11, pp. 2268–2272, 2022.
- [12] M. Poveda-García, A. Gómez-Alcaraz, D. Cañete-Rebenaque, A. S. Martínez-Sala, and J. L. Gómez-Tornero, "RSSI-based direction-of-departure estimation in bluetooth low energy using an array of frequency-steered leaky-wave antennas," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 9380–9394, 2020.
- [13] M. Poveda-García, A. G. Martínez, and J. L. Gómez-Tornero, "Frequency-scanned focused leaky-wave antennas for direction-of-arrival detection in proximity BLE sensing applications," in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2020, pp. 1–4.
- [14] M. Poveda-García, E. Andreu-García, J. García-Fernández, D. C. Rebenaque, and J. Gómez-Tornero, "Frequency-scanned leaky-wave antenna topologies for two-dimensional direction of arrival estimation in IoT wireless networks," in *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2021, pp. 1–5.
- [15] J. L. Gómez-Tornero, M. Poveda-García, R. Romero-Justiniano, A. Gil-Martínez, and D. Cañete-Rebenaque, "Design of frequency-beam scanning antennas for ultra wide band impulse RADAR applications," in *2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2023, pp. 1–4.
- [16] D. Zelenchuk, A. J. Martinez-Ros, T. Zvolensky, J. L. Gómez-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, pp. 127–139, 2013.
- [17] M. Poveda-García, A. Gil-Martínez, F. Salmerón, and J. L. Gómez-Tornero, "Frequency-beam-scanning mm-wave antennas for direction finding RADAR," in *2022 19th European Radar Conference (EuRAD)*. IEEE, 2022, pp. 293–296.
- [18] R. Guzmán-Quirós, A. Martínez-Sala, J. L. Gómez-Tornero, and J. García-Haro, "Integration of directional antennas in an RSS fingerprinting-based indoor localization system," *Sensors*, vol. 16, no. 1, p. 4, 2015.
- [19] J. L. Gómez-Tornero, D. Cañete-Rebenaque, J. A. López-Pastor, and A. S. Martínez-Sala, "Hybrid analog-digital 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, 2018.
- [20] J. A. López-Pastor, A. Gómez-Alcaraz, D. Cañete-Rebenaque, A. S. Martínez-Sala, and J. L. Gómez-Tornero, "Near-field monopulse DoA estimation for angle-sensitive proximity WiFi readers," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 88 450–88 460, 2019.
- [21] J. A. López-Pastor, P. Arques-Lara, J. J. Franco-Peñaranda, A. J. García-Sánchez, and J. L. Gómez-Tornero, "Wi-Fi RTT-based active monopulse RADAR for single access point localization," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 34 755–34 766, 2021.
- [22] A. Gil-Martínez, J. A. López-Pastor, M. Poveda-García, A. Algaba-Brazález, D. Cañete-Rebenaque, and J. L. Gómez-Tornero, "Monopulse leaky-wave antennas for RSSI-based direction finding in wireless local area networks," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023.
- [23] A. Oliner and K. Lee, "Microstrip leaky wave strip antennas," in *1986 Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 24. IEEE, 1986, pp. 443–446.
- [24] A. A. Oliner, "Leakage from higher modes on microstrip line with application to antennas," *Radio Science*, vol. 22, no. 6, pp. 907–912, 1987.
- [25] K. S. Lee, "Microstrip line leaky wave antenna," Ph.D. dissertation, Polytechnic Institute of New York, 1986.
- [26] J. L. Gómez-Tornero, D. Cañete-Rebenaque, and A. Álvarez-Melcón, "Microstrip leaky-wave antenna with control of leakage rate and only one main



- beam in the azimuthal plane," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 56, no. 2, pp. 335–344, 2008.
- [27] A. G. Martínez, M. P. García, and J. L. Gómez-Tornero, "Direct synthesis of frequency-scanned monopulse half-width microstrip leaky-wave antennas," in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2020, pp. 1–4.
- [28] L. Goldstone and A. Oliner, "Leaky-wave antennas i: Rectangular waveguides," *IRE Transactions on Antennas and propagation*, vol. 7, no. 4, pp. 307–319, 1959.
- [29] J. L. Gómez-Tornero and A. Álvarez-Melcón, "Nonorthogonality relations between complex hybrid modes: An application for the leaky-wave analysis of laterally shielded top-open planar transmission lines," *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 52, no. 3, pp. 760–767, 2004.
- [30] J. L. Gómez-Tornero, D. Cañete-Rebenaque, and A. Álvarez-Melcón, "Printed-circuit leaky-wave antenna with pointing and illumination flexibility," *IEEE microwave and wireless components letters*, vol. 15, no. 8, pp. 536–538, 2005.
- [31] J. L. Gómez-Tornero, G. Goussetis, A. P. Feresidis, and A. Álvarez-Melcón, "Control of leaky-mode propagation and radiation properties in hybrid dielectric-waveguide printed-circuit technology: Experimental results," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 54, no. 11, pp. 3383–3390, 2006.
- [32] M. García-Vigueras, J. L. Gómez-Tornero, G. Goussetis, J. S. Gómez-Díaz, and A. Alvarez-Melcón, "A modified pole-zero technique for the synthesis of waveguide leaky-wave antennas loaded with dipole-based FSS," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 6, pp. 1971–1979, 2010.
- [33] M. García-Vigueras, J. L. Gómez-Tornero, G. Goussetis, A. R. Weily, and Y. J. Guo, "Efficient synthesis of 1-d fabry–perot antennas with low sidelobe levels," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 869–872, 2012.
- [34] F. Xu and K. Wu, "Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide," *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, vol. 53, no. 1, pp. 66–73, 2005.
- [35] D. Deslandes, "Substrate integrated waveguide leaky-wave antenna: Concept and design considerations," in *Asia Pacific Microwave Conference Proc., Dec. 2005*, vol. 1, 2005, pp. 346–349.

- [36] A. J. Martínez-Ros, J. L. Gómez-Tornero, and G. Goussetis, "Planar leaky-wave antenna with flexible control of the complex propagation constant," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 3, pp. 1625–1630, 2011.
- [37] —, "Broadside radiation from radial arrays of substrate integrated leaky-wave antennas," in *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. IEEE, 2012, pp. 252–254.
- [38] J. L. Gómez-Tornero, A. Martínez-Ros, A. Álvarez-Melcón, F. Mesa, and F. Medina, "Substrate integrated waveguide leaky-wave antenna with reduced beam squint," in *2013 European Microwave Conference*. IEEE, 2013, pp. 491–494.
- [39] A. J. Martínez-Ros, J. L. Gómez-Tornero, and G. Goussetis, "Multifunctional angular bandpass filter siw leaky-wave antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 936–939, 2016.
- [40] 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, 2021.
- [41] J. L. Gómez-Tornero, M. Poveda-García, R. Guzmán-Quirós, and J. C. Sánchez-Arnause, "Design of ku-band wireless power transfer system to empower light drones," in *2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. IEEE, 2016, pp. 1–4.
- [42] C. Song, L. Wang, M. Wagih, M. Poveda-García, and Y. Huang, "Novel mmwave wireless power transfer systems using broadband circularly polarized rectennas and leaky wave transmitters," in *2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting (USNC-URSI)*. IEEE, 2023, pp. 539–540.
- [43] Q. Liao and L. Wang, "Switchable bidirectional/unidirectional LWA array based on half-mode substrate integrated waveguide," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 7, pp. 1261–1265, 2020.
- [44] K. M. Morshed, D. K. Karmokar, K. P. Esselle, and L. Matekovits, "Beam-switching antennas for 5g millimeter-wave wireless terminals," *Sensors*, vol. 23, no. 14, p. 6285, 2023.
- [45] J. A. Zhang, X. Huang, Y. J. Guo, J. Yuan, and R. W. Heath, "Multibeam for joint communication and radar sensing using steerable analog antenna arrays," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 1, pp. 671–685, 2018.

- [46] K. Wu, J. A. Zhang, X. Huang, R. W. Heath, and Y. J. Guo, "Green joint communications and sensing employing analog multi-beam antenna arrays," *IEEE Communications Magazine*, 2023.
- [47] M. Poveda-García, J. A. López-Pastor, M. Campo-Valera, D. Cañete-Rebenaque, and J. L. Gómez-Tornero, "Compact amplitude-monopulse antenna for joint two-dimensional direction finding and sectorized communications in the 2.4 Ghz ISM band," *IEEE Open J. Antennas and Propag*, 2023.
- [48] Y. Cui, F. Liu, X. Jing, and J. Mu, "Integrating sensing and communications for ubiquitous iot: Applications, trends, and challenges," *IEEE Network*, vol. 35, no. 5, pp. 158–167, 2021.
- [49] Z. Wei, F. Liu, C. Masouros, N. Su, and A. P. Petropulu, "Toward multi-functional 6G wireless networks: Integrating sensing, communication, and security," *IEEE Communications Magazine*, vol. 60, no. 4, pp. 65–71, 2022.
- [50] T. D. P. Perera, D. N. K. Jayakody, S. K. Sharma, S. Chatzinotas, and J. Li, "Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): Recent advances and future challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 264–302, 2017.
- [51] K. Wu, W. Ni, T. Su, R. P. Liu, and Y. J. Guo, "Efficient angle-of-arrival estimation of lens antenna arrays for wireless information and power transfer," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 1, pp. 116–130, 2018.
- [52] F. Liu, C. Masouros, A. P. Petropulu, H. Griffiths, and L. Hanzo, "Joint radar and communication design: Applications, state-of-the-art, and the road ahead," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 6, pp. 3834–3862, 2020.
- [53] J. R. Whinnery, "The teaching of electromagnetics," *IEEE Transactions on Education*, vol. 33, no. 1, pp. 3–7, 1990.
- [54] B. Pejcinovic and R. L. Campbell, "Active learning, hardware projects and reverse instruction in microwave/rf education," in *2013 European Radar Conference*. IEEE, 2013, pp. 259–262.
- [55] Z. Popovic, G. Artner, G. Lasser, and C. F. Mecklenbraeuer, "Electromagnetic-wave fun using simple take-home experiments [education corner]," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 62, no. 2, pp. 100–106, 2020.

- [56] K. F. Warnick and K. T. Selvan, "Teaching and learning electromagnetics in 2020: Issues, trends, opportunities, and ideas for developing courses," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 62, no. 2, pp. 24–30, 2020.
- [57] K. T. Selvan and K. F. Warnick, *Teaching electromagnetics: innovative approaches and pedagogical strategies*. CRC Press, 2021.
- [58] J. L. Gómez-Tornero, D. Cañete-Rebenaque, F. D. Quesada-Pereira, and A. Álvarez-Melcón, "Interactive lab to learn radio astronomy, microwave & antenna engineering at the technical university of cartagena (spain)," *Int. J. Online Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 10–18, 2011.
- [59] P. A. Sanger and J. Ziyatdinova, "Project based learning: Real world experiential projects creating the 21st century engineer," in *2014 International Conference on Interactive Collaborative Learning (ICL)*. IEEE, 2014, pp. 541–544.
- [60] A. A. Rahman, N. M. Zaid, B. Aris, Z. Abdullah, H. Mohamed, and H. Van Der Meijden, "Implementation strategy of project based learning through flipped classroom method," in *2016 IEEE Conference on e-Learning, e-Management and e-Services (IC3e)*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [61] E. Aydin and E. Kalayci, "Implementing consecutive project-based learning in an antenna and propagation course," *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 53, no. 1, pp. 87–96, 2016.
- [62] Y. Yu, Q. S. Cheng, and R. Barik, "Implementation of project-based learning in teaching an antenna and wave propagation course," in *2020 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)*. IEEE, 2020, pp. 698–703.
- [63] J. L. Besada, L. de Haro Ariet, B. Galocha, and M. A. Salas-Natera, "Asytrain: A new methodology for teaching and learning antennas," in *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2013, pp. 3479–3481.
- [64] M. B. Perotoni and M. S. Vieira, "Increasing the interest in antennas and microwave courses," *The International Journal of Electrical Engineering & Education*, vol. 56, no. 3, pp. 193–207, 2019.
- [65] U. Bulus, "Anten'it: A hardware-based antenna design and training kit [testing ourselves]," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 62, no. 1, pp. 107–112, 2020.

- [66] D. Bonafacic, J. Jancula, and N. Majurec, "Model of a monopulse radar tracking system for student laboratory," *Radioengineering*, vol. 16, no. 3, p. 63, 2007.
- [67] P. Saratayon, V. Pirom, and T. Saelim, "Rssi monopulse azimuth tracking demonstration using wideband personal area network device," *Int. Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 2, no. 9, pp. 663–670, 2013.
- [68] M. Poveda-García, J. A. López-Pastor, A. Gómez-Alcaraz, L. M. Martínez-Tamargo, M. Pérez-Buitrago, A. Martínez-Sala, D. Cañete-Rebenaque, and J. L. Gómez-Tornero, "Amplitude-monopulse radar lab using wifi cards," in *2018 48th European Microwave Conference (EuMC)*. IEEE, 2018, pp. 464–467.
- [69] S.-G. Kim and K. Chang, "Low-cost monopulse antenna using bi-directionally-fed microstrip patch array," *Electronics letters*, vol. 39, no. 20, pp. 1428–1429, 2003.
- [70] E. Topak, J. Hasch, C. Wagner, and T. Zwick, "A novel millimeter-wave dual-fed phased array for beam steering," *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 61, no. 8, pp. 3140–3147, 2013.
- [71] X. Yu and H. Xin, "Direction of arrival estimation utilizing incident angle dependent spectra," in *2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*. IEEE, 2012, pp. 1–3.
- [72] D. Patron, H. Paaso, A. Mämmelä, D. Piazza, and K. R. Dandekar, "Improved design of a crlh leaky-wave antenna and its application for doa estimation," in *2013 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*. IEEE, 2013, pp. 1343–1346.
- [73] H. Paaso, N. Gulati, D. Patron, A. Hakkarainen, J. Werner, K. R. Dandekar, M. Valkama, and A. Mämmelä, "Doa estimation using compact crlh leaky-wave antennas: Novel algorithms and measured performance," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 9, pp. 4836–4849, 2017.
- [74] M. Campo-Valera, M. Poveda-García, J. García-Fernández, D. Cañete-Rebenaque, and J. L. Gómez-Tornero, "Handmade microstrip leaky-wave antenna in uhf band for educational purposes," in *2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. IEEE, 2022, pp. 01–05.
- [75] ——. (2022) <https://acortar.link/ieee>.
- [76] M. Chemicals. (2023) <https://acortar.link/placasfr4>.

- [77] R. C. Ltd. (2023) <https://acortar.link/cintaradiante>.
- [78] —. (2023) <https://acortar.link/conectorcoaxial>.
- [79] I. Impinj. (2023) <https://acortar.link/lector>.
- [80] H. G. Corporation. (2023) <https://acortar.link/tagpasivo>.
- [81] L. WRT54GL. (2023) <https://acortar.link/router>.

