

ANTENAS PARA DISPOSITIVOS MÓVILES 5G e IoT

Nerea Gualda Fernández

Tutor: Miguel Ferrando Bataller

Cotutor: Marta Cabedo Fabres

Trabajo Fin de Máster presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Máster en Ingeniería Telecomunicación

Curso 2018-19

Valencia, 3 de julio de 2019



“Technology, like art, is a soaring exercise of the human imagination.”

-Daniel Bell-

A mis padres, a mi pequeña Estela.



Resumen

La quinta generación (5G) de redes móviles de telecomunicaciones traerá consigo la implantación de los dispositivos pertinentes para su conectividad a la red, siendo para ello necesario el diseño de antenas particularmente adaptadas para los mismos. Las bandas de funcionamiento de estos dispositivos otorgadas para aplicaciones como *Internet of Things* serán las bandas bajas de 800 y 900 MHz, correspondientes a las bandas del Dividendo Digital en Europa, las bandas ISM otorgadas por la ITU, como es el caso de las bandas de 2.45 GHz y de 3.5 GHz, y, además, las bandas correspondientes a la propagación de ondas milimétricas.

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster “Antenas para dispositivos móviles 5G e IoT” consiste en el diseño de antenas con buena adaptación, sintonizables y fáciles de implementar en placas de circuito impreso para su uso en dichas bandas de frecuencia. Serán antenas de bajo coste y altas prestaciones, es este caso, orientadas concretamente a su uso en las bandas inferiores destinadas a la próxima generación de telefonía móvil.

Gracias a un análisis exhaustivo de los dispositivos comerciales existentes a día de hoy, los cuáles poseen su funcionamiento en dichas bandas de frecuencia, se proponen diferentes diseños de antenas con sus posteriores simulaciones con herramientas software de última generación. Además, como línea de trabajo futura, se plantea la construcción de prototipos para la comprobación de medidas reales con las obtenidas a partir de las simulaciones realizadas.



Resum

La cinquena generació (5G) de xarxes mòbils de telecomunicacions portarà amb si la implantació dels dispositius pertinents per a la seua connectivitat a la xarxa, i és per això necessari el disseny d'antenes particularment adaptades per a les mateixes. Les bandes de funcionament d'aquests dispositius atorgades per a aplicacions com *Internet of Things* seran les bandes baixes de 800 i 900 MHz, corresponents a les bandes del Dividend Digital a Europa, les bandes ISM atorgades per la ITU, com és el cas de les bandes de 2.45 GHz i de 3.5 GHz, i, a més, les bandes corresponents a la propagació d'ones mil·limètriques.

L'objectiu d'aquest Treball Fi de Màster "Antenes per a dispositius mòbils 5G i Iot" consisteix en el disseny d'antenes amb bona adaptació, sintonitzables i fàcils d'implementar en plaques de circuit imprès per al seu ús en aquestes bandes de freqüència. Seran antenes de baix cost i altes prestacions, és aquest cas, orientades concretament al seu ús en les bandes inferiors destinades a la propera generació de telefonia mòbil.

Gràcies a un anàlisi exhaustiu dels dispositius comercials existents a dia d'avui, els quals posseeixen el seu funcionament en aquestes bandes de freqüència, es proposen diferents dissenys d'antenes amb les seues posteriors simulacions amb eines software d'última generació. A més, com a línia de treball futura, es planteja la construcció de prototips per a la comprovació de mesures reals amb les obtingudes a partir de les simulacions realitzades.



Abstract

The fifth generation (5G) of mobile Wireless telecommunication networks will accelerate the deployment of the appropriate devices to ensure network connectivity and, as such, antenna designs particularly adapted to them. The operating frequency bands assigned to applications such as *Internet of Things* will be the 800 MHz and 900 MHz low-frequency bands – corresponding to the European Digital Dividend, the ISM bands managed by ITU – such as 2.45 GHz and 3.5 GHz, and, additionally, the recently popularized millimeter wave frequency bands.

The goal of this Master's Dissertation “Antennas for mobile devices for 5G and IoT” is to present the design of antennas with efficient impedance matching, ease of frequency tuning and seamless implementation in printed circuit boards, meant to be used in the aforementioned frequency bands. The antennas designed for the lower frequency bands for mobile communications are optimized for low cost and high performance.

Thanks to a thorough analysis of the currently available commercial devices which operate at these frequencies, a variety of different antenna designs is proposed, followed by simulations with the latest generation of software tools. In addition, as a future line of work, the construction of prototypes is proposed for the verification of real measurements with those obtained from the simulations carried out.



Índice

Capítulo 1.	Introducción.....	3
1.1	Contexto	3
1.2	Estado del arte	5
1.3	Objetivos	6
1.4	Metodología.....	7
1.4.1	Gestión del proyecto y distribución de tareas	7
1.4.2	Diagrama temporal.....	8
1.5	Pliego de condiciones. Requerimientos de antenas.....	9
1.6	Descripción del proyecto.....	10
Capítulo 2.	5G. Sistemas y servicios de telecomunicación inalámbricos	11
2.1	Introducción a las redes 5G	11
2.2	Otros estándares inalámbricos	13
2.3	Sistemas y servicios.....	14
Capítulo 3.	Fundamentos de antenas	15
3.1	Teoría de antenas.....	15
3.1.1	Impedancia	15
3.1.2	Intensidad y diagrama de radiación	16
3.1.3	Ancho de haz.....	16
3.1.4	Directividad.....	17
3.1.5	Eficiencia	17
3.1.6	Ancho de banda.....	18
3.2	Antenas microstrip	19
3.2.1	Características y fundamentos de antenas microstrip	19
3.2.2	Técnicas de alimentación	19
3.2.3	Principio de funcionamiento	21
3.3	Antenas compactas para dispositivos móviles	22
3.3.1	Monopolo	23
3.3.2	Antena ILA	23
3.3.3	Antena IFA.....	24
3.3.4	Simulación y comparativa de antenas lineales.....	24
Capítulo 4.	Antenas tipo chip	33
4.1	Antenas tipo chip comerciales.....	33
4.2	Caracterización de antena cerámica tipo chip. Comparación de resultados con antena comercial.....	35



Capítulo 5.	Antenas lineales impresas. Diseño y simulación	43
5.1	Parámetros de diseño. Sustrato y guía de onda coplanar (CPW)	43
5.2	Antena monopolo impresa.....	44
5.3	Antena L invertida impresa	49
5.4	Antena F invertida impresa	53
Capítulo 6.	Diseño y simulación de antenas para dispositivos portátiles.....	58
6.1	Diseño y simulación de antena IFA a 868 MHz sobre plano circular.....	58
6.2	Diseño y simulación de antena IFA a 915 MHz sobre plano circular.....	63
6.3	Diseño y simulación de antenas IFA a 2.4 GHz sobre diversos tipos de planos.....	67
6.4	Aplicaciones	74
Capítulo 7.	Conclusión y líneas futuras.....	75
Capítulo 8.	Bibliografía	77

Capítulo 1. Introducción

La próxima generación de comunicaciones inalámbricas, sin duda alguna, supondrá una revolución en todos los sentidos. Baja latencia, alta velocidad y bajo coste, un ecosistema masivo de IoT donde las redes sean capaces de cubrir la necesidad de comunicación de millones de dispositivos.

Este Trabajo Fin de Máster abarca el análisis del estado del arte de las comunicaciones inalámbricas y de los dispositivos que a día de hoy se emplean para ello. Como objetivo, el diseño y simulación de antenas capaces de ser integradas en sistemas para 5G e IoT.

1.1 Contexto

Como consecuencia del aumento de la demanda de servicios móviles, se han ido desarrollando a lo largo de la historia diferentes tecnologías para dar soporte a servicios. Siendo necesario a su vez, el desarrollo e implementación de antenas que funcionen a las frecuencias de trabajo de dichos servicios.

La próxima generación de redes de telecomunicaciones 5G, acompañada del IoT masivo, llegará al mercado en torno a 2020. Estimándose que el tráfico que circulará por las redes inalámbricas superará los 500 exabytes, siendo, además, 29 millones de dispositivos los que se conecten a la red, 18 millones de los cuales serán dispositivos IoT. [1][2]

La evolución más notable de estas redes en comparación con las redes 4G y LTE Advanced, se basa en la alta tasa de datos por dispositivo, la alta velocidad de datos por área, la gran cantidad de dispositivos conectados a la red, latencia baja y soporte para aplicaciones críticas donde será viable la interacción en tiempo real a servicios que utilizan la nube, como comunicaciones vehículo a vehículo (V2V). Además, el bajo consumo de energía permitirá que los dispositivos conectados funcionen durante largos periodos de tiempo sin necesidad de intervención humana. [3]

Para hacer posible el funcionamiento de esta nueva generación, los operadores móviles han aumentado la capacidad con la posesión de nuevas zonas del espectro radioeléctrico, además del uso de nuevos esquemas de modulación y codificación más eficiente, sumado a la adición de innovadoras técnicas de antenas múltiples. [4]

Las bandas ISM¹ que la ITU ha seleccionado en España para aplicaciones como *Internet of Things* serán las bandas de 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1.5 GHz, 2.1 GHz, 2.3 GHz y 2.6 GHz, aunque el tiempo de asignación a 5G será más tardío que las bandas altas. [5] Las bandas bajas de frecuencia serán capaces de trabajar a 100 Mbps con cobertura de largo alcance, mientras que las bandas de 1.5 y 3.5 GHz serán las destinadas al despliegue de ciudades inteligentes y otros dispositivos como vehículos autónomos. Por último, las bandas más altas como la de 26 GHz, presentará cobertura con menor alcance, pero velocidades de hasta 10 Gbps. [6]

Las tecnologías inalámbricas empleadas en España destinadas a aplicaciones radio, se

¹ ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) son bandas reservadas internacionalmente para el uso no comercial de radiofrecuencia en el área industrial, científica y médica.



recogen, mayoritariamente, basadas en el estándar 802.11 (Wi-Fi). Éste fue el primer estándar y permite un ancho de banda entre 1 y 2 Mbps, sufriendo mejoras con el fin de optimizar su ancho de banda y de aportar mayor seguridad o compatibilidad a los dispositivos. Llegada esta evolución al estándar 802.11n, aparece la diversidad de antenas, y el multiplexado por división espacial (SDM), donde es posible la transmisión simultánea de múltiples flujos gracias a la tecnología MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*). Con el estándar 802.11n, es posible trabajar en la banda de 2.4 GHz y 5 GHz, consiguiéndose como velocidad máxima de transmisión 600 Mbps. Ya en esta última banda de frecuencia, aparece el estándar 802.11ac o también conocido como Wi-Fi 5G, con el que se pretenden alcanzar tasas de velocidad máxima de 1.3 Gbps con tan sólo 3 antenas. [7]

En cuanto a sistemas inalámbricos que trabajan en la banda libre de 5 GHz, cabe destacar los que incorporan la tecnología RFID (*Radio Frequency Identification*), donde dependiendo de la frecuencia de uso presentará un determinado funcionamiento. Para aplicaciones que trabajan a frecuencias mayores a 100 kHz, como en el caso de aplicaciones a 5.8 GHz, se basa en campo lejano, siendo su rango de actuación de más de 10 metros. En el segundo caso, su funcionamiento se basa en campo cercano (NFC) basándose en el acoplamiento inductivo entre un lector compuesto por una bobina, y una etiqueta con su correspondiente bobina también. Se emplea a frecuencias por debajo de los 100 kHz. [8]

El aumento del tráfico de datos móviles dado en esta próxima generación 5G, lleva consigo la implantación de nuevas técnicas y tecnologías para dar servicio al usuario tales como el empleo de antenas multihaz, con el fin de conseguir así, la ampliación de la capacidad, llevando consigo el aumento de la cobertura. El *beamforming* se puede emplear a frecuencias de hasta 30 GHz trayendo consigo la mejora de cobertura *indoor-to-indoor*. [9]



1.2 Estado del arte

Las antenas son elementos imprescindibles a la hora de implementar un sistema de telecomunicaciones inalámbrico, siendo sus parámetros característicos determinantes en la capacidad del sistema del que forman parte. Hasta ahora, las antenas se han considerado como un elemento radiante simple, pero, hoy en día, la mayoría de sistemas ya no se componen de una única antena, sino de un array de ellas, proporcionando así mejores prestaciones gracias al acoplo electromagnético.

El estándar 802.11 (Wi-Fi) se ha convertido en el más demandado para comunicaciones de red de área local inalámbricas (WLAN) en las bandas ISM de 2.4 GHz y 5 GHz. También se ha de tener en cuenta otros servicios como *Global Positioning System* (GPS) o Bluetooth. La tecnología Wi-Fi ha ido evolucionando y ha llevado consigo la aparición de antenas multibanda, sistemas MIMO y la técnica de multipolarización. Las antenas empleadas en esta tecnología pueden clasificarse en antenas exteriores como estaciones base fijas, antenas interiores con cobertura omnidireccional, y, por último, antenas para dispositivos móviles, pequeñas y de bajo perfil. [10]

Las antenas de tipo impreso cobran cada día más protagonismo dando solución a sistemas en los que se requiere la implantación de un elemento radiante, como en el caso de los terminales móviles. La próxima generación 5G incorporará entre sus componentes más característicos de este tipo de antenas, las cuales poseen gran facilidad de integración, buen control de la radiación, y, por lo tanto, alta eficiencia y bajo coste. Como inconvenientes, un ancho de banda reducido, la transmisión de menos potencia y la aparición de radiación espúrea. [11]



1.3 Objetivos

Este Trabajo Fin de Máster “Antenas para dispositivos móviles 5G e IoT” abarca el análisis del estado del arte de las comunicaciones inalámbricas y de los dispositivos que, a día de hoy, podemos emplear para ello. Además, este proyecto consiste en el diseño y simulación de dos elementos radiantes tipo parche con tecnología microstrip de bajo perfil, fáciles de implementar, gracias a la realización de un estudio teórico previo.

Los diseños propuestos con el simulador electromagnético cumplen con las premisas necesarias para aplicaciones inalámbricas capaces de trabajar a diversas frecuencias. Gracias a la implementación de antenas impresas, se ha conseguido la obtención de dispositivos portátiles de tamaño reducido para aplicaciones donde se premia la miniaturización de los mismos.

Por lo tanto, el objetivo principal de este proyecto engloba el desarrollo de antenas impresas, las cuales, serán destinadas a la implementación de dispositivos que soporten nuevas tecnologías inalámbricas como Wi-Fi, Bluetooth o UWB. Se cumplirá este objetivo, primeramente, con la simulación de dichas antenas que permita obtener de forma precisa y fiable las mismas.

Tras ello, como línea futura se propone la puesta en marcha de un laboratorio para la fabricación y medidas de nuestras antenas. Así, podremos comparar los resultados obtenidos de manera idea con los medidos.

El estudio de manera más extensa del comportamiento de este tipo de antenas, facilita, al fin y al cabo, su integración en los dispositivos de quinta generación para comunicaciones inalámbricas de manera más eficiente, y conseguir así, abarcar un mayor tráfico de datos.

1.4 Metodología

A la hora de plantear la metodología seguida para la consecución de los objetivos marcados para este proyecto, se plantean dos sub-apartados, en los cuales se recoge la gestión y distribución de todas las tareas seguidas para ello.

Partiendo de la realización de un profundo estudio bibliográfico de los estándares, sistemas y servicios tecnológicos orientados a las comunicaciones móviles inalámbricas, seguido del análisis de los tipos de antenas desarrolladas para llevar a cabo estas comunicaciones.

Tras este análisis se plantean varios diseños y alternativas de antenas lineales, impresas e incluso, de tipo chip cerámicas, las cuales todas ellas son capaces de hacer viable la comunicación inalámbrica entre dos dispositivos, con rendimiento y funcionamiento óptimo de manera altamente eficiente.

Como trabajo futuro, se propone la fabricación de estos elementos radiantes, y así, poder realizar la comparación de medidas entre las obtenidas bajo el software de simulación, y las que se obtendrían de manera experimental.

1.4.1 Gestión del proyecto y distribución de tareas

Se ha pretendido alcanzar los objetivos expuestos anteriormente mediante un exhaustivo análisis bibliográfico detallado de los aspectos a tratar, la revisión del estado del arte que compete y el estudio de los estándares, sistemas y servicios relacionados con la quinta generación.

Se han propuesto diferentes diseños de antenas impresas con sus posteriores simulaciones y validaciones. Para ello, se ha empleado el software *CST Microwave Studio*, simulador electromagnético de onda completa basado en el método de las diferencias finitas (FDTD); y especializado en la simulación 3D de todo tipo de componentes de microondas. Este método de resolución utiliza las ecuaciones de Maxwell en función del tiempo realizando una discretización temporal de las mismas. La implementación de FDTD hace que la carga computacional sea relativamente ligera, ya que no es necesario que exista un procesamiento de datos previo. Además, los resultados obtenidos con este método son válidos para un amplio margen de frecuencias. [12]

Para la correcta realización de este proyecto, se precisa de la aclaración de algunos conceptos, es por ello por lo que se ha realizado en primer lugar, el estudio teórico de ciertos aspectos relacionados con la teoría de antenas, conceptos básicos de las mismas y parámetros característicos. Además de antenas lineales impresas, capaces de trabajar en una o varias bandas de frecuencia, y de antenas tipo chip comerciales, para posteriormente realizar una comparación con los resultados obtenidos al caracterizar una de ellas de manera experimental.

Tras focalizar en el entorno teórico de este trabajo, se plantea como herramienta de simulación *CST Microwave Studio*. Este simulador electromagnético ofrece la posibilidad de realizar un análisis rápido y preciso de antenas, estructuras resonantes, conectores, filtros, además de otros dispositivos.

Se han propuesto cuatro tipos de diseños de antenas, antenas lineales como el monopolo, antena L invertida y antena F invertida enfrentadas al plano de masa, y antenas

lineales impresas como estos tres tipos de antenas pasadas, pero esta vez orientadas con tecnología planar sobre el plano dieléctrico y conectadas a la placa de circuito impresa.

Se mostrarán los resultados obtenidos de la comparación entre una antena comercial cerámica de tipo chip y los resultantes de caracterizar esta misma antena comercial, aplicando técnicas de diseño de antenas, además, de la incorporación de una red de adaptación.

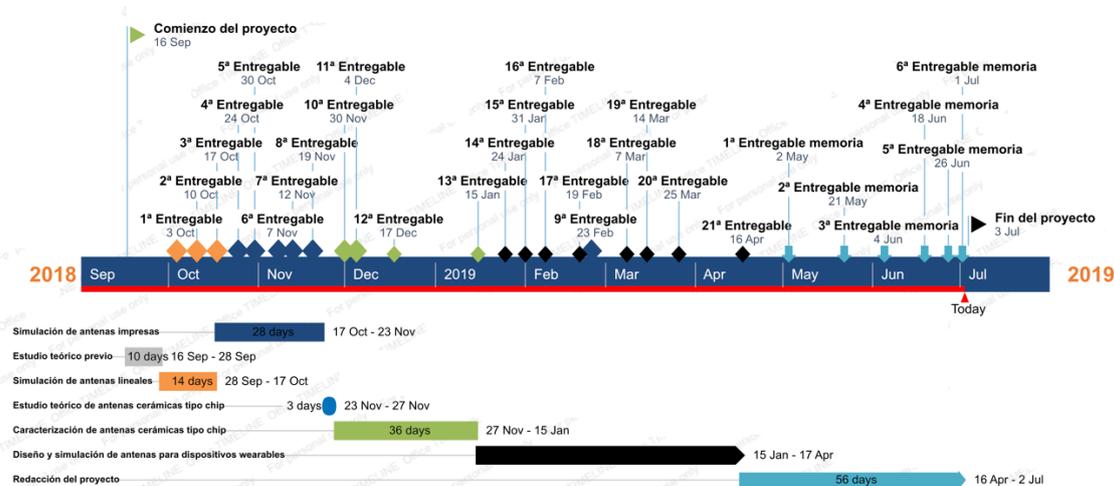
Por último, aparecen varias simulaciones de antenas F invertidas sobre diversos planos, con el fin de dar veracidad a este tipo de antenas como uno de los más recomendables a la hora de ser implantados en tecnología móvil, gracias a su compactación y facilidad de integración debido a su reducido tamaño sin renunciar a un alto rendimiento.

1.4.2 Diagrama temporal

Dado que este proyecto se podría clasificar como un proyecto teórico, se ha realizado bajo la supervisión al alumno por parte del tutor y cotutora, un seguimiento semanal durante varios meses al comienzo del mismo, y tras esos meses, se dio continuidad a este seguimiento, pero quincenalmente.

Durante estas sesiones semanales, y después quincenales, se han presentado por parte del alumno resultados parciales, sobre los cuales los tutores han reorientado el trabajo del mismo para la guía de consecución de este proyecto.

Diagrama de Gantt





1.5 Pliego de condiciones. Requerimientos de antenas.

En este proyecto el pliego de condiciones, al ser un proyecto de carácter teórico y de simulación por software, no incluye presupuestos de materiales ni equipos empleados para el desarrollo del mismo. Como línea futura, se plantea la fabricación de los diseños propuestos, dónde sí será necesario, en ese momento, la recogida de planos de los diseños, y costes de la instrumentación y materiales empleados en un nuevo pliego de condiciones.

En este caso, el pliego de condiciones engloba los requerimientos de las antenas a diseñar en este proyecto. Todos los diseños están orientados a su integración en dispositivos móviles para su uso en comunicaciones inalámbricas.

Las antenas están diseñadas para que sus frecuencias de trabajo central se sitúen en la banda de frecuencias otorgadas para aplicaciones como *Internet of Things*, como las bandas bajas de 800 y 900 MHz, y, además, en las bandas libres ISM otorgadas por la ITU, como es el caso de la banda de 2400 MHz, donde se implementan estándares como Wi-Fi, y servicios como GPS y Bluetooth.

Como premisas técnicas, se requiere que las antenas diseñadas sean lo más compactas posibles sin perder su alto rendimiento y eficiencia. Para ello, se requiere que el coeficiente de reflexión de las mismas, se sitúe por debajo de -6 dB para la banda de trabajo de la antena, presentando como objetivo poseer el mayor ancho de banda posible.

En el caso de la impedancia de entrada, se requiere que, en dichas frecuencias, la antena resuene a la frecuencia escogida, siendo, además en ese punto, donde la antena posea su frecuencia de máximo trabajo, donde los valores de resistencia y de reactancia sean lo más cercanos a 50Ω y 0Ω , respectivamente.

De las eficiencias, se espera que tanto la eficiencia de radiación como la eficiencia total de cada uno de los diseños, presente valores por encima de -4 dB en toda la banda de frecuencias de trabajo requerida.

El cumplimiento de todos estos requerimientos técnicos, no han de suponer que los diseños sean menos compactos y de menos sencillez, es más, cada una de las técnicas de diseño empleado han de colaborar para que los diseños presenten la tendencia a miniaturizarse en la medida de lo posible.

1.6 Descripción del proyecto

A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de los capítulos que componen este proyecto.

En el Capítulo 2, se abordarán en detalle los servicios y sistemas de telecomunicaciones inalámbricos, incluyendo estándares y bandas de frecuencia de funcionamiento de los mismos.

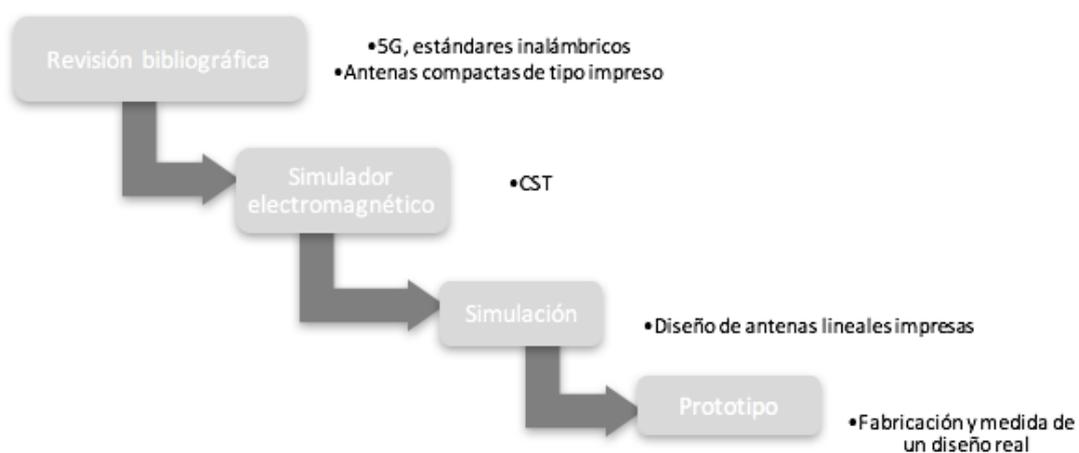
En el Capítulo 3, se llevará a cabo la exposición de una breve descripción de fundamentos de antenas, donde además de detallar los parámetros más característicos de las mismas, se profundizará de manera teórica en antenas compactas para dispositivos móviles como antenas tipo monopolo y antenas lineales impresas.

En el Capítulo 4, se adentrará en el entorno de las antenas tipo chip comerciales, incluyendo la comparación de medidas entre una de estas antenas y un diseño simulado implementado a partir la caracterización de la misma.

En el Capítulo 5, se presentará el diseño y simulación de antenas lineales impresas tipo parche junto con la herramienta utilizada para la realización de diseños. Se describirán la antena L invertida (ILA), y la antena F invertida (IFA), ésta última en mayor profundidad.

En el Capítulo 6, se detalla el diseño y simulación de antenas destinadas a su uso en dispositivos móviles portátiles para aplicaciones de 5G e IoT. Se llevan a cabo diversas propuestas de antenas cada una de ellas correspondiente a cada banda de frecuencia de trabajo, cumpliendo en cualquiera de los casos, las premisas para este tipo de comunicaciones de futura generación.

En el Capítulo 7, se recogen las conclusiones a los diseños, y las posibles líneas futuras de trabajo de investigación a seguir, como la fabricación de prototipos con el fin de comparar las medidas obtenidas gracias a la simulación con las medidas obtenidas a partir de técnicas de medida reales.



Capítulo 2. 5G. Sistemas y servicios de telecomunicación inalámbricos

A diferencia del resto de las redes en uso hoy en día, las redes 5G están diseñadas para extraer el máximo rendimiento a la tecnología IoT masivo. Más velocidad, menos latencia y con millones de dispositivos conectados simultáneamente sin perder rendimiento alguno.

2.1 Introducción a las redes 5G

Desde un tiempo a esta parte, únicamente la organización internacional 3GPP ha sido la encargada de definir el estándar que dará las premisas para conseguir el desarrollo de una red de quinta generación. Todos aquellos productos y dispositivos que surjan para la comunicación móvil 5G han de estar diseñados bajo las especificaciones fijadas por esta entidad recogidas en cada uno de sus *releases*. Esto da a entender que las nuevas redes de quinta generación son redes independientes las cuales no están basadas en ningún sistema de redes actual ya existente.

Según publica la 3GPP en su *Release 15*, las primeras redes 5G se clasifican como “*non-standalone*”, es decir, las redes no serán independientes con respecto a la estructurada red 4G/LTE ya existente, por lo que serán compatibles con éstas últimas.

La tecnología 5G se caracteriza por una tasa de datos de hasta 100 Gbps, latencia de 1 milisegundo, un ancho de banda multiplicado por 1000 por unidad de área respecto a las redes ya existentes, disponibilidad de la red del 99.999%, cobertura del 100%, reducción del consumo de energía de la red de hasta un 90%, 100 dispositivos más conectados por unidad de área en comparación con LTE, y, por último, se pretenderá que los dispositivos de IoT masivo de baja potencia presenten una batería cuya duración sea de alrededor de los 10 años. [13]

La asignación del espectro de radiofrecuencias es un requisito esencial para las pruebas y el despliegue del 5G antes de 2020. Debido a la óptima propagación de las ondas y del ancho de banda disponible, se han tomado bandas inferiores del espectro entre 1 GHz y 6 GHz para la implementación temprana de la quinta generación. En el caso de Europa, se ha considerado la banda de 3400 MHz a 3800 MHz dentro de este rango mencionado anteriormente.

El uso de las bandas de frecuencia superiores, bandas milimétricas, ofrece una tasa de datos de hasta 20 Gigabits por segundo, además de la implementación de la técnica MIMO masivo consiguiéndose un rendimiento de hasta 10 veces mayor que con las redes 4G. En el caso de Europa, se ha considerado pionero el uso de la banda de 26 GHz para la implementación del 5G en estas bandas de altas frecuencias. La banda de 24.25 GHz a 27.5 GHz se prevé otorgarla a fines comerciales a partir de 2020.

Otras bandas de interés para el despliegue de las redes 5G son las bandas de 600, 700, 800 y 900 MHz, además de la de 1.5 y 2.1 GHz. Todas ellas pueden ser destinadas para aplicaciones como IoT, y automatización de la industria, entre otros. [2]

IoT se define como la conexión entre dispositivos y seres humanos a través de Internet, por lo que sus aplicaciones se expanden a diversos ámbitos. Dispositivos *wearables*, pequeños y eficientes, los cuales, incorporan sensores con la función de monitorizar, recolectar y compartir datos tales como los respectivos a la gestión del tráfico, la gestión de flotas, o los correspondientes al seguimiento de las condiciones médicas de un paciente fuera y dentro del hospital a tiempo real. [14]



En el caso de España, particularmente, la subasta a los operadores del radioespectro de frecuencias se cerró el pasado 25 de Julio por parte del Ministerio de Economía y Empresa. Vodafone, el cuál carece de licencia para operar en la banda de 3.4 a 3.6 GHz, pudo alzarse con una banda del espectro de 90 MHz dentro de la banda de 3.6 a 3.8 GHz. Orange fue capaz de adquirir 100 MHz, mientras Movistar se hizo con 90 MHz, y MásMóvil, con 80 MHz del espectro, adquiriéndolos estos tres últimos operadores en la banda de 3.4 a 3.6 GHz. En lo que respecta a la banda de 700 MHz, aun, no ha sido subastada, ya que será necesario liberar de dicha frecuencia los canales de TDT.

La quinta generación se conocerá como la era de las máquinas, gracias a la rápida velocidad de comunicación, y a ofrecer la posibilidad de trabajar con diferentes tipos y generaciones de redes. Sin lugar a duda, el gigante tecnológico que puede presumir de sus logros recientes en el estándar y redes 5G es Samsung. [15] A día de hoy, ya ha presentado en su nueva línea, su primer modelo de teléfono con conectividad 5G, el Samsung Galaxy S10 5G. Este dispositivo saldrá a la venta en Europa este próximo verano.

2.2 Otros estándares inalámbricos

Otros de los estándares inalámbricos más implementados en redes, a día de hoy, son Bluetooth y Wi-Fi.

El grupo Bluetooth SIG (*Special Interest Group*) desarrolló la tecnología Bluetooth, la cual, opera en la banda de 2.4 GHz, se caracteriza por su robustez, bajo consumo y bajo coste, desarrollada para aumentar la efectividad de la comunicación inalámbrica de corto alcance entre dispositivos, tanto para áreas de trabajo como en espacios públicos. Existen tres clases de dispositivos Bluetooth clasificados en función de la potencia de transmisión del dispositivo, siendo todos ellos compatibles entre sí, independientemente de la clase a la que pertenezcan.

En cuanto a las cuatro versiones que posee Bluetooth, destacar que la versión 1.2, provee de una solución inalámbrica para la coexistencia de Bluetooth y Wi-Fi en la banda de 2.4 GHz, sin interferencia alguna entre ellos. Además, esta versión implementa la técnica AFH² (*Adaptive Frequency Hopping*), para una transmisión más eficaz y aportar mayor seguridad a la comunicación. [16]

Wi-Fi Alliance es el grupo encargado de la certificación de productos y dispositivos que cumplen con el conjunto de IEEE de estándares 802.11. Dentro de este grupo de estándares inalámbricos pertenecientes a este amplio conjunto, se ha de prestar especial atención a los estándares 802.11ac y 802.11ah o Wi-Fi HaLow.

El estándar 802.11ac se implementa en la banda de frecuencia de 5 GHz. Da la posibilidad de conseguir un mayor alcance en la comunicación gracias a la tecnología *Beamforming*. En la práctica es capaz de alcanzar velocidades en torno a los 100 Mbps, con un ancho de banda de hasta 160 MHz. Incorpora, además, *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) y unión de interfaces de red (*Channel Bonding*).

Por otro lado, el estándar 802.11ah surge para dar servicio a la necesidad de recursos por parte de las nuevas tecnologías. Se diferencia de los demás estándares por usar frecuencias inferiores a 1 GHz, por lo que permite aumentar el alcance de la comunicación hasta 1 Km. Este protocolo es el principal competidor de la tecnología Bluetooth en dispositivos pequeños.

También nombrar a modo de curiosidad, la aparición recientemente del estándar 802.11p (*Wireless Access Vehicular Environment*, WAVE), dedicado para la comunicación entre vehículos. Opera en el rango de frecuencias de 5.9 GHz y 6.2 GHz, especialmente orientado para automóviles. [17]

² La tecnología de salto de frecuencia adaptativo (AFH), permite reducir las interferencias entre tecnologías inalámbricas que comparten el mismo espectro, intentando trabajar con bandas de frecuencia que no se hallan en uso en ese mismo momento.



2.3 Sistemas y servicios

La implantación de todos estos estándares mencionados anteriormente, ha dado lugar a la aparición de nuevos sistemas orientados a nuevas aplicaciones y que intentan superar las limitaciones de los existentes.

Los sistemas Wi-MAX, basados en el estándar 802.16, el cual se implementa en zonas metropolitanas de banda ancha. Se implementa en frecuencias desde los 2 GHz a los 11 GHz para establecer la comunicación entre la estación base y el usuario final, y el rango de frecuencias desde los 11 GHz a los 60 GHz se destina para las comunicaciones entre estaciones base. Cabe destacar la existencia del Wi-MAX fijo, y del Wi-MAX móvil, siendo capaces de transmitir datos con esta última modalidad, a una velocidad de 30 Mbps con un alcance de 3.5 Km aproximadamente. [18]

Los sistemas que incorporan la tecnología *ZigBee*, basada en el estándar 802.15.4, trabajan en las bandas de frecuencia de 868 MHz en Europa, de 915 MHz en Estados Unidos, y 2.4 GHz en todo el mundo, sin embargo, a la hora del diseño de los dispositivos, las empresas optan por la banda de 2.4 GHz, por ser una banda libre en todo el mundo. Éstos están destinados para la interconexión de una gran cantidad de dispositivos con baja tasa binaria, bajo consumo y bajo coste. Su aplicación está orientada a redes de sensores inalámbricos con un fin industrial o en domótica. [19]

Por último, comentar brevemente las características de los sistemas que incorporan la tecnología *Ultra-Wide-Band*, estandarizada como 802.15.4a. Se engloba cualquier transmisión radio que usa un ancho de banda superior a los 500 MHz o del 25 % de la frecuencia central. Utiliza un ancho de banda mayor que Wi-Fi y Bluetooth, permitiendo una mayor velocidad de transmisión, es decir, es capaz de transmitir más información en menos tiempo que las tecnologías anteriormente citadas. Se usa en el radio de las redes de área personal (PAN) y permite la transmisión de paquetes de hasta 480 Mbps en comunicaciones de corto alcance, de alrededor de unos cuantos metros.

Mientras que los sistemas que incorporan Wi-Fi y Bluetooth, trabajan en las bandas libres de 900 MHz, 2.4 GHz y 5.1 GHz, UWB hace uso del espectro de radiofrecuencias asignado. UWB puede usar frecuencias que van desde los 3.1 GHz a los 10.6 GHz. Cada canal tiene un ancho de banda superior a 500 MHz, dependiendo de la frecuencia central. Al compartir bandas de frecuencia con otros dispositivos, hace que los dispositivos tengan que estar relativamente cerca.

El uso de UWB presenta como ventajas un bajo consumo y bajo coste. A la hora de la transmisión de datos, se utilizan pulsos muy cortos en el tiempo que generan una señal cuyo espectro puede ocupar desde unos pocos Hz hasta varios GHz, por lo que puede considerarse como banda base. Los sistemas UWB emiten a una potencia muy baja que produce una densidad espectral de potencia de pocos mW/MHz. Pueden alcanzar un rango de hasta 1 Km para tasas de datos de entre 10 Kbps y 100 Kbps, y alcanzar menos de 100 metros para tasas superiores a 100 Mbps. [20]

Capítulo 3. Fundamentos de antenas

Según define el IEEE (*Institute of Electrical Engineers*), una antena es aquella parte de un sistema de transmisión o recepción diseñada para radiar o recibir ondas electromagnéticas. Por lo que se pueden definir como aquellos dispositivos capaces de adaptar las ondas guiadas, que se transmiten por conductores o guías, a ondas que se propagan en el espacio libre. [21]

La Teoría de las antenas surge de los desarrollos teóricos matemáticos formulados por James Clerk Maxwell en 1873, los cuáles fueron corroborados por los experimentos de Heinrich Hertz, en 1887. Dichas ecuaciones relacionan los campos eléctricos y magnéticos, con las corrientes y cargas que los crean. Además, también contribuyó la aparición de los primeros sistemas de radiocomunicaciones de Guglielmo Marconi, en 1897. [22]

3.1 Teoría de antenas

Para poder integrar una antena en un sistema, se ha de especificar su comportamiento, además de caracterizar todos sus parámetros. Es conveniente diferenciar si se tratan de parámetros de transmisión, como lo serán en este caso, o de recepción.

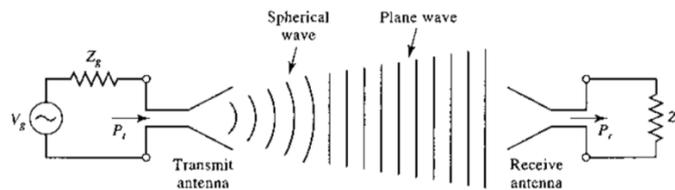


Fig. 1. Transmisión y recepción de una antena. [22]

Las antenas tienen unas características de impedancia y radiación dependientes de la frecuencia. Para analizar dichas características, se toman las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia.

3.1.1 Impedancia

La impedancia de entrada es la impedancia que presenta una antena en su terminal, es decir, la relación de la tensión entre la corriente en ese punto. Dicha impedancia es en general compleja. La parte real se denomina resistencia y la parte imaginaria reactancia de antena.

$$Z_i = V_i / I_i = R_a + jX_a \quad (\text{III.1})$$

Se precisa que la antena y el transmisor estén adaptados para que la transferencia de potencia sea máxima con un mínimo de pérdidas en ella. Estas pérdidas hacen que no toda la potencia entregada por el transmisor sea radiada, por lo que se merma así el rendimiento o eficiencia de la antena.

La resistencia de radiación se corresponde con la relación entre la potencia total radiada por la antena, y el valor eficaz de la corriente en bornes de sus terminales de entrada al cuadrado. La resistencia óhmica consiste en la relación entre la potencia disipada por el efecto

de las pérdidas resistivas y la corriente en sus terminales al cuadrado. Si sumamos estas dos resistencias, se obtendrá la resistencia total de la antena. [23]

$$Z_i = V_i / I_i = R_a + jX_a = (R_r + R_\Omega) + jX_a \quad (\text{III.2})$$

3.1.2 Intensidad y diagrama de radiación

Se conoce como intensidad de radiación a la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección.

Un diagrama de radiación se define como una función matemática o una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en las diferentes direcciones del espacio. Normalmente, se determina en la región de campo lejano y se representa como una función de coordenadas esféricas. Los formatos que puedes adoptar se corresponden los diagramas absolutos, los cuales representan campos para una potencia entregada a la antena a una distancia constante, o bien, relativos, tales como los anteriores mencionados normalizados respecto al máximo valor de la función a representar. [24]

Usualmente, se empleará un diagrama de radiación de coordenadas esféricas, expresándose en función de variables angulares (θ, ϕ) .

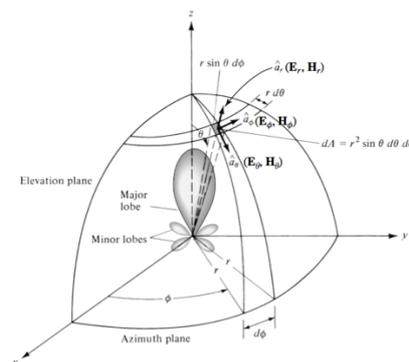


Fig. 2. Sistema de coordenadas esféricas. [25]

Siendo el campo magnético derivado del campo eléctrico, la representación podría realizarse en cualquiera de las dos variantes, siendo más habitual representar los diagramas referidos al campo eléctrico. Normalmente no es necesaria la representación del diagrama tridimensional, sino que es suficiente la información aportada por uno de los cortes del diagrama.

3.1.3 Ancho de haz

Se define ancho de haz como la separación angular entre dos puntos de idéntico valor de potencia en el lado opuesto de uno de los lóbulos del diagrama de radiación, normalmente, del lóbulo principal. [24]

De los anchos de haz existentes en un diagrama de radiación, merece especial mención el Ancho de haz de media potencia (HPBW), o bien, Ancho de haz a -3 dB, definido por IEEE como “Un corte del diagrama de radiación que contiene la dirección del máximo de un lóbulo, el ángulo entre las dos direcciones en el que la intensidad de radiación es la mitad del valor

máximo”. Otro ancho de haz importante es el Ancho de haz entre los primeros nulos (FNBW), separación angular entre los primeros nulos del diagrama de radiación. [21]

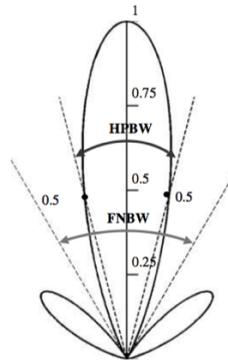


Fig. 3. Anchos de haz de una antena. [24]

3.1.4 Directividad

Según define el IEEE, la directividad trata “La relación entre la intensidad de radiación en una dirección dada desde la antena a la intensidad de radiación promediada en todas las direcciones”. [21]

Dicho de manera más simple, la directividad de una antena no isotrópica consiste en la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección, a una distancia, y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isotrópica a igualdad de potencia total radiada. La dirección angular que se toma como referencia, se sobreentiende, que se refiere a la dirección del máximo de radiación.

$$D(\theta, \phi) = \frac{\rho(\theta, \phi)}{P_r / (4\pi r^2)} \quad (\text{III.3})$$

Es posible obtener la directividad a partir del diagrama de radiación de la antena, gracias a la definición del ángulo sólido equivalente. [23]

$$D = \frac{4\pi}{\iint_{4\pi} t(\theta, \phi) d\Omega} = \frac{4\pi}{\Omega_e} \quad (\text{III.4})$$

Un parámetro directamente relacionado con la directividad es la ganancia de la antena. [22] Ésta tiene en cuenta la eficiencia y las capacidades direccionales de la misma. La ganancia de una antena se define como la relación entre la intensidad de radiación, en una dirección dada, y la intensidad de radiación que se obtendría si la potencia aceptada por la antena se irradiara de manera isotrópica. [21]

$$G(\theta, \phi) = \frac{\rho(\theta, \phi)}{P_{entregada} / (4\pi r^2)} = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} \frac{\rho(\theta, \phi)}{P_{radiada} / (4\pi r^2)} = \eta_l D(\theta, \phi) \quad (\text{III.5})$$

3.1.5 Eficiencia

La eficiencia de radiación de una antena es la relación entre la potencia radiada y la potencia entregada por el transmisor.

La eficiencia está entre 0 y 1, teniendo el mismo valor la directividad y la ganancia



cuando la antena no tiene pérdidas.

$$\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{G}{D} \quad (\text{III.6})$$

La eficiencia total de la antena se calcula para tener en cuenta las pérdidas en los terminales de entrada y dentro de la estructura de la antena. [23]

3.1.6 Ancho de banda

Debido a sus condiciones geométricas, todas las antenas tienen limitado su funcionamiento óptimo en un rango de frecuencias concreto. Se conoce como ancho de banda de una antena, a este margen de frecuencias que cumple con las especificaciones de la antena.

Será impuesto por el sistema sobre el cuál forme parte la antena, y afectará al parámetro más crítico de la red. Por lo que el ancho de banda relativo se expresa como la relación entre este margen de frecuencias óptimo y la frecuencia central de trabajo de la antena.

$$BW(\%) = \frac{f_{\text{máx}} - f_{\text{mín}}}{f_0} \cdot 100 \quad (\text{III.7})$$

3.2 Antenas microstrip

Las antenas microstrip, también conocidas como antenas impresas de tipo parche, consisten en un elemento radiante fabricado en un material conductor, implementado mediante líneas de transmisión o resonadores, dispuesto sobre un sustrato dieléctrico.

La aparición de este tipo de antenas se remonta a 1953, aunque fue a partir de los años 70 cuando su integración en sistemas recibió especial atención.

3.2.1 Características y fundamentos de antenas microstrip

Su fácil integración en superficies planas y no planas, al ser antenas de bajo perfil, su sencillez, lo económico que resulta el fabricarlas, utilizando, además, la última tecnología de circuitos impresos, la robustez mecánica al montaje en superficies rígidas, y la versatilidad que ofrecen en términos de resonancia, polarización e impedancia, hacen que estas antenas sean las idóneas para su uso en sistemas para comunicaciones inalámbricas o sistemas de posicionamiento global.

En cuanto a las desventajas de su aplicación, destacar, en el caso de un sustrato dieléctrico fino, su baja eficiencia que poseen limitada por potencia, su alto factor de calidad, pobre pureza de polarización y su ancho de banda relativamente pequeño. Este tipo de sustrato con constantes dieléctricas más altas es el más deseado para circuitos de microondas, ya que presenta menor radiación y acoplamiento.

Como se puede observar en la próxima ilustración (Fig.4), el parche, es decir, el plano conductor impreso que da lugar a la antena, puede presentar una geometría de lo más variada. Cuadrada, rectangular, circular o en forma de tira son las configuraciones más típicas debido a la facilidad de análisis y fabricación, además, de prestar mejores características de radiación. Otras configuraciones menos comunes son la elíptica, triangular o en anillo. [24] [25]

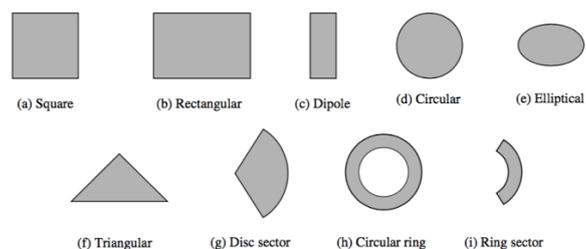


Fig. 4. Geometrías de un parche microstrip [24]

3.2.2 Técnicas de alimentación

El mecanismo de alimentación del parche de la antena microstrip determinará características fundamentales de la antena como el ancho de banda, la eficiencia, la dirección de los campos radiados, su robustez mecánica y la facilidad de integración y sencillez de fabricación. Dos métodos engloban dicho mecanismo, alimentación directa o por contacto, o bien, alimentación indirecta o sin contacto.

La alimentación directa o por contacto, *edge-fed*, se basa en alimentar el parche con una línea microstrip construida en la misma placa del circuito impreso que el parche, conectada desde un extremo de la misma hasta uno de los bordes de la antena tipo parche, unida por contacto directo (Fig.5). En este caso, a pesar de su facilidad de fabricación, se ha de tener en

cuenta que al estar en contacto la red de alimentación con la antena, se generará cierto nivel de radiación espúrea.

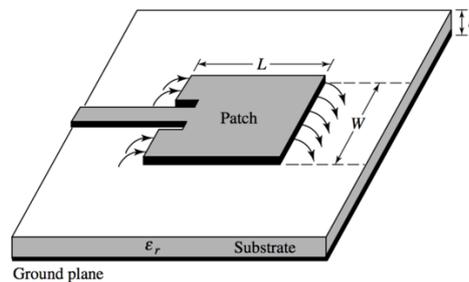


Fig. 5. Alimentación del parche *edge-fed* [24]

Alimentar mediante un conector coaxial (Fig.6) es otro de los métodos dentro de la alimentación directa. En este mecanismo, el conductor interior del coaxial, atraviesa el sustrato y se conecta directamente con el parche, mientras que el conductor exterior se conecta al plano de masa. [24]

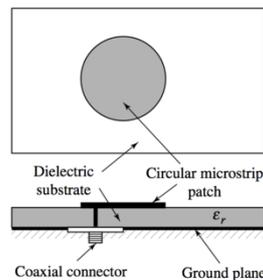


Fig. 6. Alimentación del parche *probe-fed* [24]

Otros métodos de excitación son el acoplamiento por proximidad (Fig.7) y el acoplamiento por apertura (Fig.8). Ambos tratan de dos placas de sustrato, sobre las que se coloca la red de alimentación y la antena. En el primer caso, el mecanismo consiste en un sustrato con plano de masa sobre el que se implementa una línea de microstrip de alimentación terminada en circuito abierto. Sobre esa lámina, se halla otra capa de sustrato que contiene la antena tipo parche.

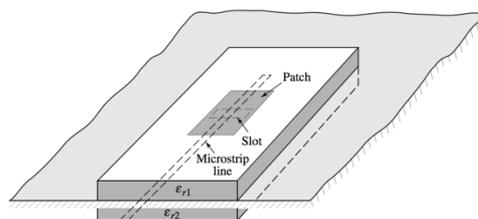


Fig. 7. Alimentación del parche *proximity coupled* [24]

En el otro método de excitación, los planos se encuentran aislados por un plano de masa, produciéndose el acoplo mediante un slot en el plano de masa. En esta ocasión, la línea microstrip de alimentación puede estar terminada tanto en circuito abierto como en cortocircuito. Hoy en día, los parches alimentados por acoplamiento por apertura son los más implementados. [24]

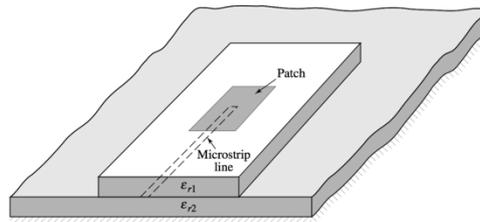


Fig. 8. Alimentación del parche *slot coupled* [24]

3.2.3 Principio de funcionamiento

En cuanto al principio de funcionamiento de las antenas microstrip, se pueden analizar desde el punto de vista más simple, basado en líneas de transmisión o cavidades, o bien, empleando hasta modelos más complejos con el uso de métodos numéricos o espectrales.

En este proyecto se ha implementado como método de funcionamiento, el modelo de línea de transmisión. En este modelo, la antena impresa de tipo parche se modela como una sección de línea de transmisión situada entre dos ranuras radiantes.

Los campos que se crean en los bordes de la antena de tipo parche se desbordan formando líneas de campo como se puede observar en la siguiente ilustración (Fig.9). Este efecto se conoce como *fringing effect*³. [26]



Fig. 9. Líneas de campo provocadas por *fringing effect* [24]

³ Fenómeno en el que el flujo magnético que fluye en el núcleo magnético se extiende hacia el medio circundante.

3.3 Antenas compactas para dispositivos móviles

El 3 de abril de 1973 fue el día en el que se realizó la primera llamada de la historia desde un teléfono móvil, con un terminal de la compañía Motorola. En 1983, esta misma compañía telefónica lanza el primer terminal móvil de la historia, el *Motorola Dynatac 8000x*.

A partir de este punto, Motorola y Nokia fueron los fabricantes con más influencia en la evolución de la telefonía móvil durante las décadas venideras.

La tecnología de comunicación inalámbrica de primera generación (1G) apareció en el mercado en los años 80 de la mano de Ericsson con el empleo de canales analógicos y el sistema NMT. Ofrecía, únicamente, servicio de voz, y la banda de frecuencia de trabajo se situaba en torno a los 800-900 MHz.

La segunda generación 2G, llegó en la década de los 90 con la implementación de sistemas como GSM. Se implementó con tecnología digital, siendo capaz de ofrecer al usuario servicios de voz digital y mensajería instantánea SMS. Las bandas de frecuencia se situaban entre los 850 y 1900 MHz.

La necesidad de un mayor número de recursos para dar soporte a nuevos servicios dio lugar a la tercera generación 3G, pasando anteriormente por el 2.5G, ligado a GPRS y EDGE.

Con esta tercera generación, surge la tecnología UMTS, capaz de dar soporte a servicios de voz, acceso a Internet de alta velocidad, llamadas de vídeo, servicios multimedia, donde la máxima velocidad de datos podía alcanzar los 2 Mbps. El espectro de frecuencia de trabajo se situaba desde los 800 MHz a los 2 GHz.

La cuarta generación 4G está basada en el protocolo IP, siendo la norma LTE su referente. El objetivo de dicha generación consiste en proporcionar de alta velocidad de datos, alta calidad, seguridad, capacidad, y, además, ofrecer servicios de bajo coste para el soporte de servicios de voz y datos, multimedia e Internet a través del protocolo IP. En el caso de Europa, las bandas de frecuencias para LTE, son las bandas de 800, 900, 1800 y 2600 MHz. [27] [28]

A día de hoy, la tecnología móvil inalámbrica ha desembocado en la quinta generación 5G, la cual, tiene como filosofía el que “personas y dispositivos estén conectados en cualquier lugar en cualquier momento”. Puede observarse esta evolución de los dispositivos que han dado soporte a cada una de estas generaciones en la imagen que se muestra a continuación (Fig.10).



Fig. 10. Evolución de tecnología móvil 1G – 5G [28]

La aparición de todos estos terminales móviles para la comunicación inalámbrica tiene como consecuencia que el diseño de sus antenas sea todo un desafío, ya que no sólo se necesitan más antenas para dar soporte a un mayor número de bandas de frecuencia, sino que, además, de requerirse antenas multibanda, los dispositivos de mano donde se han de integrar son cada vez más pequeños.

También se ha de tener en cuenta, la óptima caracterización de estas antenas integradas en dispositivos móviles, las cuales, estarán sometidas a entornos donde la eficiencia es el parámetro clave a tener cuenta.

Como se ha mencionado anteriormente, las antenas que incorporen estos dispositivos de mano han de ser antenas pequeñas y ligeras. Debido a presentar un tamaño compacto, las antenas lineales planas como el monopolo, la antena L invertida, y la antena F invertida son las más adecuadas para su implementación en equipos inalámbricos. [29]

3.3.1 Monopolo

Una de las antenas más implementada en sistemas móviles inalámbricos especialmente a bajas frecuencias es la antena monopolo. Presenta una geometría simple en forma de hilo de longitud H , construida por un brazo rectilíneo radiante dispuesto verticalmente sobre un plano de masa. La banda de frecuencia de trabajo se configura en función de la longitud del mismo.

Para su correcto funcionamiento, necesita ser completada por un plano de masa, no basta con sólo el monopolo, produciéndose por Teoría de Imágenes, un efecto espejo creándose un dipolo vertical completo (Fig.11). Se alimenta en la base con alimentación asimétrica, habitualmente con un cable coaxial. [23] [29]



Fig. 11. Antena monopolo [23]

3.3.2 Antena ILA

A pesar del buen funcionamiento de una antena monopolo, hoy en día se buscan diseños más compactos, es por ello que surge la antena L invertida.

Manteniéndose la longitud total del monopolo, el látigo de la antena puede doblarse en forma de L en diversas posiciones. La separación h respecto del plano es el parámetro crítico que determina la impedancia que presentará la antena.

Esta antena funciona como una antena vertical cargada capacitivamente en el extremo de la rama horizontal de longitud L . Cuanto mayor sea la rama vertical de longitud h , la resistencia de radiación será mayor, por lo que la antena tendrá menos pérdidas. [30] [31]

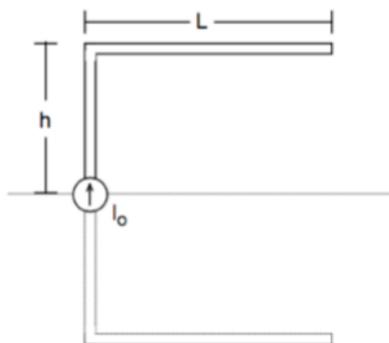


Fig. 12. Antena L invertida [30]

3.3.3 Antena IFA

La antena F invertida se emplea especialmente en aplicaciones como teléfonos móviles y ordenadores portátiles. El monopolo es un tipo de antena lineal con un comportamiento óptimo a la hora de integrarse en sistemas de comunicación, pero se requiere de diseños más compactos ya que la evolución de los dispositivos tiende a que presenten un tamaño cada vez más reducido.

La antena IFA surge de la evolución de la antena ILA, debido a la baja impedancia que presentaba esta última. Añadiéndole un stub vertical a una distancia determinada con respecto a la rama vertical de la antena ILA. Esta rama vertical presenta una longitud h unida a otra rama horizontal de longitud L paralelamente al plano de tierra.

A continuación, se presenta una imagen con la evolución que ha sufrido la antena monopolo hasta variar a la antena F invertida, pasando por el diseño de la antena L invertida. [30] [31]

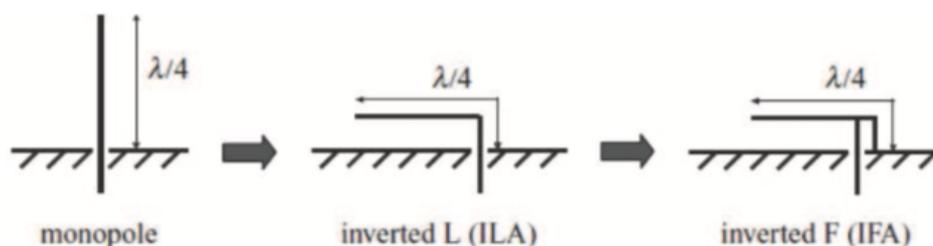


Fig. 13. Evolución antenas lineales compactas [31]

3.3.4 Simulación y comparativa de antenas lineales

Los primeros resultados que se presentan en este proyecto se corresponden con la simulación de un monopolo, seguida de una antena L invertida, y una antena F invertida, ambas derivadas de ésta última.

La antena L invertida surge de doblar la antena monopolo para reducir su altura, y así facilitar su integración en dispositivos cada día más pequeños. La antena F invertida, tiene como punto de partida la antena L invertida, sobre la cual, se incorpora un stub con el objetivo de conseguir una mejor impedancia de entrada.

Las antenas se han simulado para trabajar a la frecuencia de 868 MHz, frecuencia seleccionada por su recurrencia a la hora de implementar servicios de nueva generación como Wi-Fi, Bluetooth o 5G. Esta frecuencia es una de las resonancias del coeficiente de reflexión de la antena monopolo.

En cuanto al tamaño del plano simulado, se han tomado como medidas las pertenecientes al iPhone X, cuyas dimensiones se corresponden con 143.6 mm x 70.9 mm, y 1 mm de grosor del plano, para estudiar así el comportamiento de dichas antenas en un terminal móvil.

3.3.4.1 Antena monopolo frente a plano de masa

Se presenta una antena monopolo con longitud $\lambda/4$ situado sobre el plano finito nombrado anteriormente, la cual trabaja a la frecuencia de 868 MHz, siendo la longitud del monopolo de 86.4 mm. El monopolo se ha modelado con un hilo conductor de 1 mm de radio situado verticalmente sobre el centro del plano (Fig.14).

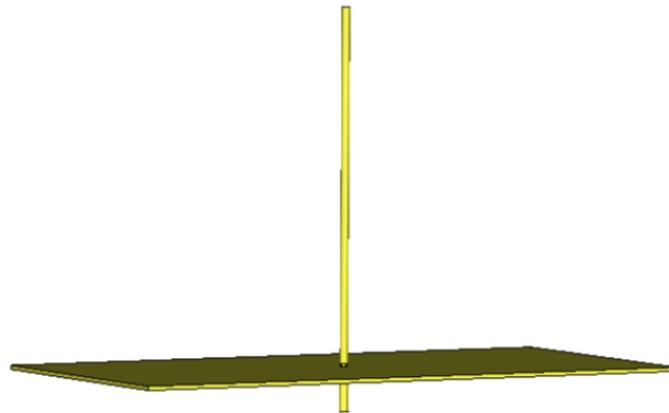


Fig. 14. Monopolo vertical sobre plano de masa

En la gráfica que se muestra a continuación (Fig.15), se puede observar el comportamiento del coeficiente de reflexión de la antena, donde la frecuencia de resonancia se halla en 843.99 MHz.

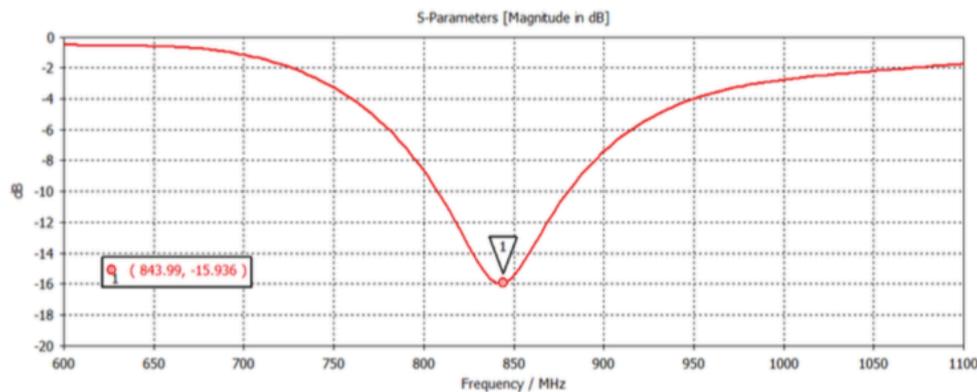


Fig. 15. Coeficiente de reflexión antena monopolo

La impedancia de entrada se muestra en las imágenes que se presentan seguidamente. Los valores obtenidos a la frecuencia de resonancia para la resistencia (Fig.16) y reactancia (Fig.17) de entrada se corresponden con 36.452 Ω y 9.4201 Ω , respectivamente.

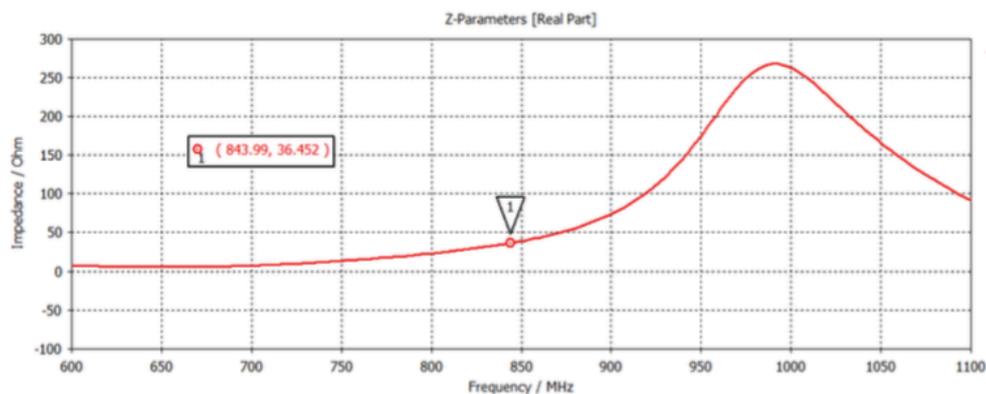


Fig. 16. Resistencia de entrada antena monopolo

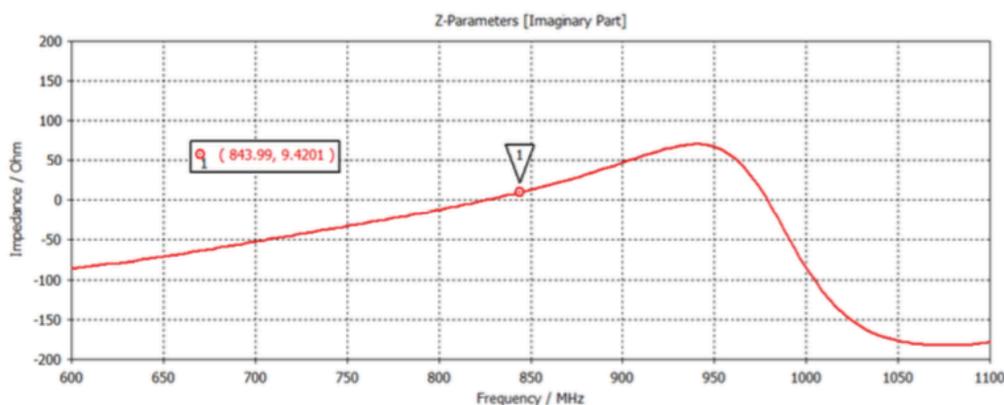


Fig. 17. Reactancia de entrada antena monopolo

Como se ha podido comprobar en la gráfica anterior, el monopolo tendría su resonancia a la frecuencia de 843.99 MHz, es por ello que, para que la resonancia de la antena coincida a 868 MHz, es necesario realizar un pequeño reajuste, y disminuir la longitud total del monopolo a 83.4 mm, obteniéndose así el resultado esperado (Fig.18).

El ancho de banda relativo a -6 dB, obtenido a partir de los resultados de la figura que se presenta a continuación, es del 16.11 %.

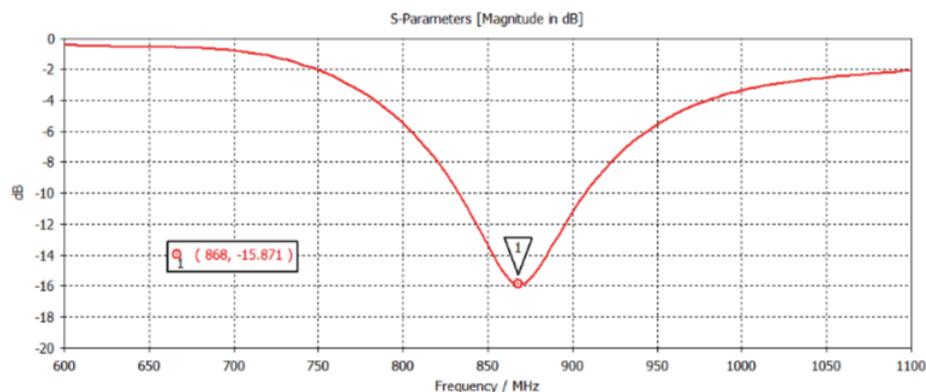


Fig. 18. Coeficiente de reflexión antena monopolo adaptada

En las figuras 19 y 20, se presentan los resultados obtenidos de la impedancia de entrada, tanto

de la parte real como de la parte imaginaria, resistencia y reactancia de entrada.

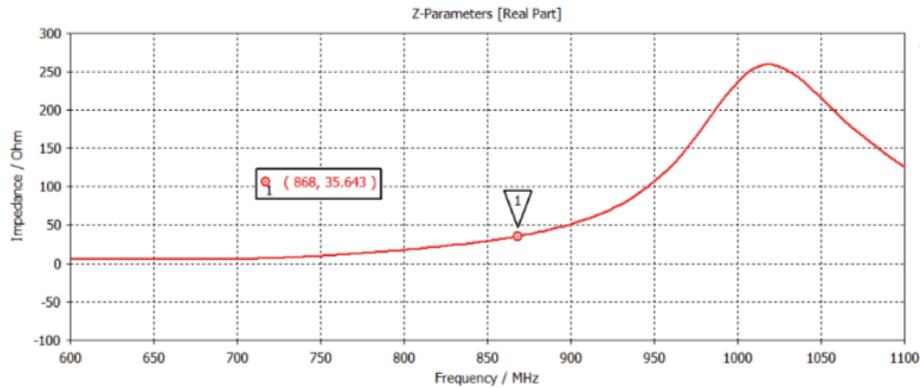


Fig. 19. Resistencia de entrada antena monopolo adaptada

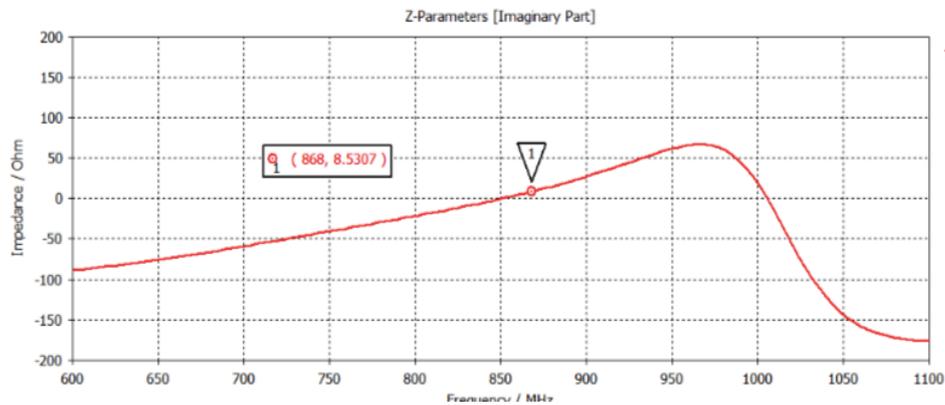


Fig. 20. Reactancia de entrada antena monopolo adaptada

En la imagen que se presenta, a continuación, aparece el diagrama de radiación de la antena correspondiente a la frecuencia de resonancia de 868 MHz. Se corresponde con un diagrama omnidireccional cuya directividad máxima es de 1.68 dBi.

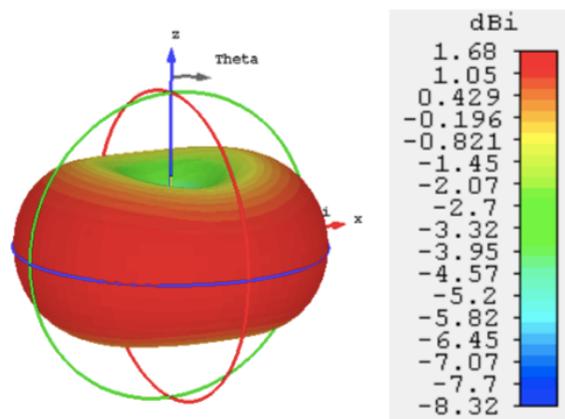


Fig. 21. Diagrama de radiación de antena monopolo frente a plano de masa

3.3.4.2 Antena L invertida frente a plano de masa

Ahora bien, una vez simulada la antena monopolo, se procede a la simulación y obtención de medidas de la antena L invertida y la antena F invertida. Estas antenas se han modelado con un hilo conductor de 1 mm de radio situado en el centro del plano de masa para que su frecuencia de trabajo también se sitúe en torno a 868 MHz.

Como se ha nombrado anteriormente, la antena ILA consiste en un monopolo de longitud $H = \lambda/4$ doblado a una altura h respecto del plano de masa. En primera instancia, se ha simulado escalando los parámetros característicos en función de la longitud de onda, siendo ésta 0.345 m, es por ello por lo que la longitud total de la antena será 0.086 m.

Tomando como referencia un diseño de antena ILA ya expuesto [32] para la frecuencia de 2.45 GHz, escalamos las dimensiones de p y h para que la frecuencia de trabajo en esta ocasión sea de 868 MHz. De esta manera, se obtienen como parámetros estimados p , 64.53 mm, y h , 23.68 mm, siendo la longitud total de la antena 91.21 mm, valor muy cercano a la longitud planteada de manera teórica.

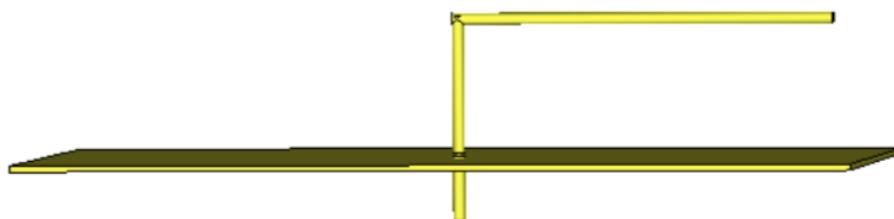


Fig. 22. Antena L invertida frente a plano de masa

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con estos valores interpolados con respecto al otro diseño, coeficiente de reflexión e impedancia de entrada. Además del diagrama de radiación correspondiente para dicha frecuencia de trabajo.

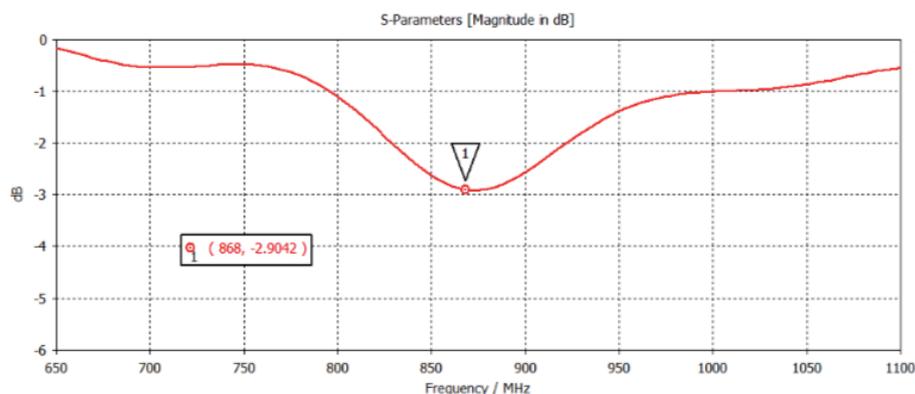


Fig. 23. Coeficiente de reflexión antena L invertida frente a plano de masa

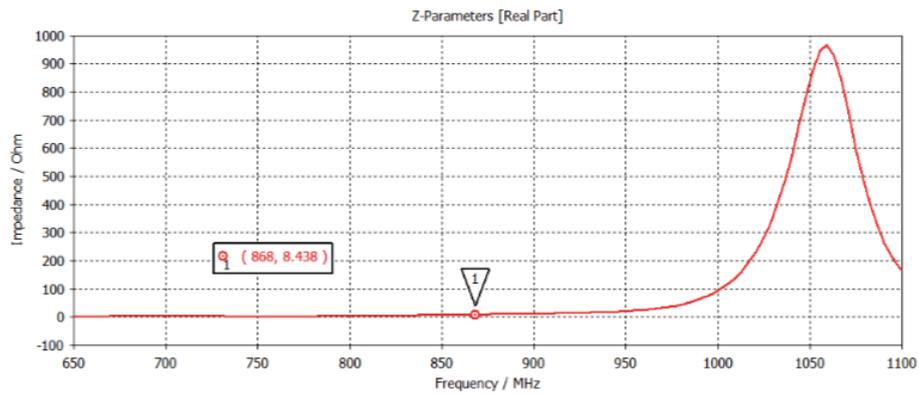


Fig. 24. Resistencia de entrada antena L invertida frente a plano de masa

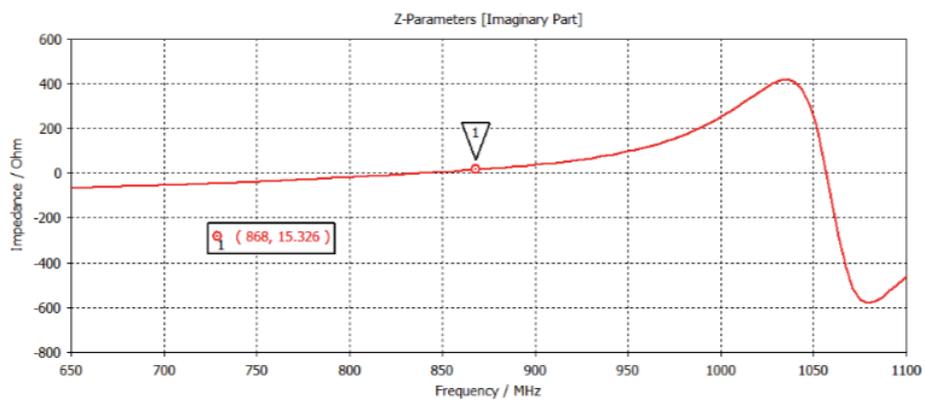


Fig. 25. Reactancia de entrada antena L invertida frente a plano de masa

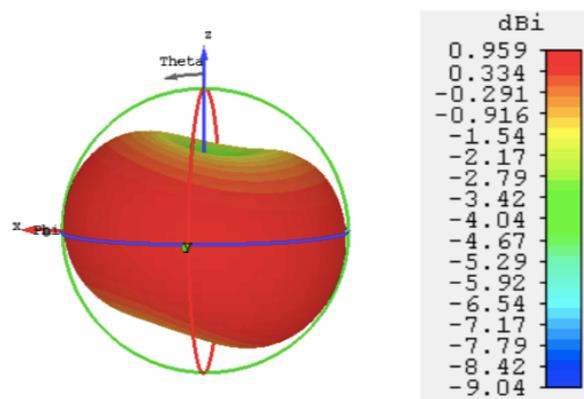


Fig. 26. Diagrama de radiación de antena L invertida frente a plano de masa

3.3.4.3 Antena F invertida frente a plano de masa

Como evolución a la antena L invertida, surge la antena F invertida. Para ello, al igual que en el diseño de la ILA se ha tomado un diseño anterior [32], donde las dimensiones de dicha antena para 2.45 GHz se corresponden con p , 27.2 mm, h , 11 mm, siendo la separación entre stub es de 3.2 mm.

Escalando estas medidas para 868 MHz, se obtiene p , 67.35 mm, h , 23.75 mm, y la separación será de 9.19 mm.

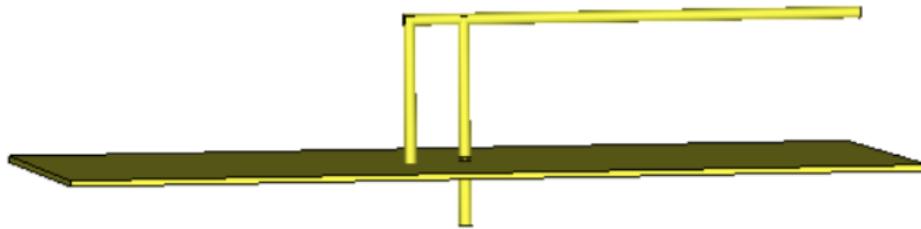


Fig. 27. Antena F invertida frente a plano de masa

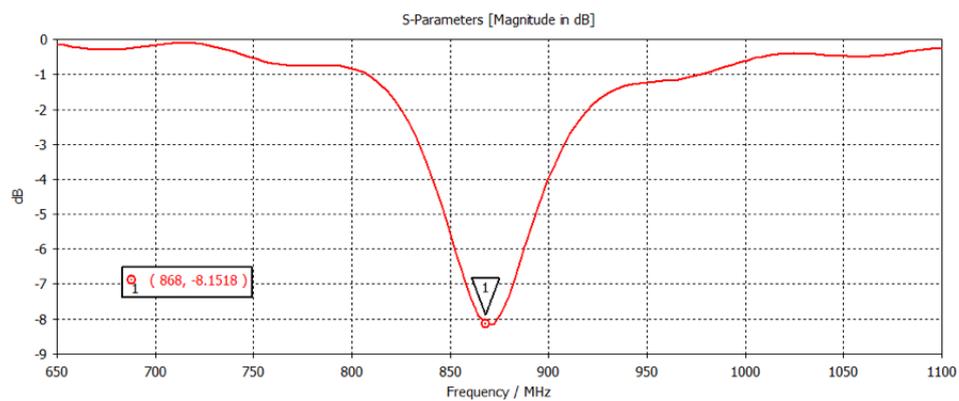


Fig. 28. Coeficiente de reflexión antena F invertida frente a plano de masa

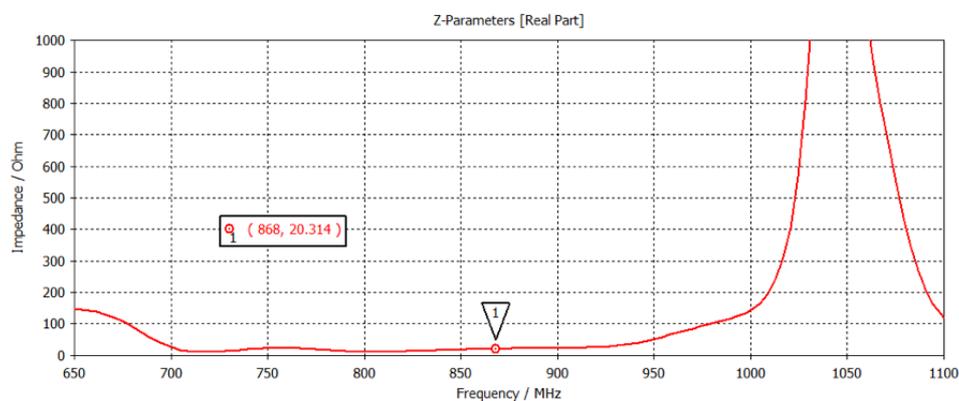


Fig. 29. Resistencia de entrada antena F invertida frente a plano de masa

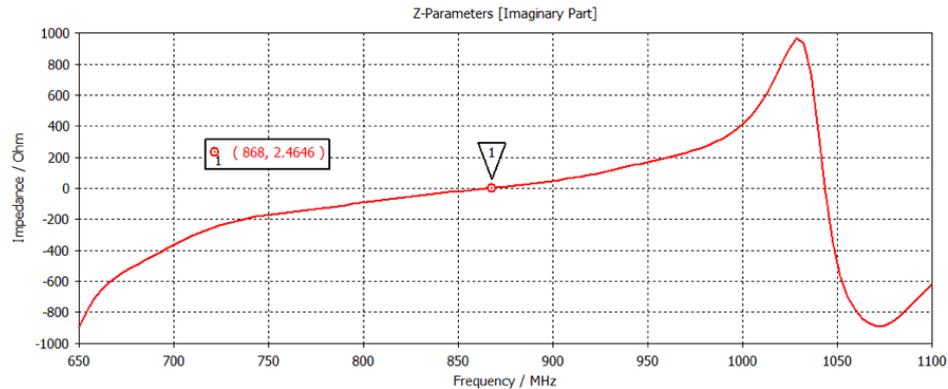


Fig. 30. Reactancia de entrada antena F invertida frente a plano de masa

En este caso, al desarrollar la antena F invertida, la resistencia de entrada ha aumentado con respecto a la antena L invertida. El ancho de banda relativo a -6 dB, obtenido a partir de los resultados de la figura es del 3.98 %.

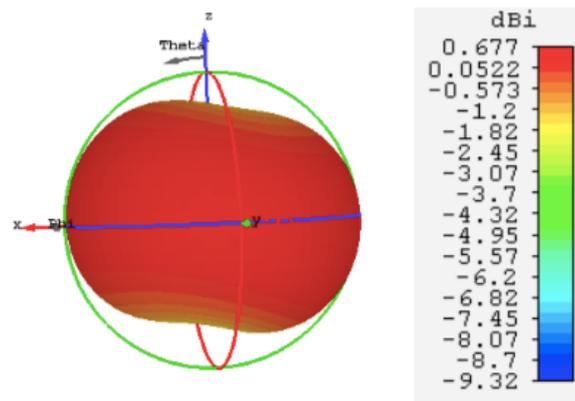


Fig. 31. Diagrama de radiación de antena F invertida frente a plano de masa

Finalmente, se ha realizado una tabla comparativa con los resultados obtenidos de la simulación de la antena monopolo, antena L invertida y antena F invertida para la frecuencia de 868 MHz.

Tipo de antena	Frecuencia máx de trabajo (MHz)	Coefficiente de reflexión (dB)	Impedancia de entrada a la frecuencia máx de trabajo (Ω)	Ancho de banda a -6 dB (%)	Directividad a la frecuencia máx de trabajo (dBi)
Monopolo	868	-15.871	35.64 + j8.53	16.11	1.68
L invertida	868	-2.90	8.44 + j15.33	-	0.96
F invertida	868	-8.152	20.31 + j2.46	3.98	0.68

Tabla 1. Comparativa de antenas lineales

Comparando los resultados recogidos en la tabla anterior, podemos observar como la mejor opción es la antena monopolo. Pero dada la búsqueda por parte de los diseñadores, de antenas más compactas, puede verse como la antena IFA, supera con creces el funcionamiento en



frecuencia de la antena ILA. Coeficiente de reflexión para un funcionamiento óptimo, cuya impedancia de entrada es más alta para la antena IFA que en la antena ILA.

En el caso de la antena IFA, se ha recogido en la tabla una menor directividad que para la antena ILA. Este valor corresponde con uno de los ejes principales, en el que debido a la existencia del plano de masa sucede este efecto. Realmente, si se realizasen otros cortes en el espacio se podría observar como verdaderamente, la ganancia de la antena IFA es mayor que la de la antena ILA.

En cuando a los diagramas de radiación, se ha observado como todos ellos radian en todas las direcciones del plano horizontal, presentando mínimos de radiación en los planos verticales de radiación.

Capítulo 4. Antenas tipo chip

Se dice que una antena es eléctricamente pequeña cuando su tamaño es mucho menor que su longitud de onda a la que opera, pudiendo, además, ser encerrada en una esfera de radio $a = 1/k$ donde $k = 2\pi/\lambda$ representa el número de onda asociado al campo magnético.

Las antenas eléctricamente pequeñas se caracterizan por su resistencia de radiación mucho menor que la reactancia, y por diagramas de radiación independientes al tamaño de la antena. [32]

Su comportamiento está limitado por el criterio más conocido propuesto por Chu y reexaminado por McLean. El tamaño eléctrico de la antena es el parámetro fundamental el cual limita el factor de calidad de una antena eléctricamente pequeña. Este factor de calidad está relacionado con el ancho de banda de la impedancia de la propia antena, el cual podría mejorarse si el uso del volumen de la radiosfera que la rodea es eficiente. [33]

Hoy en día, el mercado de las comunicaciones inalámbricas exige antenas cada vez más compactas con un óptimo rendimiento. Es por ello por lo que, dentro del grupo de antenas eléctricamente pequeñas, nos centraremos en antenas tipo chip cerámico (CCA).

Estas antenas tipo chip cerámico se caracterizan por ser compactas y fáciles de fabricar. Además, las bajas pérdidas dieléctricas y la excelente estabilidad frente a la temperatura hacen que su implementación sea una buena solución para antenas miniaturizadas.

Por el contrario, presenta como inconveniente, un valor alto de constante dieléctrica, lo que supone como consecuencia un ancho de banda estrecho y un valor de eficiencia de radiación bajo. Es por ello por lo que, a la hora de su diseño, se establece cierto compromiso entre el grado de miniaturización, por un lado, y la eficiencia y el ancho de banda de la antena por el otro. [34] [35]

Gracias a su reducido tamaño, se implementan en el interior del dispositivo inalámbrico siendo incorporadas a la placa de circuito impreso (PCB) a través de un proceso de montaje superficial (SMD).

4.1 Antenas tipo chip comerciales

Con el fin de hallar la solución de la antena más diminuta, diversos son los fabricantes que apuestan por antenas miniaturizadas para aplicaciones Wi-Fi, Bluetooth, IoT, Lora, GPS, ZigBee y bandas ISM.

Su pequeño tamaño hace que sean fáciles de integrar en las nuevas PCB desarrolladas para dar funcionalidad a dispositivos inalámbricos como *wearables*, equipos médicos o sensores, entre otros. Son sencillas de integrar en todo tipo de diseño de placas de circuito impreso, y además, en diferentes tamaños de plano de tierra, como se podrá comprobar en apartados posteriores.

Johanson Technology es uno de los fabricantes que ofrece mayor variedad de antenas tipo chip cerámicas al mercado de las comunicaciones. Sus antenas miniaturizadas están fabricadas con materiales cerámicos tratados a baja temperatura, teniendo la capacidad de integrar constantes dieléctricas altas y bajas dentro de sus diseños. Ofrecen diseños de implementados en

tecnología SMD que aportan gran flexibilidad y fiabilidad, además de mantener el buen rendimiento de dichas antenas. Sus dimensiones típicas se sitúan en torno a los 7 mm de longitud, 2 mm de anchura y 0.8 mm de grosor. Sus aplicaciones, dispositivos *wearables*, LTE, IoT, Lora, GPS, ZigBee, y Wi-Fi, entre otras. [36]



Fig. 32. Antena cerámica tipo chip de Johanson Technology

Otro de los mayores fabricantes de componentes electrónicos, incluido este tipo de antenas es la compañía alemana *Würth Elektronik*. Sus productos (Fig.33.) se definen como antenas tipo chip multicapa desarrollados con tecnología SMD. Presentan como frecuencia mínima de trabajo 423 MHz hasta 5.875 GHz como máxima.

Son componentes ligeros de bajo perfil con alta ganancia. Son omnidireccionales con capacidad de potencia de 5W como máximo. La temperatura de funcionamiento que soportan presenta como límites desde -40 °C a +85 °C. Como dimensiones típicas presentan en torno a los 11 mm de longitud, 5.1 mm de anchura, y en torno a 1.5 mm de grosor. Aplicaciones GSM, Bluetooth y de radio, principalmente. [37]



Fig. 33. Antena cerámica tipo chip de Würth Elektronik

Como últimos fabricantes a destacar, *Taiyo Yuden* y *Antenova*. *Taiyo Yuden*, compañía japonesa de materiales y productos electrónicos, la cual fabrica antenas cerámicas tipo chip para aplicaciones GPS, WLAN, Bluetooth, ZigBee, WiMAX y UWB.

Por último, la compañía *Antenova*, ha anunciado la disponibilidad entre sus productos de una nueva antena miniatura omnidireccional cerámica que trabaja a la frecuencia de 2.45 GHz llamada *Weii*. Sus aplicaciones son Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee y bandas ISM. Sus dimensiones se sitúan en torno a 1 mm de longitud, 0.5 mm de anchura y 0.5 mm de grosor, dando como prestación una eficiencia en torno al 70%. En esta antena se ha conseguido reducir al máximo el volumen de la misma sin sacrificar su rendimiento. Es una buena solución para la implementación de pequeños dispositivos electrónicos para la comunicación IoT y *Machine to Machine* (M2M). [38]

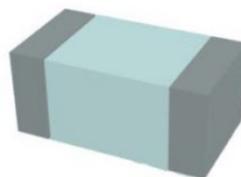


Fig. 34. Antena cerámica tipo chip Weii de Antenova

4.2 Caracterización de antena cerámica tipo chip. Comparación de resultados con antena comercial.

En este capítulo se ha realizado la caracterización y simulación de una antena cerámica tipo chip, sobre la que posteriormente, se realizará una comparación de resultados con una de las antenas implementadas por uno de los fabricantes mencionados anteriormente.

El modelo de antena cerámica tipo chip escogido ha sido 0868AT43A0020, una antena miniaturizada la cual ha sido fabricada por *Johanson Technology*. Este componente de radiofrecuencia presenta su banda de funcionamiento en torno a la frecuencia central de 868 MHz. [40]

A continuación, se detallarán los parámetros característicos correspondientes a la antena que se ha simulado, además de una comparativa con los parámetros de dicha antena *Johanson*, obtenidos, o bien de la simulación de los parámetros S, ya que éstos mismos son aportados por el fabricante, o bien, los parámetros obtenidos a partir de su datasheet.

Se ha simulado mediante el panel de esquemático de CST, el archivo con formato s1p, en el cual se recoge el parámetro S_{11} en función, de la frecuencia, que el fabricante ha aportado de la medida real de la antena cerámica. Éste ha sido el resultado obtenido de la misma.

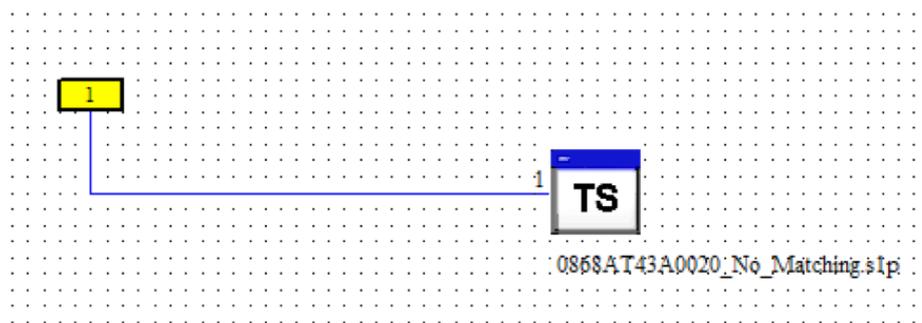


Fig. 35. Panel de esquemático simulación antena cerámica 0868AT43A0020

Se aprecia como la frecuencia de resonancia central de trabajo de la antena se sitúa en torno a los 1000 MHz, esto se debe a que para conseguir la adaptación de la misma es necesario la implementación de una red de adaptación.

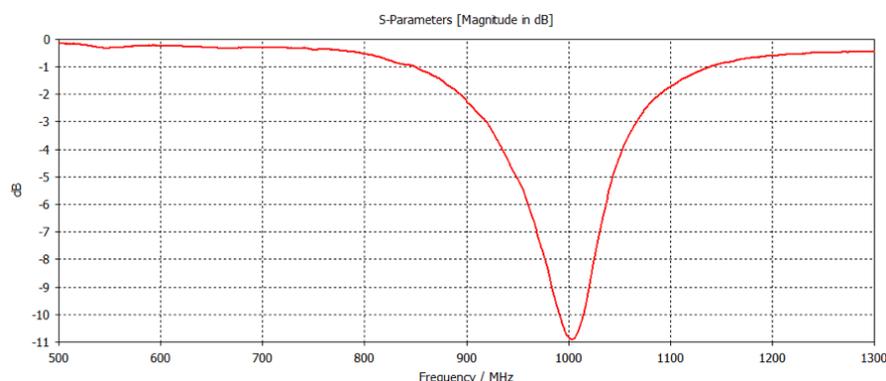


Fig. 36. Coeficiente de reflexión antena cerámica 0868AT43A0020

Se ha caracterizado dicha antena cerámica miniaturizada tipo chip con la tecnología *Meander-Line Antenna* (MLA). Este método consiste en doblar un conductor hacia adelante y hacia atrás para así, reducir el tamaño de la antena. El área de la antena disminuye considerablemente, por lo que su implantación en un dispositivo electrónico portátil es mucho más sencilla, por el

contrario, la eficiencia, la radiación y el ancho de banda disminuyen, provocando que su rendimiento sea menor. [39]

La influencia en el comportamiento de la antena de la parte serpenteante sobre el resto de la misma es similar al de una carga. Las secciones de la línea serpenteante se modelan como líneas de transmisión acabadas en cortocircuitos. La sección de la línea del meandro se modela como un inductor equivalente.

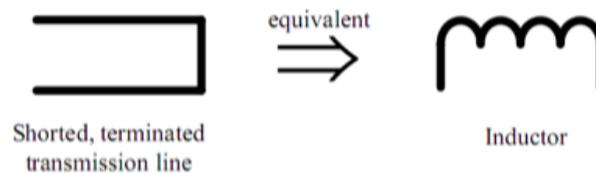


Fig. 37. Equivalencia en el modelado de Meander-Line Antenna [39]

En la región de campo lejano, esta técnica da lugar a la cancelación de campos magnéticos, por lo que las líneas de transmisión serpenteante no radian. Los campos radiarán desde los pares verticales de la MLA, por lo que las corrientes son realmente intensas en esas zonas. [33] [39]

Según indica el fabricante, para poder alcanzar las medidas aportadas por el mismo, la disposición de la antena *Johanson* sobre la placa de circuito impreso debería de ser la que se presenta a continuación (Fig.38.).

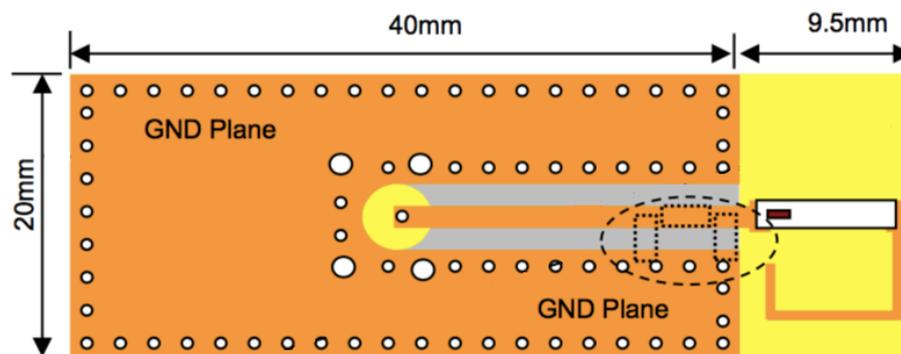


Fig. 38. Disposición sobre el plano de antena Johanson [40]

Se ha tomado a la hora de caracterizar dicha antena, una placa con las mismas dimensiones que las indicadas anteriormente, donde la antena está situada sobre un plano dieléctrico del material FR4, con permitividad relativa 4.7.

El mecanismo de alimentación implementado para alimentar la antena se trata del método de alimentación directa o *edge-fed*, donde la antena es alimentada con una línea microstrip construida en la misma placa del circuito impreso que el resto del plano conductor. Es por ello, que se han establecido como grosor del plano dieléctrico 0.9 mm, y el ancho de la línea microstrip conductora de cobre 1.6 mm.

Como se ha nombrado anteriormente, se ha modelado la antena como una MLA. El hilo conductor serpenteante presenta un grosor de 0.14 mm. Cada una de las vueltas del hilo se espacian 0.28 mm, siendo 14 el número total de vueltas que se han formado con el elemento radiante. Dicho elemento presenta como dimensiones finales, 7.56 mm de longitud, 1.86 mm de anchura, y 0.8 mm de grosor.

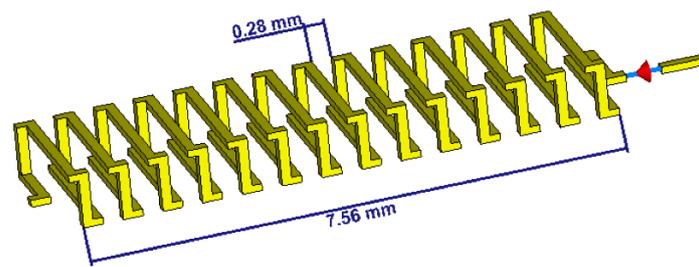


Fig. 39. Elemento radiante implementado con tecnología MLA

El elemento radiante (Fig.40.) se ha integrado dentro de un bloque de cerámica con permitividad dieléctrica igual a 7, siendo las dimensiones del mismo 8 mm x 2.16 mm x 0.9 mm, comparables con la de la antena *Johanson*, cuya longitud es de 7 ± 0.2 mm, su ancho es de 2 ± 0.2 mm, y su grosor de 0.8 ± 0.1 mm, aproximadamente, según se recoge en su datasheet.

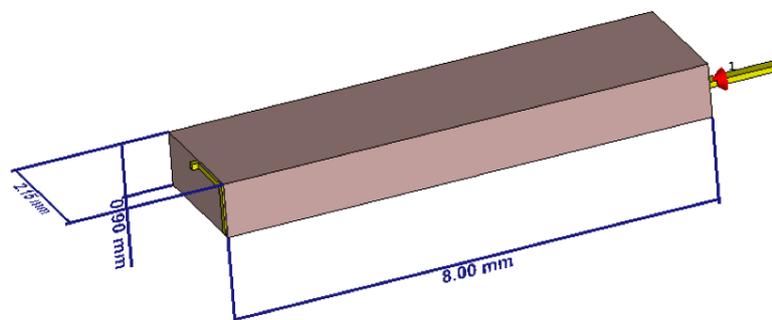


Fig. 40. Elemento radiante integrado en bloque cerámico

Ésta es la vista del plano con la antena caracterizada orientada sobre el plano dieléctrico y conectada a la placa de circuito impreso y alimentada mediante una tira microstrip.

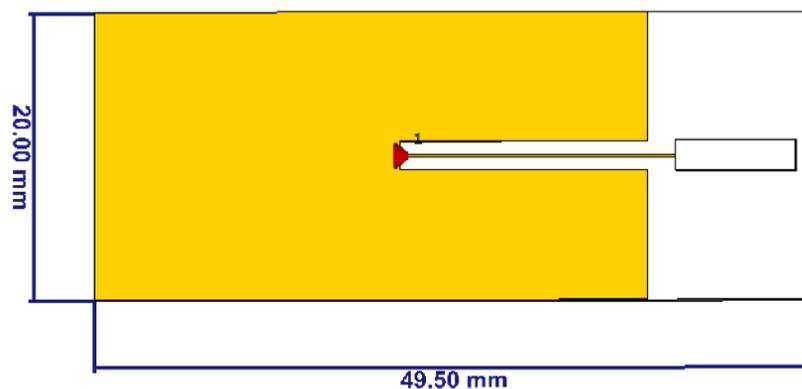


Fig. 41. Disposición sobre el plano de antena cerámica caracterizada

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con dicha antena respecto al coeficiente de reflexión, y la eficiencia de radiación, y radiación total de la misma.

Se puede observar como el resultado correspondiente a la eficiencia total no es tan optimista como el que nos aporta el datasheet de la antena comercial. Es por ello, por lo que será

necesaria la incorporación al sistema de una red de adaptación, para conseguir que la adaptación sea más óptima para un correcto funcionamiento, y además conseguir así re-sintonizar la antena para que la frecuencia de resonancia coincida con la frecuencia máxima de trabajo.

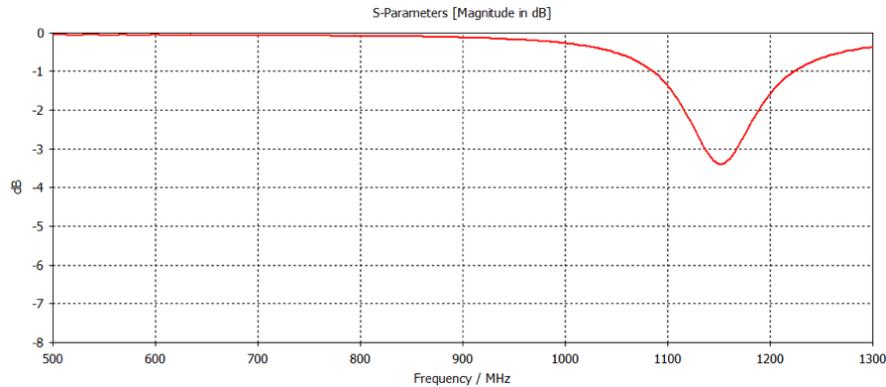


Fig. 42. Coeficiente de reflexión antena cerámica caracterizada

La eficiencia de la antena comercial según sus especificaciones se sitúa en torno a -4 dB. En nuestro caso, los valores de eficiencia para la frecuencia de resonancia, en torno a 1150 MHz, que no para la frecuencia máxima de trabajo de 868 MHz, se sitúa en -2.83 dB para el caso de la eficiencia de radiación, y -6.45 dB para la eficiencia total, aproximadamente.

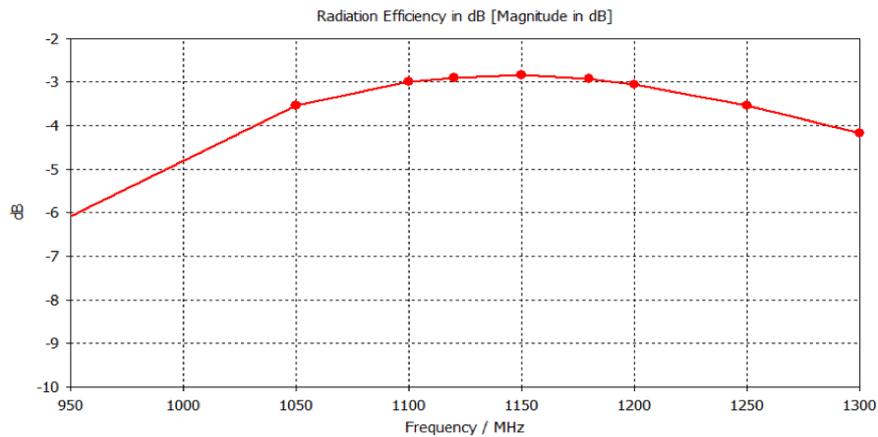


Fig. 43. Eficiencia de radiación antena cerámica caracterizada

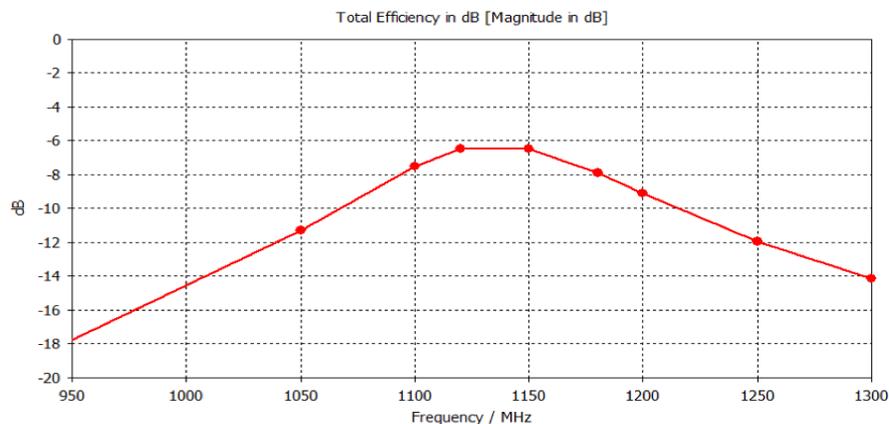


Fig. 44. Eficiencia total antena cerámica caracterizada

Gracias a la incorporación de la red de adaptación mencionada anteriormente, la resonancia baja en frecuencia alcanzando óptimos resultados en la banda de trabajo de interés.

Esta red de adaptación, para el caso de la antena comercial, el fabricante nos indica que se trata de una red en π compuesta por condensador – bobina – condensador, con unos valores asignados de capacitancia e inductancia concretos.

Además, a la antena cerámica se le ha añadido un brazo extensor de un material conductor, en este caso cobre, con el que es posible variar la resonancia en frecuencia, y así, al variar la longitud del mismo, pueda ser útil para trabajar en varias bandas de frecuencia, pero no siendo dual band.

Con esta red, los resultados del coeficiente de reflexión que se obtienen se muestran en la Fig.46.

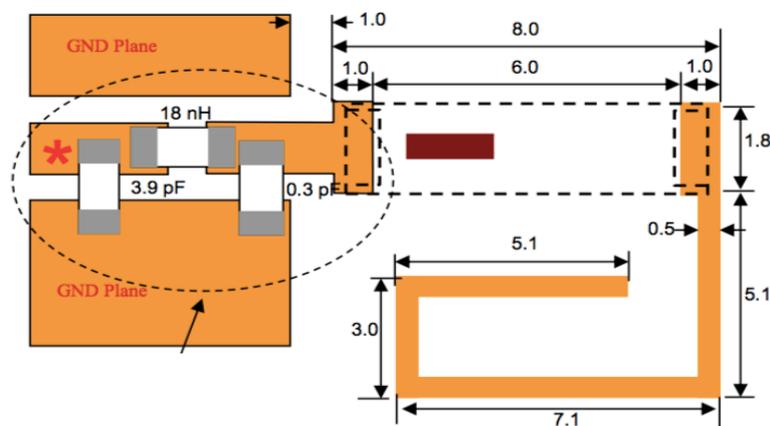


Fig. 45. Red de adaptación de antena Johanson [40]

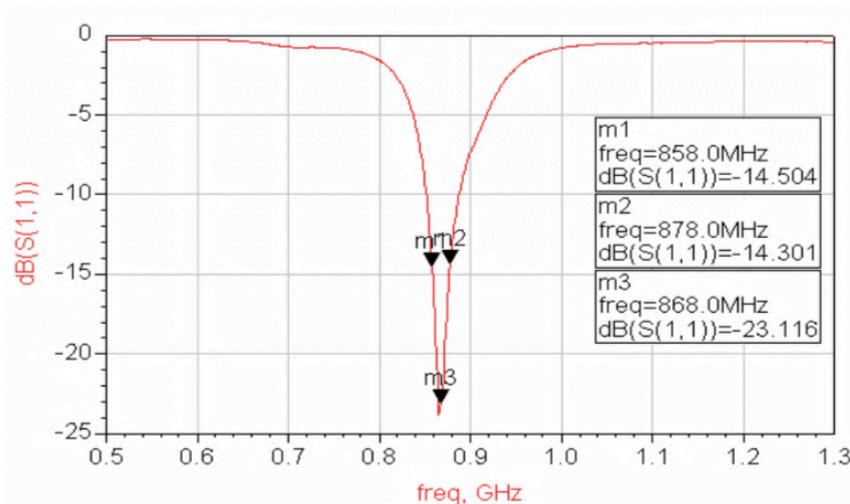


Fig. 46. Coeficiente de reflexión antena Johanson [40]

En el caso de la antena que se ha caracterizado, la red de adaptación en π se compone de un primer condensador de 1.45 pF, una bobina de 0.2 nH y otro condensador de 2 pF. Éste ha sido el resultado de la placa de circuito impreso con la incorporación de los nuevos componentes

concentrados.

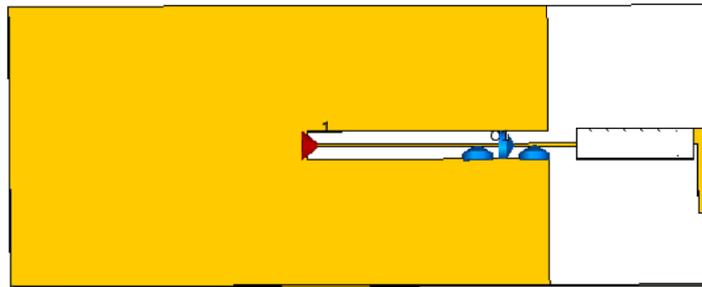


Fig. 47. Coeficiente de reflexión antenna cerámica caracterizada con red de adaptación en pi

Se ha conseguido, de esta manera, que la resonancia se sitúe en torno a la frecuencia de trabajo escogida, y que el coeficiente de reflexión alcance un valor de -24.42 dB, siendo el ancho de banda relativo a -6 dB es del 1.6 %, 14 MHz aproximadamente.

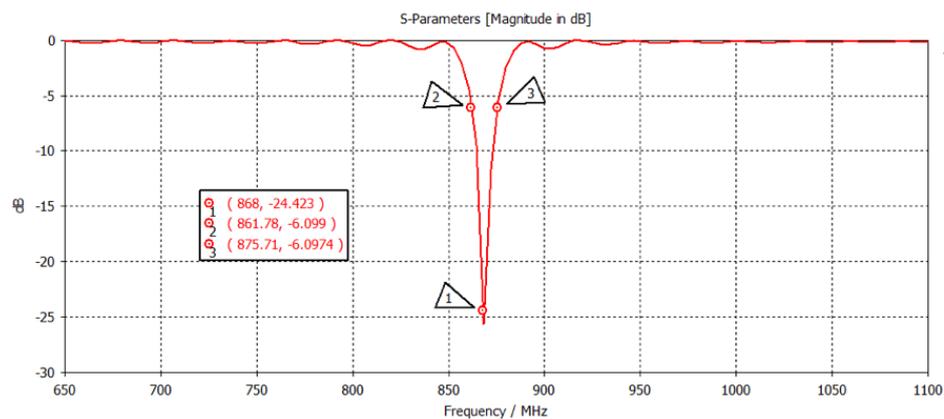


Fig. 48. Coeficiente de reflexión antenna cerámica caracterizada con red de adaptación en pi

Los valores de resistencia y reactancia de la impedancia de entrada de la antenna cerámica tipo chip caracterizada se sitúan en torno a 45 Ω y -4.82 Ω , por lo que se consigue una adaptación óptima a la banda de trabajo deseada.

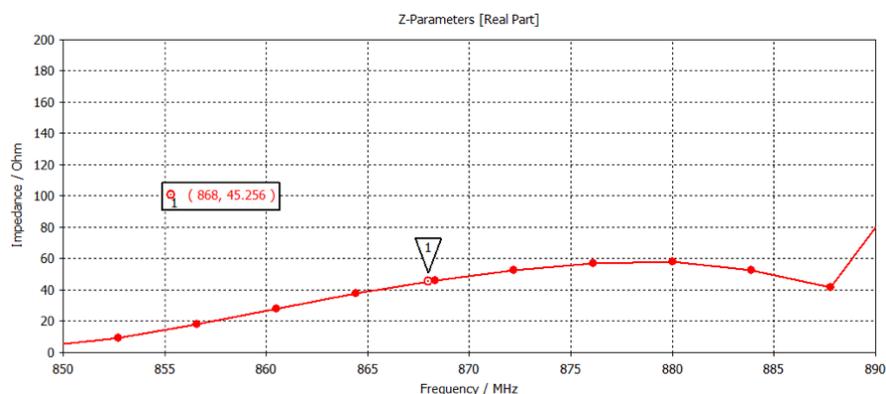


Fig. 49. Resistencia de entrada antenna cerámica caracterizada con red de adaptación en pi

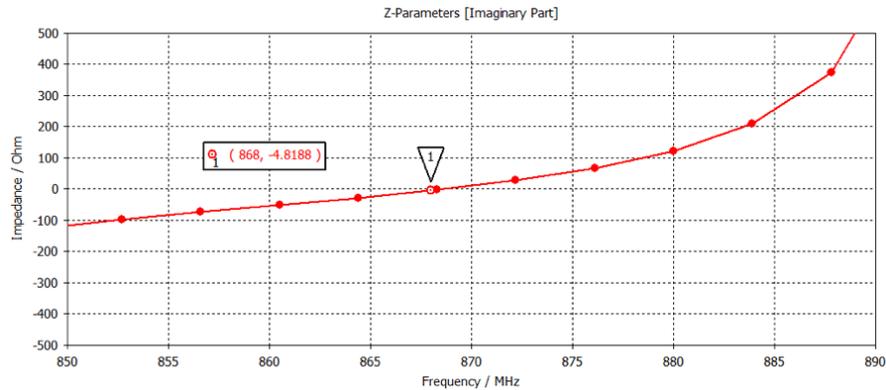


Fig. 50. Reactancia de entrada antenna cerámica caracterizada con red de adaptación en pi

La eficiencia de radiación, como se observa en la imagen que se presenta a continuación, no es óptima para el rango de frecuencias establecido, situándose por debajo de -5 dB en todo el margen establecido.

La eficiencia total de la antenna tampoco es óptima, por lo que sería necesario aplicar otras técnicas de diseño de antenas, además, de las ya implementadas.

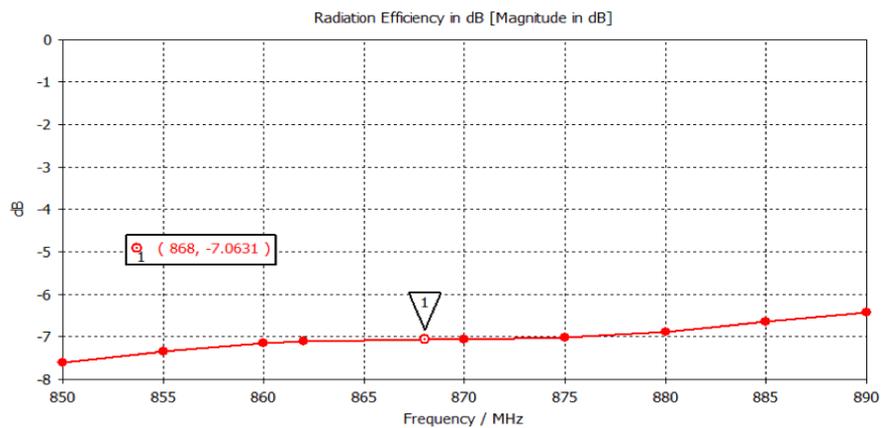


Fig. 51. Eficiencia de radiación antenna cerámica caracterizada con red de adaptación en pi

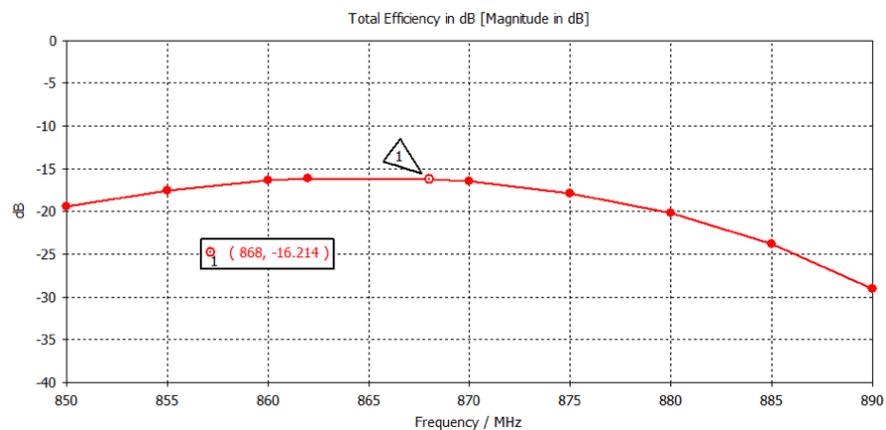


Fig. 52. Eficiencia total antenna cerámica caracterizada con red de adaptación en pi



Como conclusión a este diseño de la antena cerámica caracterizada, destacar cómo con la incorporación de técnicas de fabricación tales como el *meandering*, y la inclusión de una red de adaptación en pi, han dado lugar a conseguir valores del coeficiente de reflexión y de la impedancia de entrada para la frecuencia de trabajo escogida, a la altura de una antena cerámica tipo chip comercial. Aun así, para el caso de mejora de la eficiencia de radiación y la eficiencia total, sería necesario aplicar otras técnicas de diseño de antenas adicionales.

Capítulo 5. Antenas lineales impresas. Diseño y simulación

Tal y como se ha visto en capítulos anteriores, la antena F invertida o antena IFA, tiene como precursora la antena monopolo. [33] Con el fin de obtener antenas cada vez más compactas, se tiende a aplicar técnicas de reducción de tamaño como el pliegue de las mismas, lo que conlleva a la disminución en su rendimiento, reduciendo el ancho de banda, la ganancia y la eficiencia.

Los diseños que se muestran a continuación están basados en las antenas lineales monobanda impresas, las cuales son incorporadas en dispositivos móviles, integradas en espacios de reducido tamaño con geometrías arbitrarias, lo que supone todo un reto.

A continuación, se presentan los diseños de la antena monopolo, la antena L invertida y la antena F invertida, situadas sobre un sustrato de iguales características para todas ellas, donde han sido alimentadas por una pista coplanar microstrip (CPW).

5.1 Parámetros de diseño. Sustrato y guía de onda coplanar (CPW)

Para los diseños que se presentan seguidamente, se le ha prestado especial atención a parámetros de diseño como la geometría del plano, el tipo de sustrato, y, por último, a la implementación de la línea coplanar microstrip con la que alimentar la antena a diseñar.

El sustrato sobre el que serán implementados todos los diseños, se trata de fibra de vidrio (FR4), comúnmente conocido como baquelita, cuya permitividad relativa, en nuestro caso, es de 4.7.

Para el diseño de la pista de guía de onda coplanar microstrip, se han tenido en cuenta las características eléctricas de dicho sustrato, además, de las correspondientes al cobre, material con el que se implementará dicha tira microstrip, incluido el plano unido a la misma.

La guía de onda coplanar es una línea de transmisión plana, la cual consiste en una tira conductora metálica en medio de dos planos de tierra ubicados a ambos lados de la misma. La impedancia característica de una CPW, depende del comportamiento electromagnético de dicha tira, y, por lo tanto, de la anchura de la misma, y, de la separación entre ésta y los planos laterales, del grosor del sustrato y de las metalizaciones, además, de la tangente de pérdidas del dieléctrico y de la conductividad de la metalización.

La principal ventaja de una CPW es que, al presentar todas las líneas sobre un mismo plano, se evita la existencia de perforaciones en el sustrato para la realización de conexiones en paralelo, lo que conlleva a la simplicidad del diseño y a la reducción de efectos parásitos que introducen estas vías. Además, debida a la existencia de estos planos metálicos colindantes se reduce el acoplo que pudiese existir entre la tira conductora principal y otras líneas adyacentes.

También existen otros diseños de CPW, donde se incluye un plano de masa en la parte inferior del sustrato. En este caso, se conocen como GCPW. En estos diseños, la separación entre la línea principal conductora y los planos colindantes sería de mayor escala que el grosor del sustrato, presentando un comportamiento similar al de una línea microstrip, pero con menores pérdidas óhmicas que ésta última.

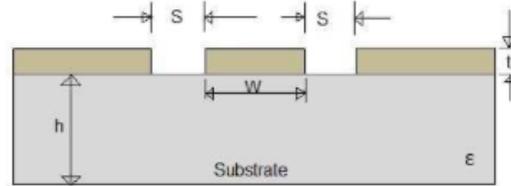


Fig. 53. Coplanar Waveguide (CPW)

Se ha fijado como objetivo que la impedancia de la línea sea de aproximadamente 50Ω , obteniéndose con un ancho de la tira de 1 mm, una separación a ambos lados de la misma con respecto del plano metálico de 0.14 mm, y un grosor del sustrato de 2 mm.

5.2 Antena monopolo impresa

En este apartado, se muestran las simulaciones obtenidas de un monopolo impreso a la frecuencia de 868 MHz, donde se podrá observar la variación del comportamiento del mismo a la hora de ser implementado bajo diferentes condiciones de diseño.

El primer diseño se ha realizado sobre un plano metálico con topología rectangular cuyas dimensiones totales son de 120 mm x 120 mm, siendo el plano dieléctrico de estas medidas, y sobre él, el plano conductor orillado a su izquierda de 120 mm x 40 mm.

Se presenta una antena monopolo impresa con longitud $\lambda/4$, por lo que al ser la frecuencia central de trabajo 868 MHz, y, por tanto, la longitud de onda de 345,62 mm, su longitud se debería de corresponder con 86,4 mm.

Finalmente, tras optimizar dicha antena para obtener así las medidas en la banda de frecuencia deseada, la antena monopolo impresa tiene como longitud 66.25 mm y un grosor de 1 mm. Se detallarán, a continuación, los parámetros más representativos que corresponden con el comportamiento de la misma, y así, poder caracterizarla.

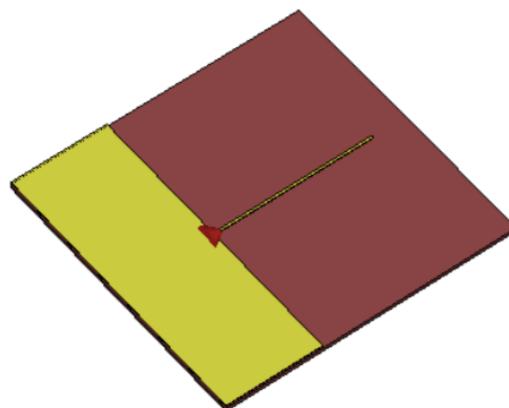


Fig. 54. Antena monopolo impresa

La respuesta en impedancia, tanto resistiva como inductiva, es un parámetro relevante a la hora de caracterizar una antena, y con ella, poder verificar si su comportamiento es estable para un

rango extenso de frecuencias.

Una antena se diseña, para que en la banda central del rango de frecuencias en el que se quiere emplear, tenga un comportamiento resonante. Se puede observar la respuesta en impedancia del elemento en las siguientes imágenes Fig. 43 y Fig. 44.

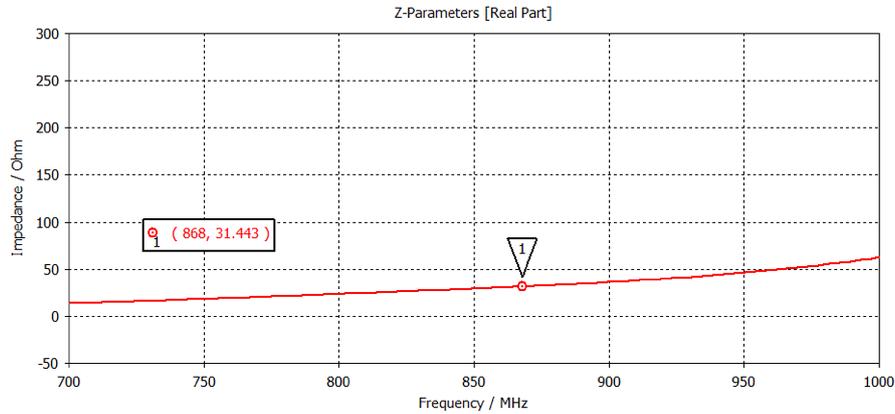


Fig. 55. Resistencia de entrada antena monopolo impresa

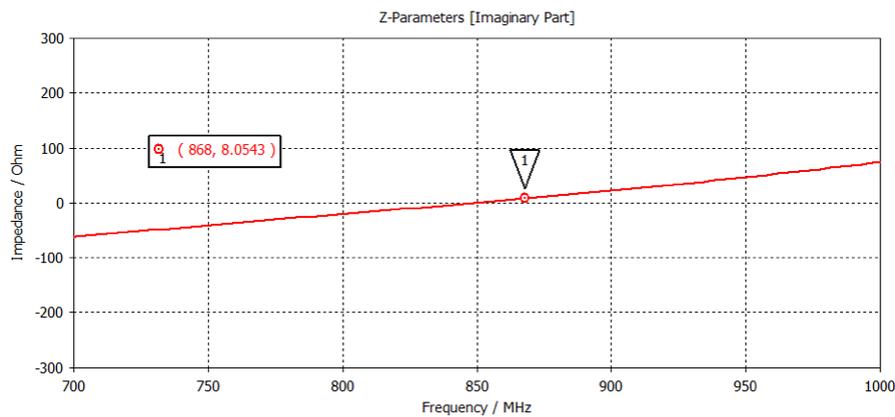


Fig. 56. Reactancia de entrada antena monopolo impresa

En cuanto a lo que se refiere a la curva de respuesta del parámetro S_{11} , se toma como impedancia de referencia 50 W.

La estabilidad de la respuesta en impedancia a lo largo del margen de frecuencias de interés tiene como consecuencia un valor óptimo en cuanto a las pérdidas de retorno a lo largo del mismo.

Se toman como valores óptimos del parámetro S_{11} para antenas cuya aplicación se establece en comunicaciones móviles, $|S_{11}| < -6$ dB.

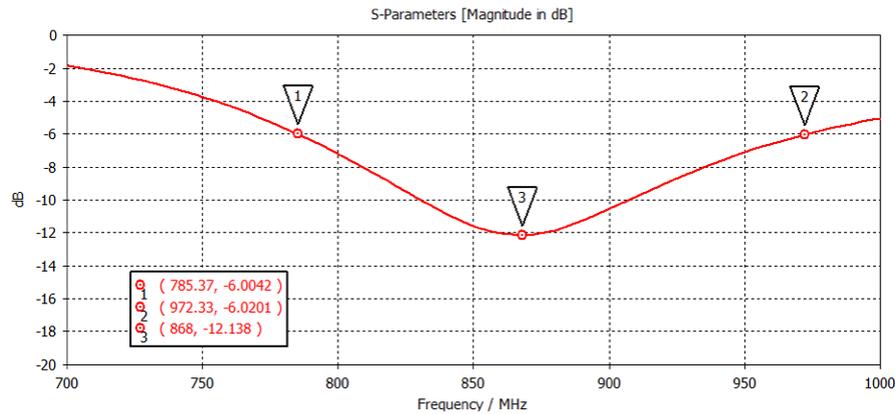


Fig. 57. Parámetro S_{11} antena monopolo impresa

Teniendo en cuenta esta zona donde el coeficiente de reflexión es óptimo para el correcto funcionamiento de la antena, se puede calcular el ancho de banda efectivo de la misma (V.1).

$$BW(\%) = \frac{(972.33 \cdot 10^6 - 785.37 \cdot 10^6)}{868 \cdot 10^6} \cdot 100 \approx 21.55\% \quad (V.1)$$

Como se ha mencionado anteriormente, la estabilidad de la respuesta en impedancia es fundamental, para obtener un amplio ancho de banda, en este caso, de 187 MHz, aproximadamente.

Otro parámetro a tener muy en cuenta en el diseño de la antena monopolo impresa es su eficiencia de radiación y su eficiencia total. Estas eficiencias dependerán del tamaño del plano de masa de la antena y de la óptima adaptación del coeficiente de reflexión en ese margen de frecuencias definido anteriormente.

Ambas eficiencias dan lugar a un correcto funcionamiento en antenas destinadas a comunicaciones móviles, cuando su valor se sitúa por encima de -5 dB. Como puede observarse a continuación, la antena monopolo simulada cumple con dicha premisa en ambos casos.

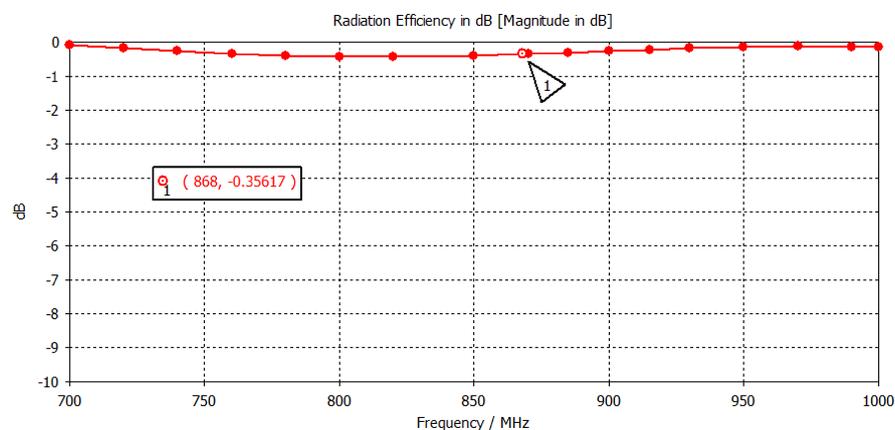


Fig. 58. Eficiencia de radiación antena monopolo impresa

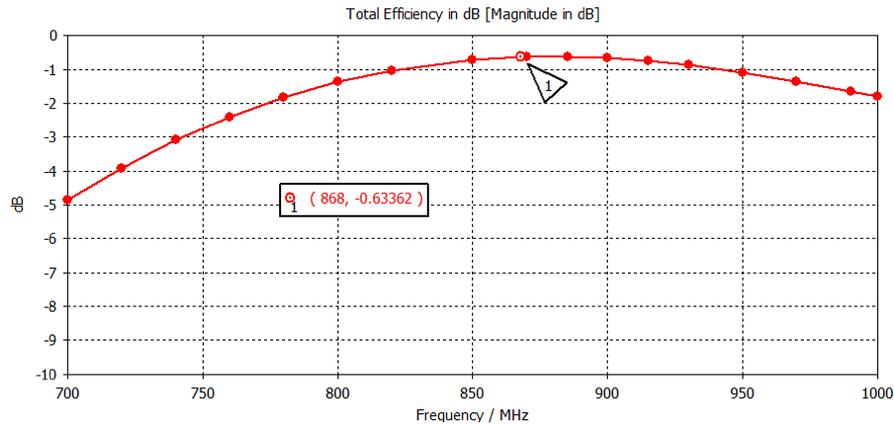


Fig. 59. Eficiencia total antenna monopolo impresa

Las corrientes para 868 MHz parten del punto de alimentación recorriendo la antenna monopolo, además del resto del plano metálico avanzando hacia los extremos cada vez con menor intensidad, como puede observarse en la Fig. 48.

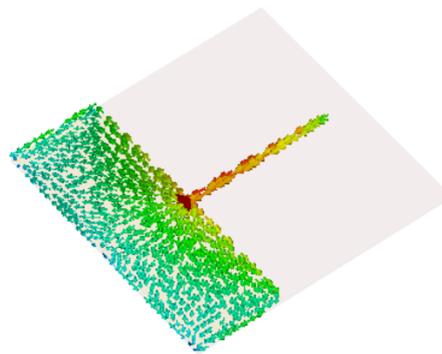


Fig. 60. Distribución de corrientes antenna monopolo impresa

En las siguientes imágenes, se mostrarán los cortes de los diagramas de radiación en los planos YZ y XY de la antenna monopolo impresa (Fig.49.). El corte en el plano XZ es idéntico al correspondiente con el plano XY. El diagrama de radiación muestra como la antenna monopolo impresa radia por debajo del plano de masa y del sustrato. Además de ello, se aprecia como en el plano vertical YZ, el monopolo impreso presenta un diagrama de radiación constante para todas las direcciones.

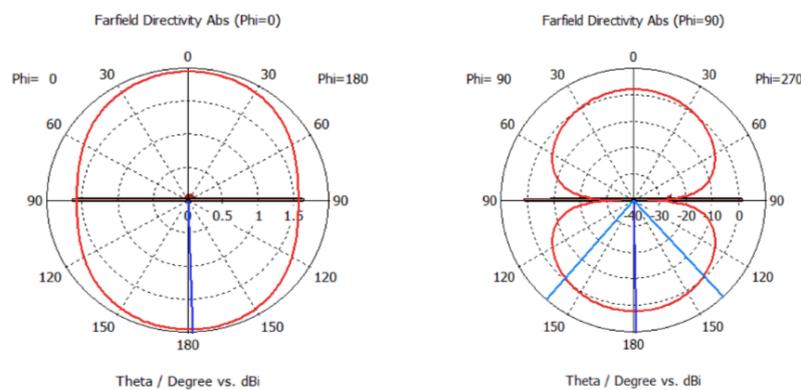


Fig. 61. Cortes en el plano $\varphi = 0^\circ$ y $\varphi = 90^\circ$

De los cortes en el diagrama de radiación, se pueden obtener la dirección de mayor radiación de la antena, lo que se conoce como lóbulo principal, además, de las otras direcciones de alta radiación, lóbulos secundarios, y las direcciones en las que la radiación es nula, llamadas *nulls*.

Con este diseño de la antena monopolo impreso se alcanza un valor de directividad máxima de 1.95 dBi (Fig.49 y Fig.50), y el ancho de haz del haz principal de 84°. Además, de estos cortes del diagrama de radiación se extrae como valor de eficiencia de radiación -0.3562 dB, y de eficiencia total -0.6336 dB para la frecuencia central de trabajo 868 MHz. A continuación, se presenta, también, el diagrama de radiación 3D.

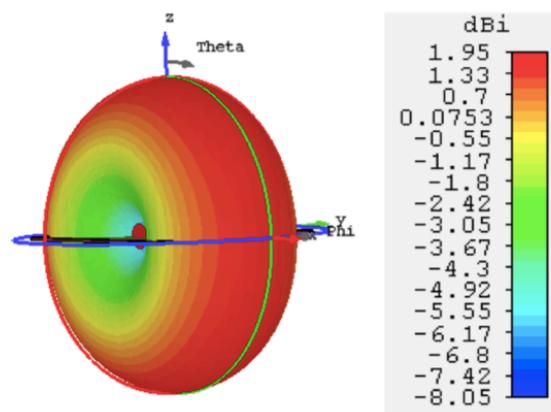


Fig. 62. Diagrama de radiación de antena monopolo impresa

Como se han podido comprobar en este apartado, éstos son los resultados más relevantes la antena impresa monopolo que ha sido diseñada para la banda de trabajo con frecuencia central 868 MHz.

5.3 Antena L invertida impresa

En este apartado se presenta el diseño de una antena L invertida impresa, diseñada sobre el mismo sustrato, con idénticas dimensiones y características, que en la antena monopolo impresa anterior. La frecuencia de trabajo también será 868 MHz. La pista de guía de onda coplanar para la alimentación de la antena también se ha caracterizado con los mismos parámetros que en el diseño anterior. La antena L invertida impresa diseñada presenta como dimensiones de sus brazos, 12.65 mm es la longitud del brazo corto, y 54 mm, la del brazo más largo.

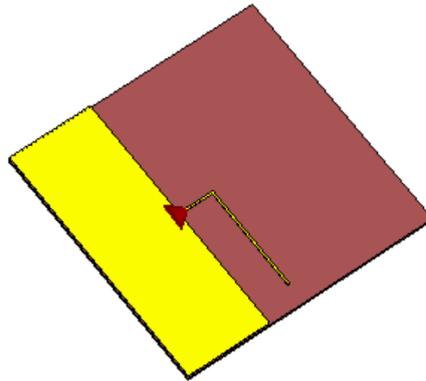


Fig. 63. Antena L invertida impresa

A continuación, se muestra la respuesta en impedancia de la antena ILA impresa en las siguientes imágenes Fig. 52 y Fig. 53.

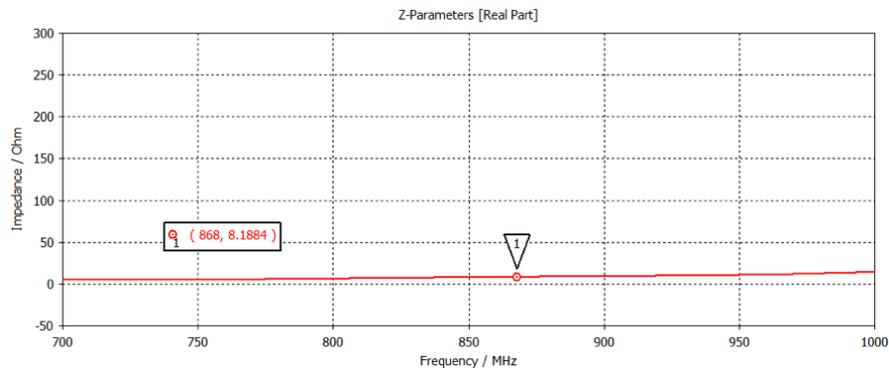


Fig. 64. Resistencia de entrada antena ILA impresa

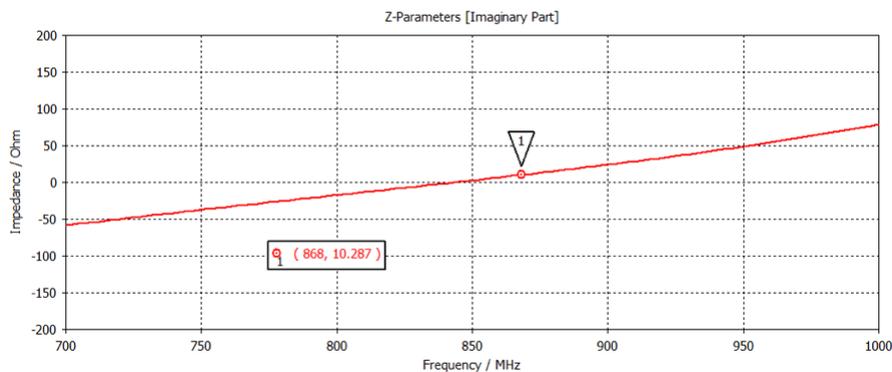


Fig. 65. Reactancia de entrada antena ILA impresa

La gráfica correspondiente al parámetro S_{11} , nos mostrará el margen de frecuencias en el que el funcionamiento de la antena será el óptimo, extrayendo, por tanto, su ancho de banda efectivo.

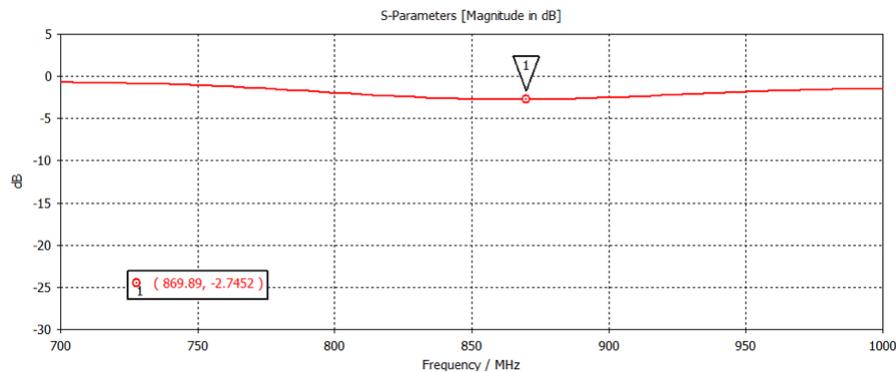


Fig. 66. Parámetro S_{11} antena ILA impresa

Como se puede observar en la Fig. 54, con esta configuración, no se alcanzan valores para este rango de frecuencias por debajo de los -6 dB, por lo que a priori, su comportamiento no sería óptimo, ya que en cuando a pérdidas se refiere, sería poco idóneo para un correcto funcionamiento de la antena.

La eficiencia de radiación, como se observa en la imagen que se presenta a continuación, es óptima para el rango de frecuencias establecido (Fig.55.). Se puede comprobar como dicha eficiencia de radiación se sitúa por encima de -5 dB para todo el margen establecido.

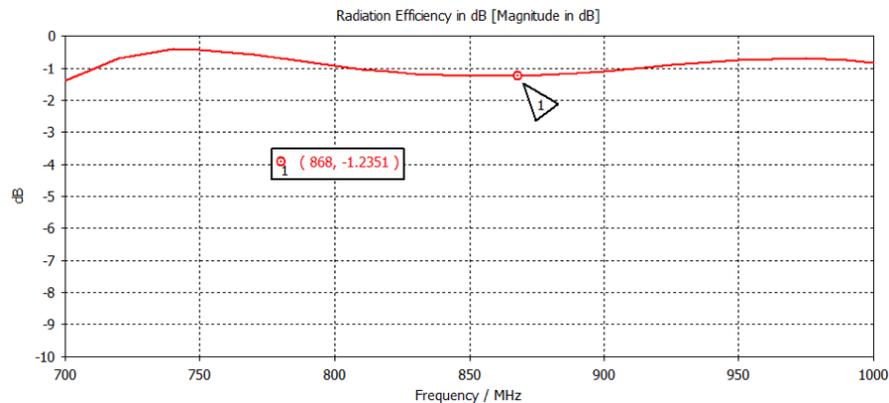


Fig. 67. Eficiencia de radiación antena ILA impresa

No ocurre lo mismo con la eficiencia total, la cual, como se ha mencionado anteriormente, depende, además, de la eficiencia de radiación, de la óptima adaptación del coeficiente de reflexión, que como se ha podido observar no cumple con la condición establecida para un funcionamiento óptimo.

Con este ejemplo de antena lineal impresa, se corrobora uno de los inconvenientes del empleo de las antenas impresas, y es su baja eficiencia, ya que, de la cantidad de energía acumulada en la cavidad formada entre el parche y el plano de masa, es sólo una pequeña porción la que es radiada al espacio. [23]

Como puede observarse en la figura a continuación, los valores de eficiencia total son óptimos cuando el coeficiente de reflexión es más bajo, en torno a la frecuencia de resonancia (Fig.56.).

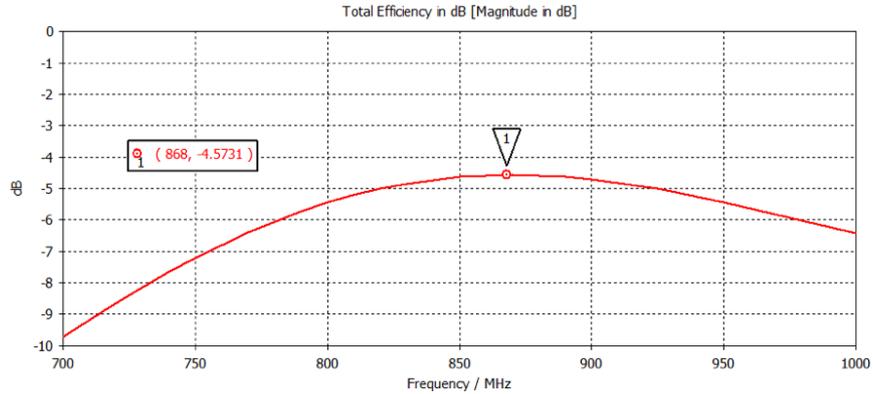


Fig. 68. Eficiencia total antenna ILA impresa

Las corrientes para 868 MHz parten del punto de alimentación recorriendo el brazo menor hasta el brazo mayor de la antenna L invertida donde en el extremo de este último, las corrientes van disminuyendo su intensidad. Por el resto del plano metálico, las corrientes van avanzando hacia los extremos cada vez con menor intensidad, como puede observarse en la Fig. 57.

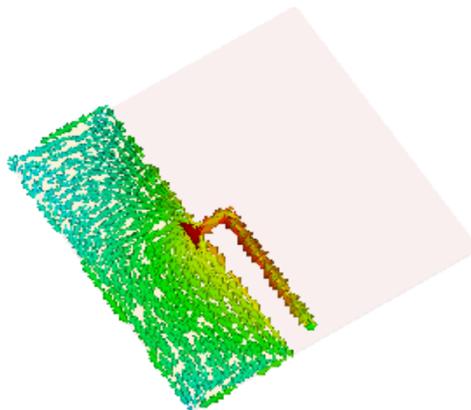


Fig. 69. Distribución de corrientes antenna ILA impresa

En las siguientes imágenes, se mostrarán los cortes de los diagramas de radiación en los planos YZ y XY de la antenna ILA impresa (Fig.58.).

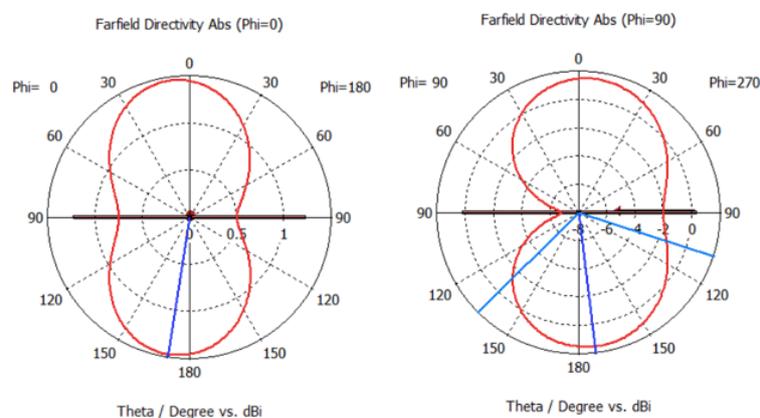


Fig. 70. Cortes en el plano $\varphi = 0^\circ$ y $\varphi = 90^\circ$

El diagrama de radiación 3D muestra como la antena ILA impresa radia por debajo del plano de masa y del sustrato. Se obtiene de estos diagramas el valor de directividad máxima de 1.66 dBi y el ancho de haz del haz principal de 117.5° .

A continuación, se presenta como último resultado relevante de la simulación de la antena L invertida dicho diagrama de radiación 3D a la frecuencia de resonancia de 868 MHz.

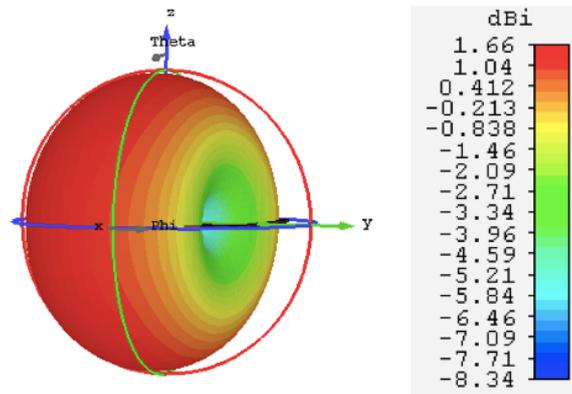


Fig. 71. Diagrama de radiación de antena ILA impresa

5.4 Antena F invertida impresa

Al igual que en los dos apartados anteriores, van a ser expuestos los resultados más relevantes correspondientes a la simulación de la antena F invertida para la frecuencia de resonancia de 868 MHz.

La antena F invertida o antena IFA ha sido diseñada sobre el mismo sustrato, mismo material y mismas dimensiones que el empleado en los diseños anteriores de la antena monopolo y la antena ILA impresas.

La antena IFA simulada a la frecuencia de trabajo de 868 MHz presenta como medidas el brazo mayor de 53.25 mm, el brazo menor de 8.8 mm, y la separación entre stubs de 2 mm. El ancho de la pista es de 1 mm, el mismo que el de las antenas anteriores.

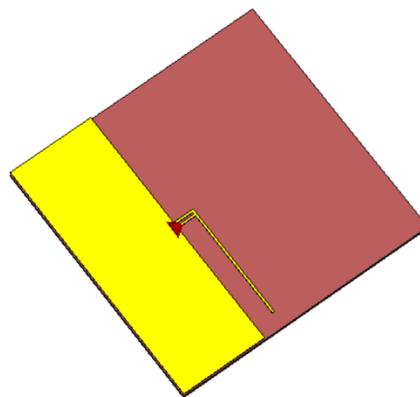


Fig. 72. Antena F invertida impresa

La antena IFA presenta una resistencia de entrada de en torno a los 40-50 Ω , y una reactancia de entrada de prácticamente 0 Ω (Fig.61. y Fig.62.). Como puede observarse, para este tipo de antena, al contrario que con la antena L invertida y la antena monopolo, la impedancia de entrada tiene un valor muy próximo a la impedancia característica con la que se ha calculado el coeficiente de reflexión, 50 Ω , por lo que se consigue una adaptación óptima para la frecuencia de resonancia requerida (Fig.63).

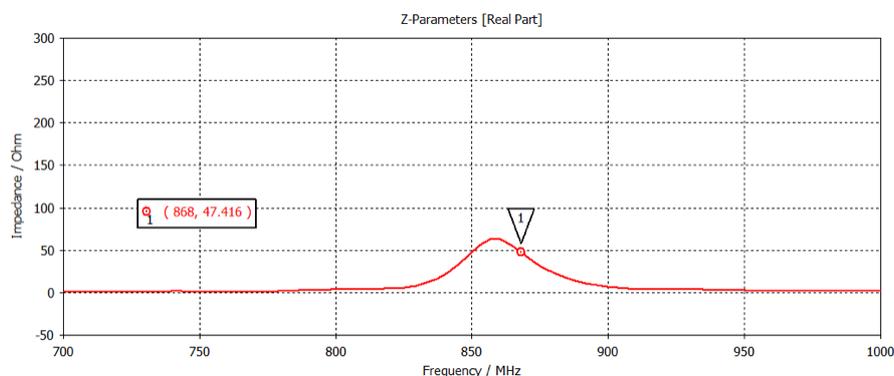


Fig. 73. Resistencia de entrada antena IFA impresa

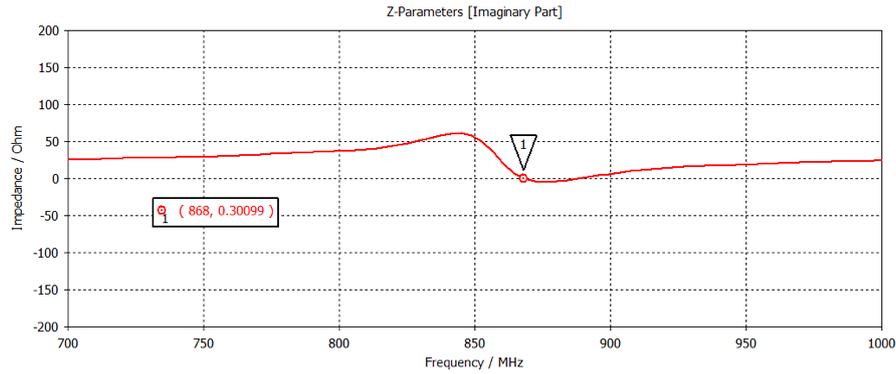


Fig. 74. Reactancia de entrada antena IFA impresa

En la imagen que se presenta a continuación, se puede observar como el parámetro S_{11} presenta alcanza un valor mínimo de -28.657 dB para la frecuencia de 868 MHz. El ancho de banda a -6 dB es del 4% aproximadamente, es decir, 34.9 MHz.

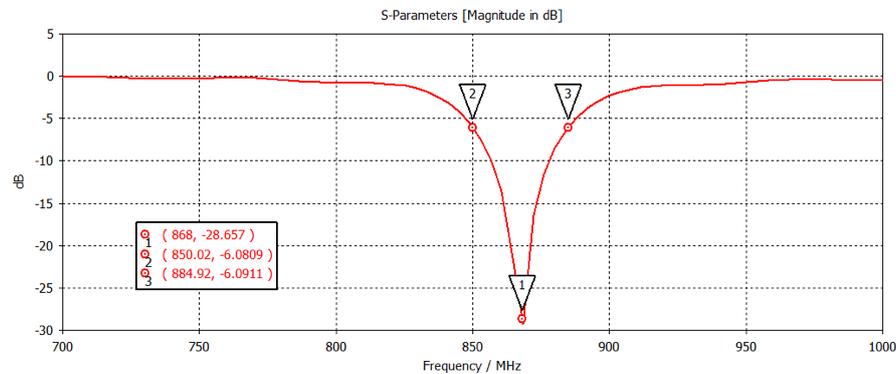


Fig. 75. Parámetro S_{11} antena IFA impresa

La eficiencia de radiación, como se observa en la imagen que se presenta a continuación, es óptima para el rango de frecuencias establecido (Fig.64.). Se puede comprobar como dicha eficiencia de radiación se sitúa por encima de -5 dB en prácticamente todo el margen establecido, salvo desde los 735 a los 745 MHz, por lo que se espera que su funcionamiento sea el correcto.

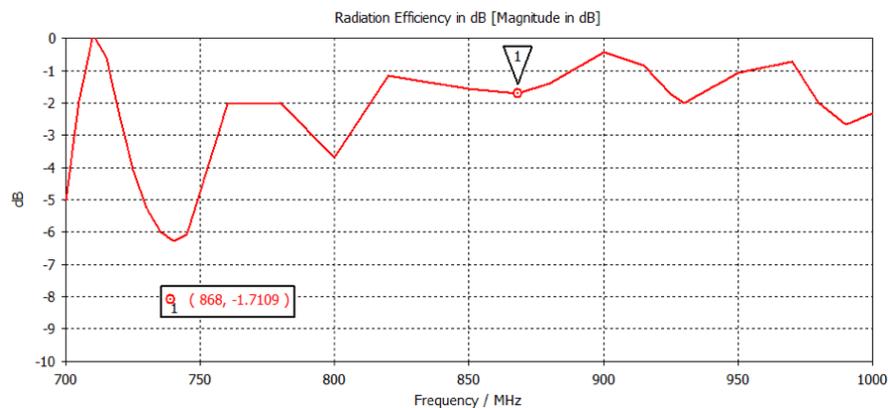


Fig. 76. Eficiencia de radiación antena IFA impresa

Como puede observarse en la figura a continuación, los valores de eficiencia total son óptimos en torno a la frecuencia de resonancia (Fig.65.) en un rango de frecuencias desde los 837.76 a los 902.79 MHz.

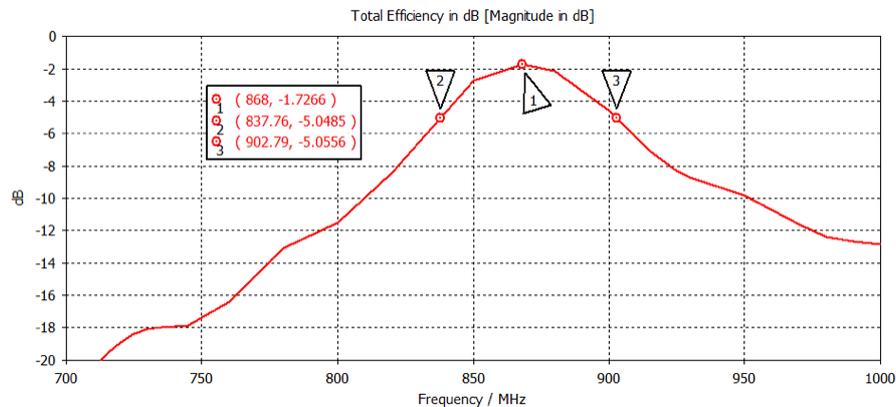


Fig. 77. Eficiencia total antena IFA impresa

Ésta es la distribución de las corrientes en la antena F invertida para 868 MHz, las cuales, parten del punto de alimentación recorriendo el brazo menor hasta el brazo mayor de la antena, donde retornan y vuelven al plano metálico a través del stub superior, donde las corrientes van disminuyendo su intensidad.

Por el resto del plano metálico, las corrientes van avanzando hacia los extremos cada vez con menor intensidad (Fig.66.).

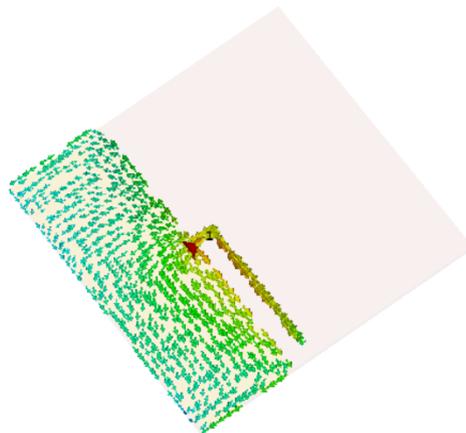


Fig. 78. Distribución de corrientes antena IFA impresa

A continuación, se muestran los cortes de los diagramas de radiación en los planos YZ y XY de la antena IFA impresa (Fig.67.).

Se obtiene de estos cortes del diagrama de radiación el valor de directividad máxima de 1.45 dBi y el ancho de haz del haz principal de 119.4°, con la dirección del lóbulo principal 164°.

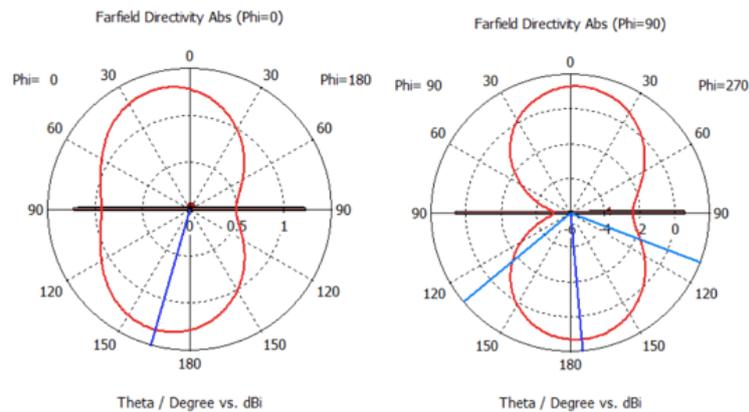


Fig. 79. Cortes en el plano $\varphi = 0^\circ$ y $\varphi = 90^\circ$

A continuación, se presenta como último resultado relevante de la simulación de la antena F invertida dicho diagrama de radiación 3D a la frecuencia de resonancia de 868 MHz (Fig.68.).

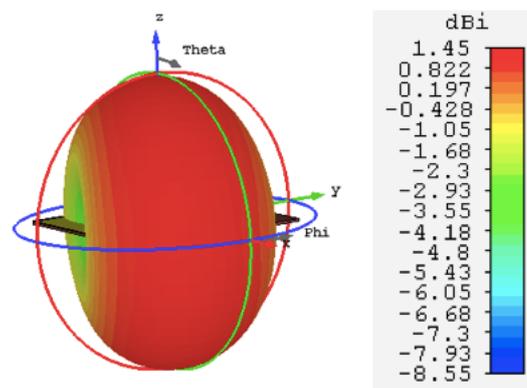


Fig. 80. Diagrama de radiación de antena IFA impresa

Finalmente, se ha realizado una tabla comparativa con los resultados obtenidos de la simulación de las antenas impresas monopolo, antena L invertida y antena F invertida para la frecuencia de 868 MHz sobre un mismo sustrato y plano de mismas dimensiones y características (Tabla 2.).

Tipo de antena impresa	Frecuencia de máx de trabajo (MHz)	Coefficiente de reflexión (dB)	Impedancia de entrada a la frecuencia máx de trabajo (Ω)	Ancho de banda a -6 dB (%)	Directividad a la frecuencia máx de trabajo (dBi)
<i>Monopolo</i>	868	-12.14	31.44 + j8.05	21.55	1.95
<i>L invertida</i>	868	-2.75	8.19 + j10.29	-	1.66
<i>F invertida</i>	868	-28.657	47.42 + j0.31	4	1.45

Tabla 2. Comparativa de antenas lineales

Comparando los resultados recogidos en la tabla anterior, podemos observar como las opciones más óptimas son la antena monopolo, y especialmente, la antena F invertida, la cual, presenta



una impedancia de entrada cercana a 50Ω a la frecuencia de resonancia.

En el caso de la antena F invertida impresa, se aprecia en la tabla una menor directividad que para la antena L invertida impresa. Este valor se corresponde con uno de los ejes principales, en el que debido a la existencia del plano de masa sucede este efecto.

Si se realizasen otros cortes en el espacio se podría observar como verdaderamente, la ganancia de la antena F invertida es mayor que la de la antena L invertida, al igual que ocurría en el capítulo anterior con estas antenas frente situadas frente a plano de masa.

Capítulo 6. Diseño y simulación de antenas para dispositivos portátiles

Hoy en día, los sistemas de comunicación inalámbricos son capaces de evitar el uso de conexiones físicas entre dispositivos, siendo las antenas *wearables*⁴ un componente imprescindible en esta nueva etapa.

La entrada al mercado de tecnologías como los relojes inteligentes, gracias a esta tecnología *wearable*, da lugar a un amplio abanico de posibilidades para la comunicación inalámbrica. Esperándose incluso, la llegada de una nueva generación de terminales móviles con tecnologías de pantalla flexibles, en los que un buen rendimiento, memoria y calidad de los mismos está garantizada. [28]

En este capítulo, se presentará el diseño y simulación de antenas *wearables* integradas en relojes inteligentes capaces de funcionar a las frecuencias de 868 MHz, 915 MHz y, por último, a la frecuencia de 2.4 GHz.

Las antenas planas diseñadas tratan de antenas F invertidas impresas sobre sustrato dieléctrico FR4 caracterizado al comienzo del apartado anterior. Se ha implementado este tipo de antena debido a que presenta propiedades eléctricas más óptimas que los diseños de la antena monopolo, y la antena L invertida o antena ILA.

El plano dieléctrico circular, de espesor 0.3 mm, donde están integradas dichas antenas presenta un radio de 28.34 mm, unido por su parte superior al plano conductor de la placa de circuito impreso, donde será incorporada toda la circuitería, es decir, pistas y componentes, del dispositivo inalámbrico. Este plano metálico presenta un corte lateral de 12 mm de anchura aproximadamente. Justo ahí, será la zona reservada del dispositivo en la que se ha de diseñar la antena F invertida.

La alimentación de la antena plana impresa se realizará mediante una guía de onda coplanar (CPW), además de un puerto discreto. Fijándose la impedancia de la línea a 50 Ω , se obtiene un ancho de la tira de 1 mm, una separación de la misma con ambos lados del plano metálico de 0.15 mm.

Para el caso del dispositivo diseñado para la frecuencia de trabajo de 2.4 GHz, se han propuesto varios diseños, aprovechando que dicha frecuencia es la banda de operación para los sistemas Wi-Fi, Bluetooth, 5G e IoT.

Se ha variado la topología del plano sobre el que se diseña la antena, donde se podrá apreciar la mejora de la eficiencia de la misma.

6.1 Diseño y simulación de antena IFA a 868 MHz sobre plano circular

El primer diseño que se presenta se corresponde con la antena cuya banda de funcionamiento se sitúa en torno a los 868 MHz. Debido a la gran longitud del brazo mayor de la antena F invertida impresa, es necesaria la adaptación del mismo en el espacio reservado para ella, dando lugar a la tecnología *Meander Line Antenna* o Antena de Línea Serpeante.

⁴ Tecnología ponible o vestible, dicese de dispositivos electrónicos inteligentes integrados en prendas y complementos que permiten intercambiar información a través de Internet sin intervención humana.

Esta tecnología tendrá un gran efecto en la eficiencia y en el ancho de banda de la antena, produciéndose además un efecto de acoplamiento capacitivo entre la misma y el plano conductor metálico.

A continuación, se muestra la imagen del diseño del dispositivo *wearable* con la antena incorporada cuyo funcionamiento es óptimo a la frecuencia de 868 MHz.

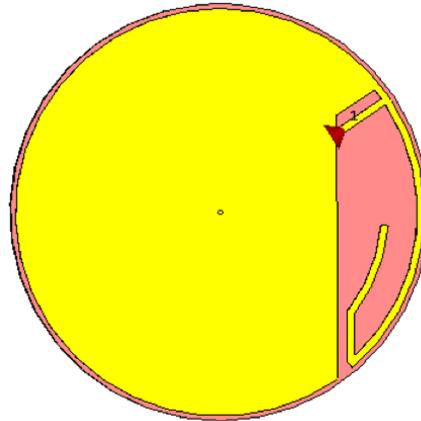


Fig. 81. Antena IFA a 868 MHz

Para describir el comportamiento eléctrico de la antena, se caracteriza la onda reflejada e incidente en su único puerto, y así, poder predecir su comportamiento bajo condiciones lineales en un rango de frecuencias determinado.

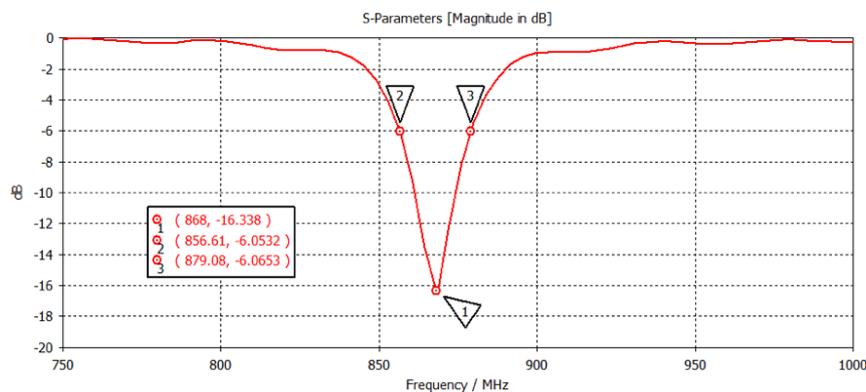


Fig. 82. Parámetro S_{11} antena IFA a 868 MHz

En la imagen anterior, se puede observar como el parámetro S_{11} presenta alcanza un valor mínimo de -16.338 dB para la frecuencia de 868 MHz. El ancho de banda a -6 dB es del 2.6 % aproximadamente, es decir, 22.47 MHz.

Todo el rango de frecuencias fuera de esta zona de adaptación, devuelven prácticamente la totalidad de la señal que recibe la antena de la línea que la alimenta. Debido a la Ley de Conservación de la Energía, se puede decir que la energía que no se refleja a dicha frecuencia se ha radiado al entorno.

Como puede observarse en las dos imágenes que se presentan a continuación, la antena IFA presenta una resistencia de entrada de en torno a los 50 Ω , y una reactancia de entrada de 0 Ω aproximadamente (Fig.83. y Fig.84.), por lo que se consigue una adaptación óptima a la frecuencia de resonancia (Fig.82).

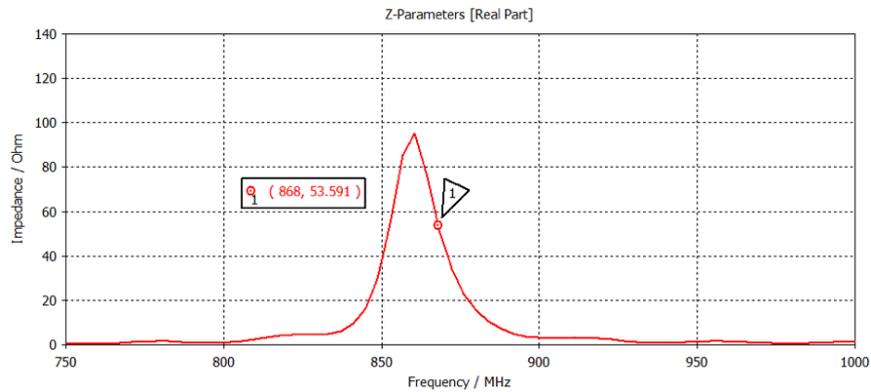


Fig. 83. Resistencia de entrada antenna IFA a 868 MHz

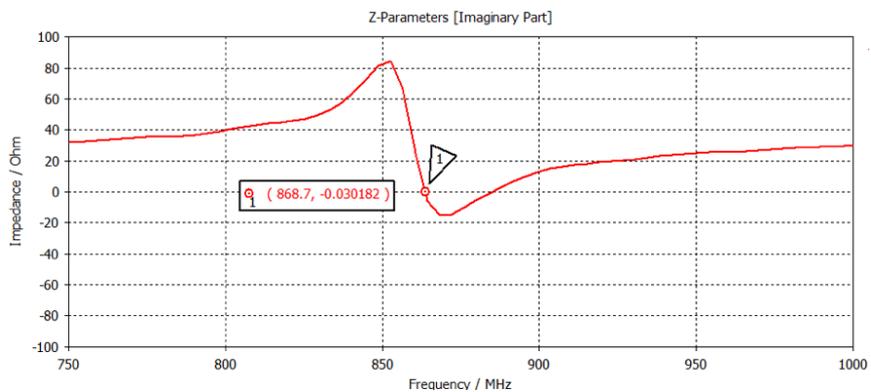


Fig. 84. Reactancia de entrada antenna IFA a 868 MHz

Como se ha podido observar en las imágenes anteriores, debido al efecto inductivo, dicha antenna presenta su funcionamiento óptimo en la zona de anti resonancia. Es por ello, por lo que la resistencia de entrada de la antenna IFA a 868 MHz, presenta el punto de adaptación a 50Ω dentro de la zona con pendiente negativa.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la eficiencia de radiación y a la eficiencia total de la antenna (Fig.85. y Fig.86.). Dichas eficiencias se sitúan por encima de -5 dB en todo el margen de frecuencias requerido para alcanzar un correcto funcionamiento de la antenna a diseñar.

La eficiencia total de la antenna presenta peores resultados, degradándose a medida que el barrido en frecuencia se aleja de la zona de máxima adaptación, donde sí cumple con la condición establecida.

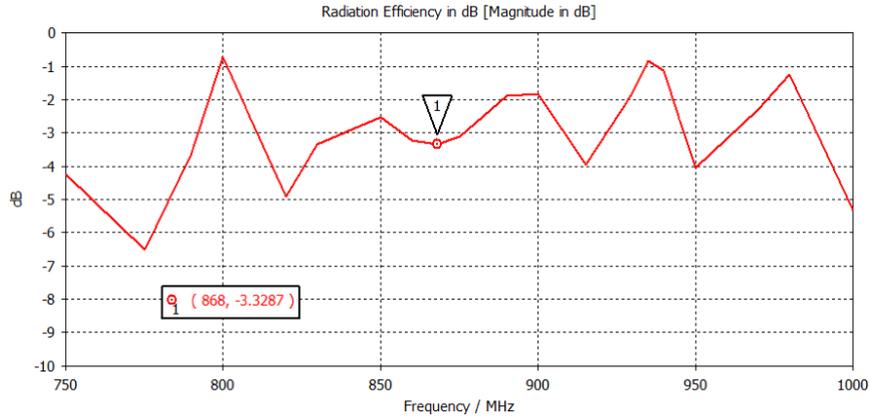


Fig. 85. Eficiencia de radiación antena IFA a 868 MHz

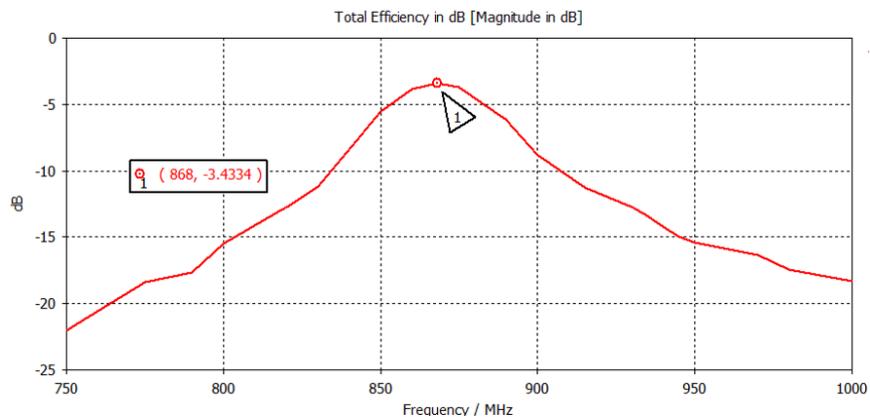


Fig. 86. Eficiencia total antena IFA a 868 MHz

La distribución de las corrientes en la antena IFA sobre el plano conductor para 868 MHz, parten del punto de alimentación recorriendo el brazo menor hasta el brazo mayor de la antena, donde retornan justo en el extremo y vuelven al plano metálico a través del stub o brazo menor superior. Es a partir de ahí, donde recorren el resto del plano en sentido horario con trazas circulares concéntricas al centro del plano.

Las corrientes van perdiendo intensidad cuando las trazas circulares se hallan más al exterior del plano metálico (Fig.87.).

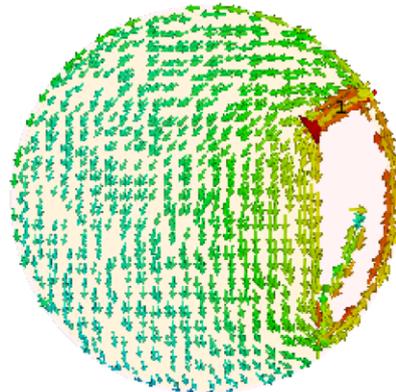


Fig. 87. Distribución de corrientes antena IFA a 868 MHz

A continuación, se muestran los cortes de los diagramas de radiación en los planos YZ y XY de la antena IFA a 868 MHz (Fig.88.).

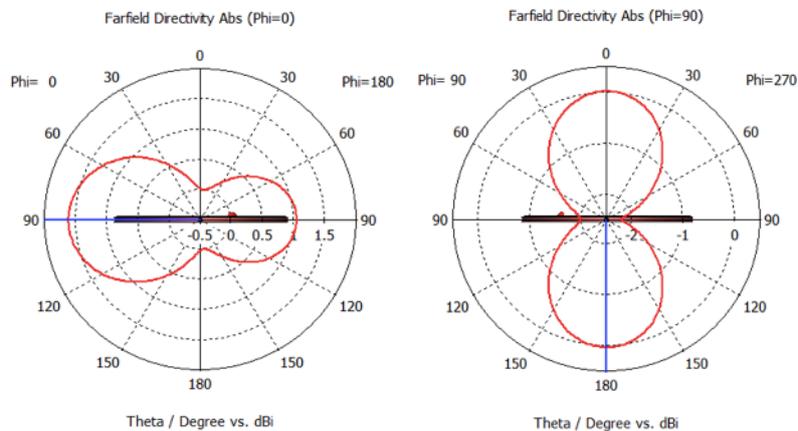


Fig. 88. Cortes en el plano $\varphi = 0^\circ$ y $\varphi = 90^\circ$

Se presenta como último resultado relevante de la simulación de la antena, el diagrama de radiación 3D a la frecuencia de resonancia de 868 MHz (Fig.89.).

De dicho diagrama se extrae la directividad de la antena a esa frecuencia, 1.62 dBi. Puede observarse como la antena presenta un diagrama de radiación *endfire*, donde el lóbulo de radiación principal apunta en la misma dirección que el eje de la antena.

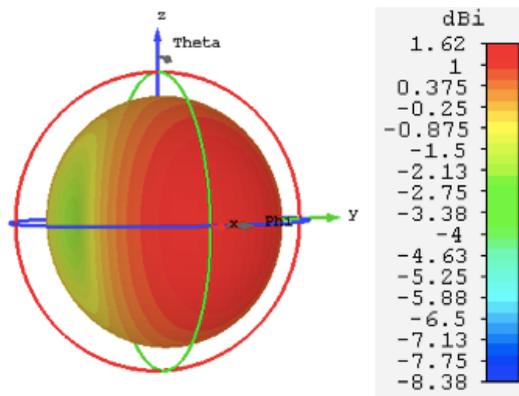


Fig. 89. Diagrama de radiación de antena IFA a 868 MHz

6.2 Diseño y simulación de antena IFA a 915 MHz sobre plano circular

Tras exponerse el diseño y la simulación de la antena IFA sobre un plano circular cuyo funcionamiento se corresponde a la frecuencia de resonancia de 868 MHz y el margen de frecuencias colindantes a ésta, ahora, se presenta el diseño y simulación de dicha antena adaptada a la frecuencia de 915 MHz, otra de las bandas ISM con más sistemas inalámbricos adeptos a su funcionamiento en torno a dicha frecuencia.

El diseño presenta las mismas dimensiones y características del plano dieléctrico y conductor que en el diseño anterior. Las dimensiones y topología de la zona reservada para la implementación de la antena en el dispositivo *wearable*, también es la misma.

Tras la optimización de la longitud del brazo largo de la antena IFA impresa, donde se ha reducido 7.17 mm con respecto a la antena dirigida a un funcionamiento óptimo en la banda de 868 MHz. A continuación, se presenta el diseño simulado para 915 MHz.

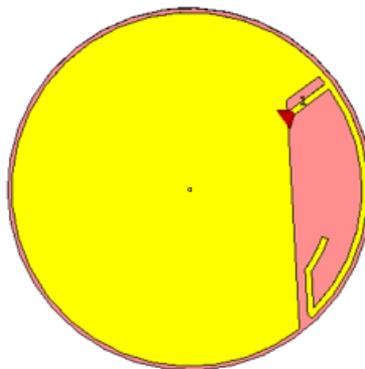


Fig. 90. Antena IFA a 915 MHz

Se ha caracterizado el comportamiento eléctrico de la antena mediante la simulación del coeficiente de reflexión en el margen de frecuencias deseado.

Se puede observar como el parámetro S_{11} presenta como valor a la frecuencia de 915 MHz, -15.887 dB. El ancho de banda efectivo a -6 dB es del 2.86 %, es decir, 26.13 MHz aproximadamente.

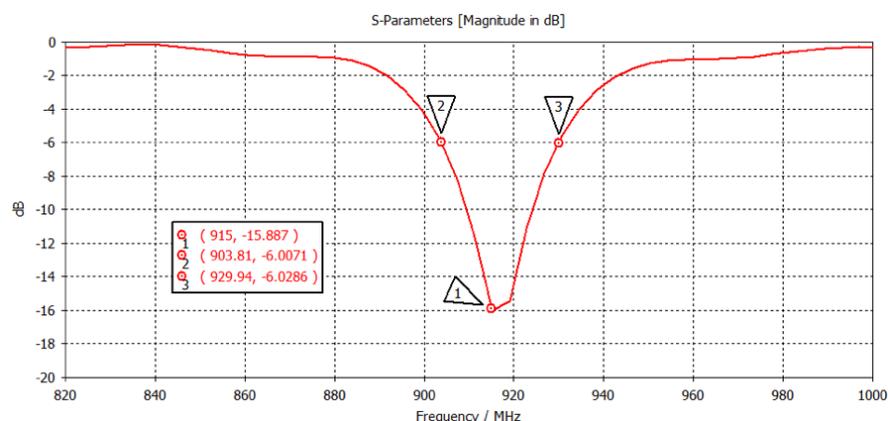


Fig. 91. Parámetro S_{11} antena IFA a 915 MHz

A continuación, se muestran los resultados obtenidos correspondientes a la resistencia y reactancia de la impedancia de entrada, los cuales se sitúan en torno los 63Ω , y -1.4Ω , respectivamente.

Es por ello, por lo que se consigue que la adaptación sea adecuada para el margen de frecuencias establecido (Fig.92. y Fig.93.).

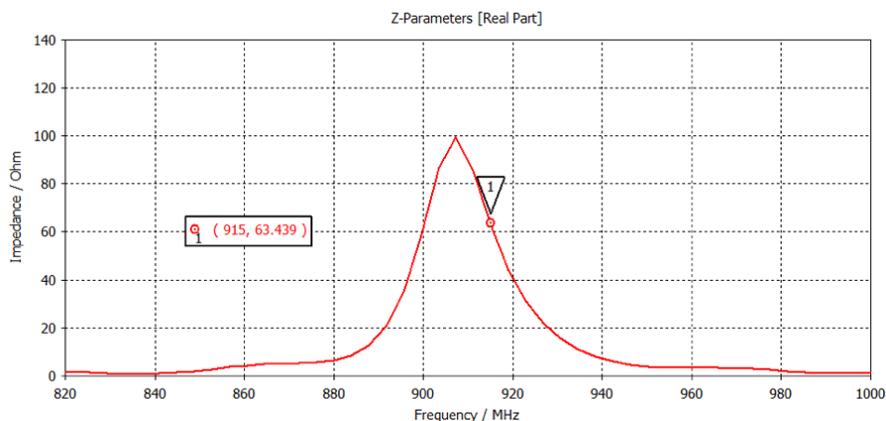


Fig. 92. Resistencia de entrada antena IFA a 915 MHz

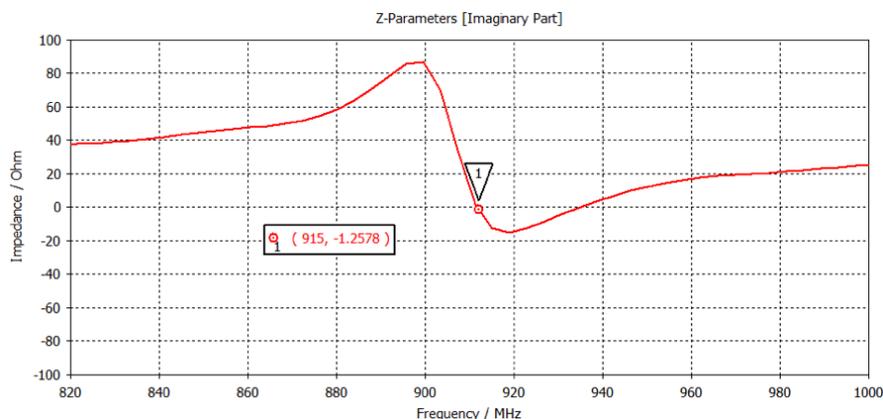


Fig. 93. Reactancia de entrada antena IFA a 915 MHz

Tras los resultados correspondientes a la resistencia y reactancia correspondientes de la impedancia de entrada, se muestran los resultados de la eficiencia de radiación y a la eficiencia total de la antena (Fig.94. y Fig.95.).

Ambas eficiencias se sitúan por encima de -5 dB en todo el margen de frecuencias requerido, por lo que se puede esperar que presentará un correcto funcionamiento.

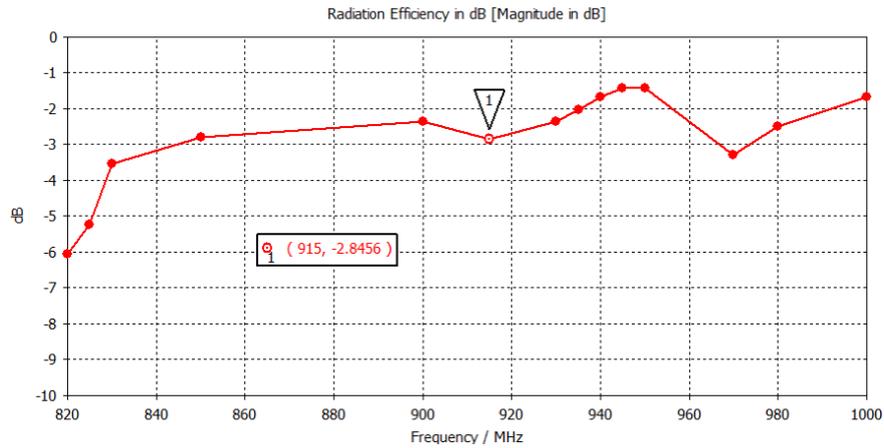


Fig. 94. Eficiencia de radiación antena IFA a 915 MHz

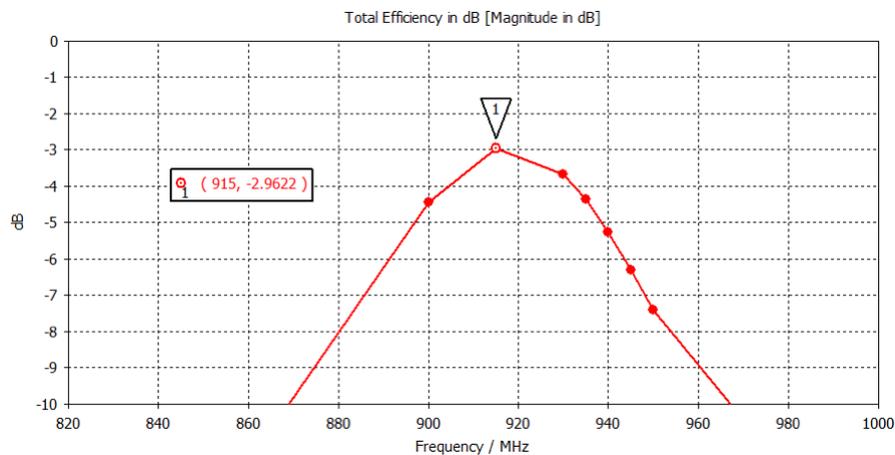


Fig. 95. Eficiencia total antena IFA a 915 MHz

La distribución de las corrientes en la antena, parten, al igual que en diseño de antena IFA a la frecuencia de 868 MHz, del punto de alimentación recorriendo el brazo menor hasta el brazo mayor de la antena, donde retornan justo en el extremo y vuelven al plano conductor a través del brazo menor superior, recorriendo el resto del plano cada vez con menor intensidad a medida que se alejan del punto de alimentación.

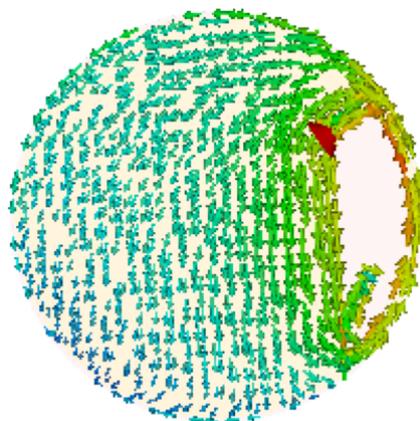


Fig. 96. Distribución de corrientes antena IFA a 915 MHz

A continuación, se muestran los cortes de los diagramas de radiación en los planos YZ y XY de la antena IFA a la frecuencia de 915 MHz (Fig.97.), y, además, el diagrama de radiación 3D.

De estos parámetros de antena característicos, puede extraer como datos el valor de la directividad de la antena diseñada, que en este caso se corresponde con 1.634 dBi, además, de la dirección del lóbulo principal, que como se puede apreciar se corresponde con un diagrama de radiación *endfire*, ya que apunta en la misma dirección que el eje principal de la antena diseñada (Fig.98.).

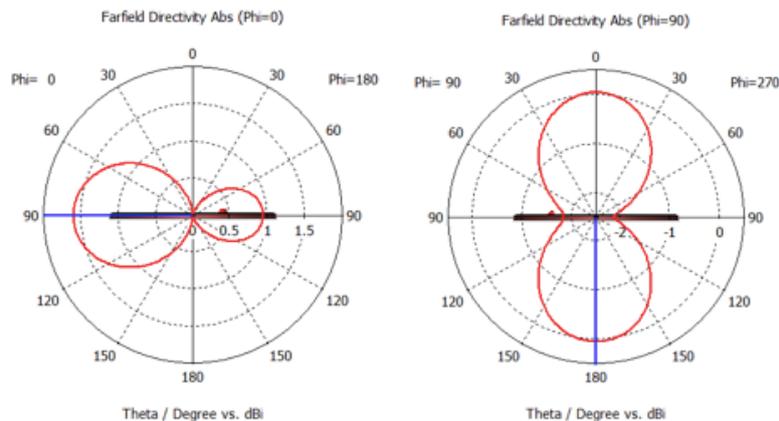


Fig. 97. Cortes en el plano $\varphi = 0^\circ$ y $\varphi = 90^\circ$

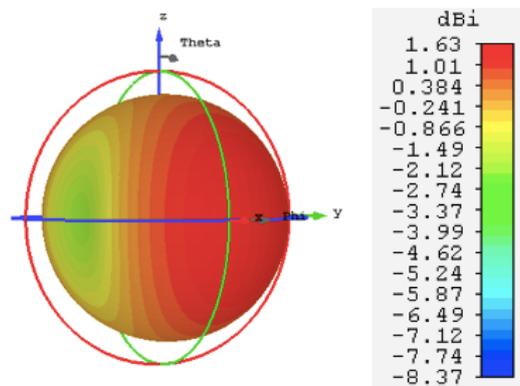


Fig. 98. Diagrama de radiación de antena IFA a 915 MHz

6.3 Diseño y simulación de antenas IFA a 2.4 GHz sobre diversos tipos de planos

Siendo la banda de frecuencias en torno a 2400 MHz, la que soporta un mayor número de servicios y sistemas de comunicaciones inalámbricas, se presenta el diseño de una antena F invertida (IFA).

La antena se ha diseñado sobre el mismo sustrato, con idénticas características, topología y dimensiones, que los dos diseños presentados anteriormente cuyas frecuencias de trabajo se corresponden con 868 MHz y 915 MHz, respectivamente.

Se ha rediseñado para este apartado, nuevamente la antena cuya frecuencia de resonancia se correspondía con 868 MHz, para que en este caso la nueva frecuencia de trabajo se sitúe en torno a 2400 GHz.

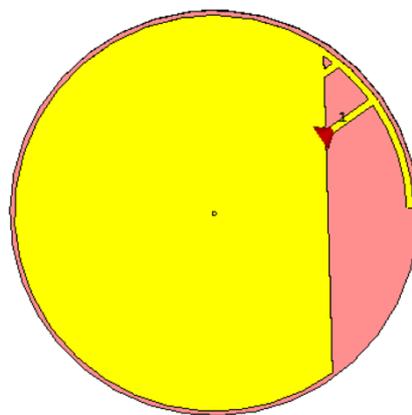


Fig. 99. Antena IFA a 2400 MHz

A continuación, se presenta el resultado obtenido respecto al coeficiente de reflexión de la nueva antena, donde la longitud del brazo mayor de la misma se ha acortado considerablemente. Se puede observar como el parámetro S_{11} alcanza un valor mínimo de -7.16 dB.

El ancho de banda a -6 dB es del 23.13 % aproximadamente, es decir, 555.2 MHz, por lo que el funcionamiento óptimo de la antena diseñada se correspondería con un poseer un ancho de banda de banda ancha.

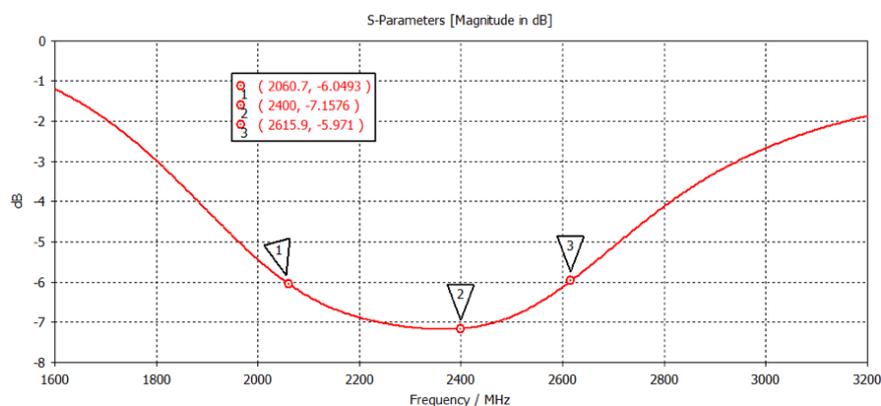


Fig. 100. Parámetro S_{11} antena IFA a 2400 MHz

Como puede observarse en las dos imágenes que se muestran a continuación, la antena IFA sintonizada a 2400 MHz, presenta una resistencia de entrada de en torno a los 60 Ω , y una reactancia de entrada de 0 Ω aproximadamente (Fig.101. y Fig.102.).

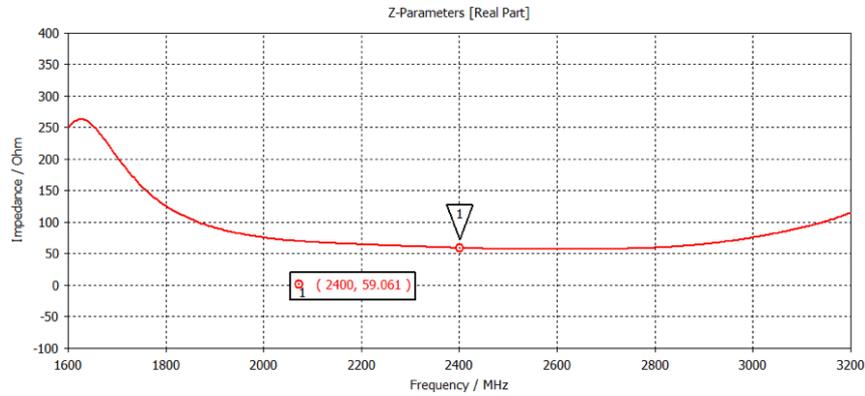


Fig. 101. Resistencia de entrada antena IFA a 2400 MHz

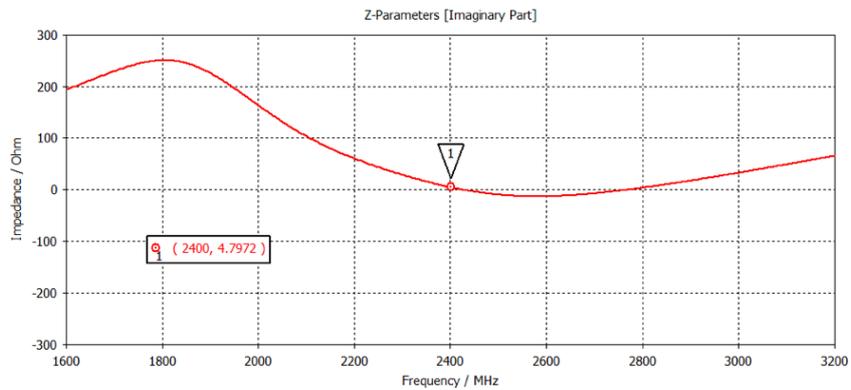


Fig. 102. Reactancia de entrada antena IFA a 2400 MHz

A continuación, se pueden observar los resultados correspondientes a la eficiencia de radiación y a la eficiencia total de la antena. Dichas eficiencias se sitúan por encima de -5 dB en todo el margen de frecuencias requerido para alcanzar un correcto funcionamiento de la antena a diseñar.

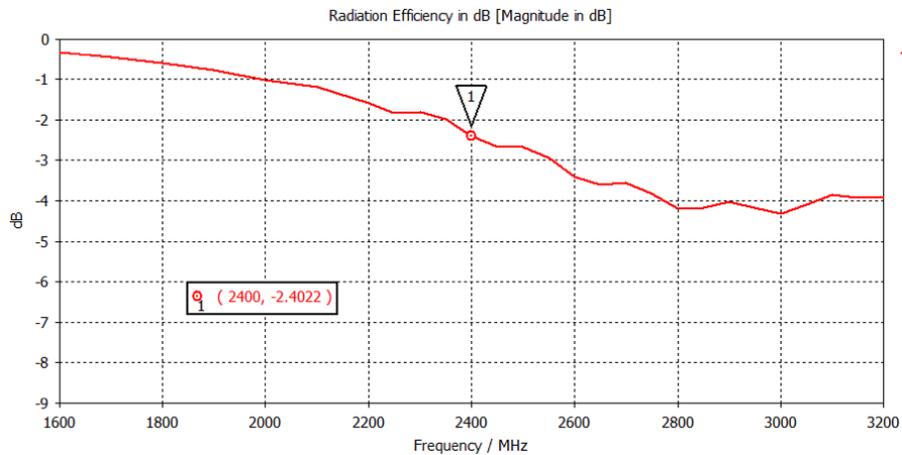


Fig. 103. Eficiencia de radiación antena IFA a 2400 MHz

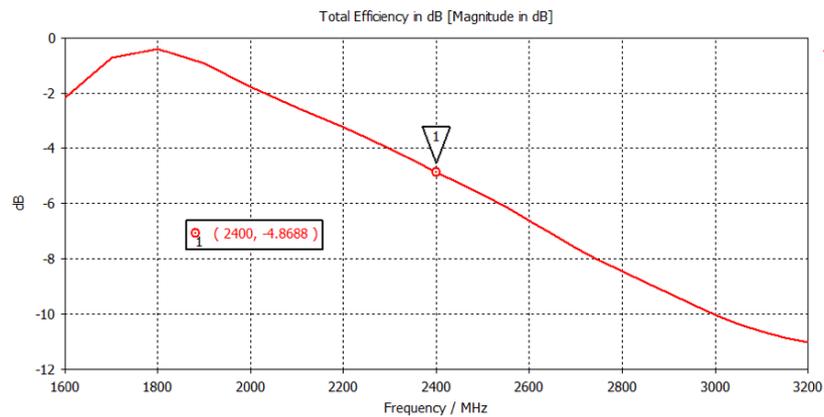


Fig. 104. Eficiencia total antena IFA a 2400 MHz

La distribución de las corrientes en la antena IFA sobre el plano conductor para 2400 MHz, parten del punto de alimentación, recorren el brazo menor hasta el brazo mayor de la antena, y justo en el extremo, retornan y vuelven al plano metálico a través del brazo menor superior. Estas corrientes van perdiendo intensidad cuando las trazas circulares se mueven hacia el exterior del plano metálico (Fig.105.).

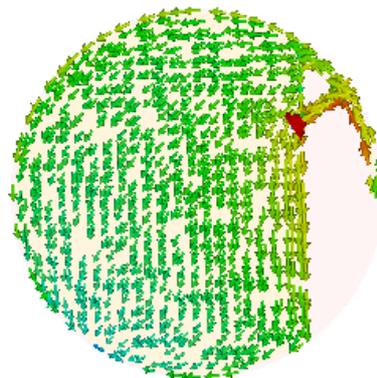


Fig. 105. Distribución de corrientes antena IFA a 2400 MHz

A continuación, se muestran los cortes de los diagramas de radiación en los planos YZ y XY de la antena IFA a 2400 MHz (Fig.106.).

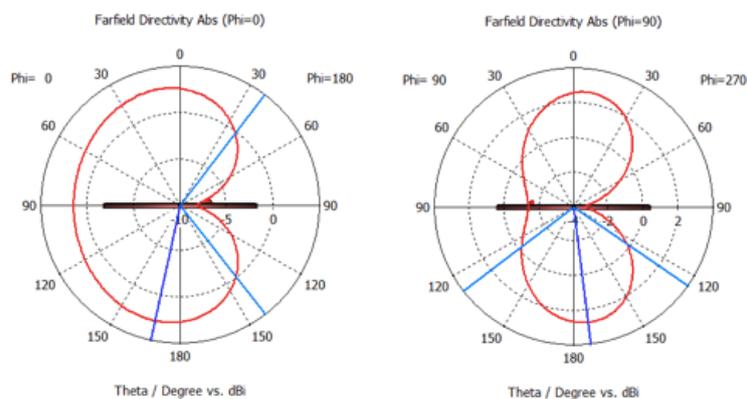


Fig. 106. Cortes en el plano $\varphi = 0^\circ$ y $\varphi = 90^\circ$

Se presenta como último resultado relevante de la simulación de la antena, el diagrama de radiación 3D a la frecuencia de resonancia de 2400 MHz (Fig.89.). De dicho diagrama se extrae la directividad de la antena a esa frecuencia, 2.8 dBi.

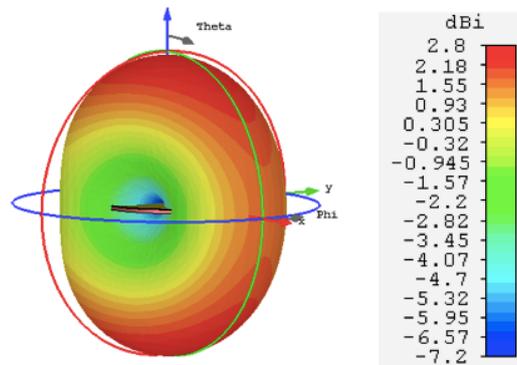


Fig. 107. Diagrama de radiación de antena IFA a 2400 MHz

A continuación, se muestra la imagen del diseño del dispositivo *wearable* con la antena incorporada cuyo funcionamiento también es óptimo a la frecuencia de 2400 MHz, pero en este caso la antena ha sido integrada en un plano rectangular con las mismas características eléctricas que en los diseños anteriores.

En este caso, se espera que los valores de eficiencia mejoren con respecto al plano circular, ya que cuanto mayor sea el plano, más eficiente será la antena diseñada.

Se ha realizado el diseño con un plano conductor metálico de dimensiones 90.5 mm x 46 mm. La antena IFA invertida se ha rediseñado para adaptarla en dicho plano a la frecuencia de trabajo 2400 MHz, reduciendo el brazo externo aproximadamente 5 mm, con respecto al diseño de antena IFA a 2400 MHz integrada en el plano circular.

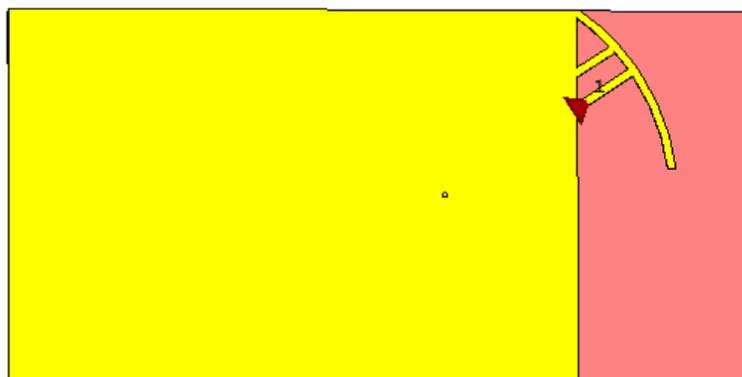


Fig. 108. Antena IFA a 2400 MHz plano rectangular

En la imagen que se presenta a continuación, se puede observar como el parámetro S_{11} presenta un valor mínimo de -6.36 dB para la frecuencia de 2400 MHz. El ancho de banda a -6 dB es del 6 % aproximadamente, es decir, 141.5 MHz.

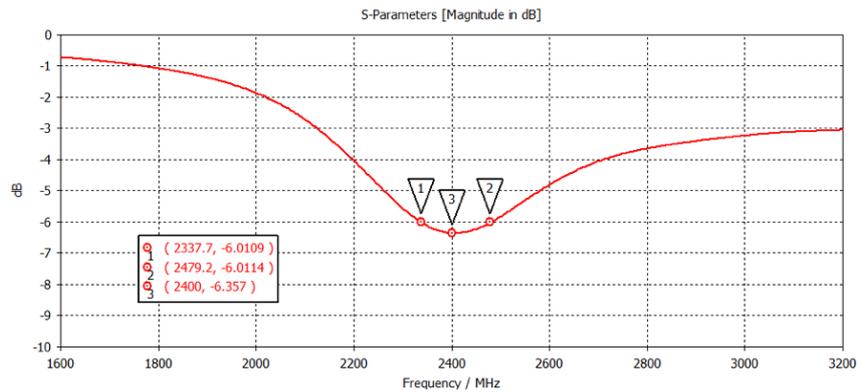


Fig. 109. Parámetro S_{11} antena IFA a 2400 MHz plano rectangular

La antena IFA, la cual resuena a la frecuencia de 2400 MHz, presenta una resistencia de entrada de en torno a los 50Ω , y una reactancia de entrada de 0Ω aproximadamente (Fig.110. y Fig.111.).

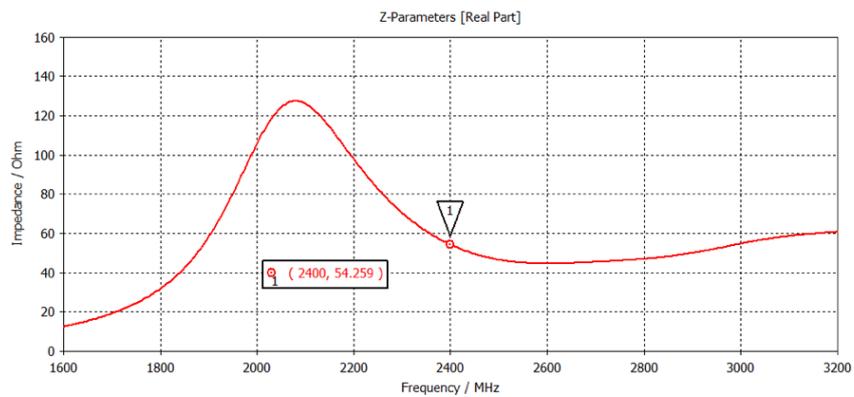


Fig. 110. Resistencia de entrada antena IFA a 2400 MHz plano rectangular

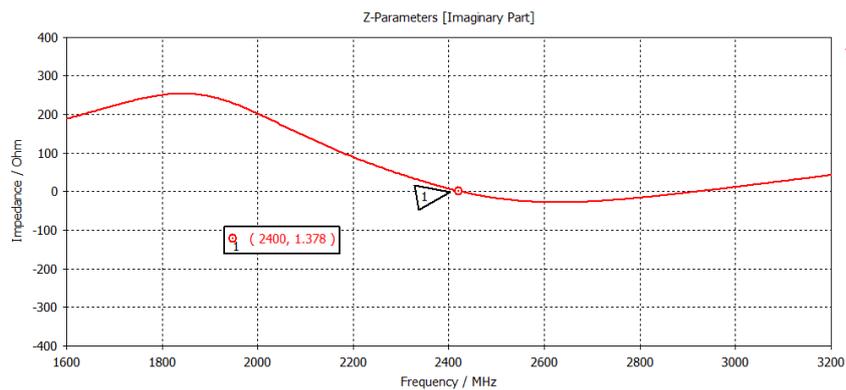


Fig. 111. Reactancia de entrada antena IFA a 2400 MHz plano rectangular

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la eficiencia de radiación y a la eficiencia total de la antena (Fig.112. y Fig.113.). Dichas eficiencias se sitúan por encima de -5 dB en todo el margen de frecuencias requerido para alcanzar un correcto funcionamiento de la antena a diseñar, al igual que en resto de diseños propuestos.

La eficiencia total de la antena presenta peores resultados, degradándose a medida que el barrido en frecuencia se aleja de la zona de máxima adaptación, donde sí cumple con la condición establecida.

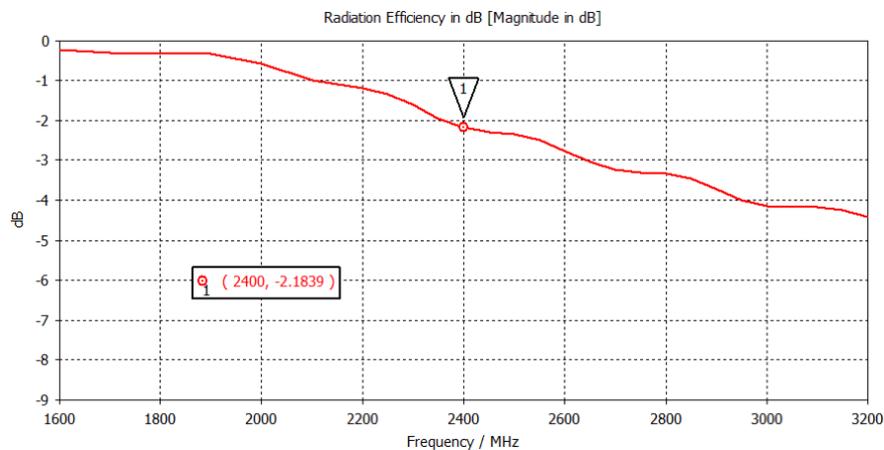


Fig. 112. Eficiencia de radiación antena IFA a 2400 MHz plano rectangular

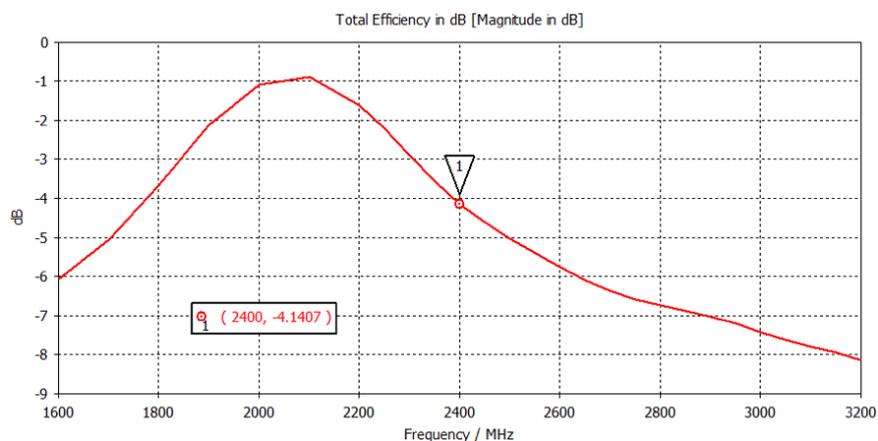


Fig. 113. Eficiencia total antena IFA a 2400 MHz plano rectangular

La distribución de las corrientes en la antena IFA que recorren el plano conductor metálico rectangular para 2400 MHz, se puede observar en la imagen que se presenta a continuación (Fig.114.).

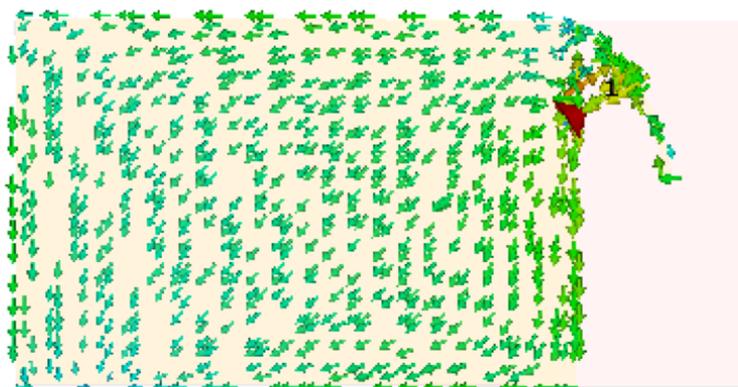


Fig. 114. Distribución de corrientes antena IFA a 2400 MHz plano rectangular

A continuación, se muestran los cortes de los diagramas de radiación en los planos YZ y XY de la antena IFA a 2400 MHz integrada en el plano rectangular (Fig.115.).

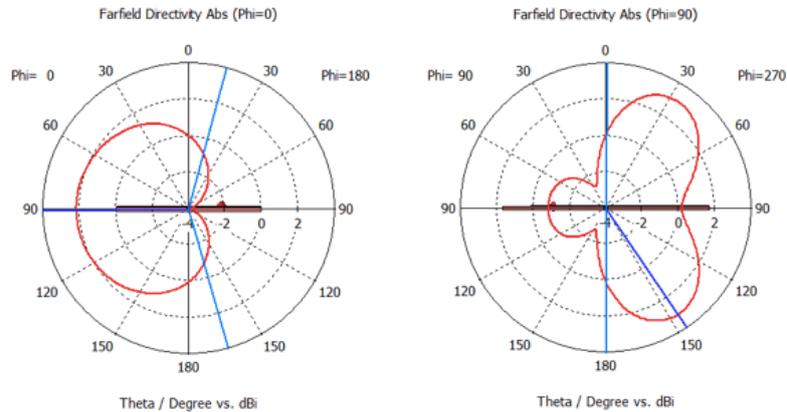


Fig. 115. Cortes en el plano $\varphi = 0^\circ$ y $\varphi = 90^\circ$

Se presenta como último resultado relevante de la simulación de la antena, el diagrama de radiación 3D a la frecuencia de resonancia de 2400 MHz (Fig.116.). La directividad de la antena a esa frecuencia, 3.12 dBi.

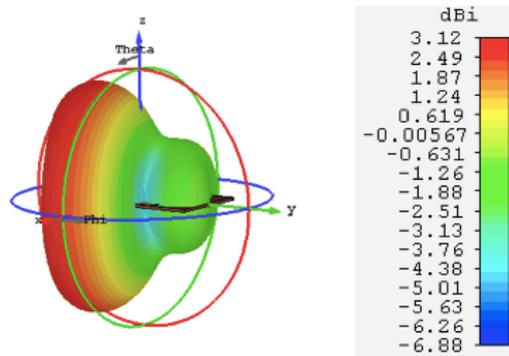


Fig. 116. Diagrama de radiación de antena IFA a 2400 MHz plano rectangular

Como se ha podido comprobar en este capítulo, todos estos diseños de antenas IFA pueden ser integradas en cualquier dispositivo *wearable*, gracias a su compactación y capacidad de fácil integración.

Se han presentado varios modelos adaptables a diversas frecuencias, y, en el caso de la frecuencia de trabajo de 2400 MHz, se han mostrado dos modelos, dependiendo de la tipología del plano sobre el que se implementa dicha antena.



6.4 Aplicaciones

En este proyecto se ha tratado de introducirse en la medida de lo posible en el estudio de las antenas que llevan integradas los terminales móviles a día de hoy.

Actualmente, el aumento de la demanda de servicios de telefonía móvil ha dado lugar a que sea necesario el diseño y uso de nuevas antenas que funcionen de manera eficiente en las bandas de frecuencias que están siendo nuevamente asignadas.

Para ello, han ido apareciendo nuevos estándares que dan soporte a estos nuevos servicios y sistemas tales como 3G, 4G o 5G. Además, se han de tener en cuenta que los terminales móviles pueden demandar otros servicios como Wi-Fi, GPS o Bluetooth.

En este proyecto se han propuesto diseños de antenas con altas prestaciones en las bandas de 868, 915 y 2400 MHz. Todos ellos aptos para su integración en dispositivos de tecnología *wearable*, dando lugar a un extenso abanico de posibilidades y nuevos diseños.

Presentan la capacidad de rediseño y adaptación para dispositivos de una nueva generación de terminales móviles venidera que traerá consigo la necesidad de incorporación de nuevas tecnologías, sin perder siempre el buen rendimiento y la óptima calidad de los mismos.

Capítulo 7. Conclusión y líneas futuras.

En este Trabajo Fin de Máster “Antenas para dispositivos móviles 5G e IoT” se ha llevado a cabo el diseño y simulación de diversos modelos de antenas con buena adaptación, sintonizables y fáciles de implementar con un buen ancho de banda.

Todos los diseños que han sido presentados se caracterizan por su simplicidad y su bajo coste, siendo novedosos, y, además, muy óptimos para su integración en dispositivos electrónicos orientados a las conexiones inalámbricas.

Se ha demostrado como con un simple hilo conductor metálico, partiendo de un elemento radiante monopolo enfrentado sobre el plano también conductor, es posible obtener una antena IFA con altas prestaciones y más compacta.

Esta demostración, gracias a la simulación de las mismas, también se ha implementado con tecnología impresa, donde los resultados obtenidos no han distado en gran cantidad de los correspondientes a la antena monopolo, antena L invertida, y antena F invertida situados enfrentados al plano de masa. Es por ello, por lo que en telefonía móvil se emplea esta tecnología impresa para desarrollar las antenas que compondrán el dispositivo.

Tras ello, se han presentado diversos modelos de antenas comerciales cerámicas tipo chip, las cuales se están introduciendo con fuerza en el mercado de la electrónica, gracias a sus buenas prestaciones en cuanto a ganancia y a eficiencia. Además de poseer unas dimensiones tan pequeñas que hacen que sean consideradas como antenas miniaturizadas. Se ha caracterizado una de estas antenas mediante la tecnología *meander-line*, donde con una red de adaptación en π , se han conseguido resultados verdaderamente buenos en comparación con los aportados en el datasheet de uno de los modelos de estas antenas comerciales.

Por último, se han presentado tres diseños de antena IFA sobre una misma placa de circuito impreso, con dieléctrico de iguales características eléctricas y dimensiones. Las frecuencias de resonancia escogidas para estos diseños han sido 868, 915 y 2400 MHz, respectivamente.

Además, se ha propuesto otro diseño de antena IFA apta para la frecuencia de trabajo de 2400 MHz, mismo diseño que en el caso anterior, pero con topología de plano conductor y dieléctricos que con respecto a los diseños anteriores.

De todos estos diseños mencionados anteriormente, destacar nuevamente, la simplicidad del método de alimentación y el rango de adaptación óptimo centrado en cada una de las frecuencias escogidas, lo que da lugar a un ancho de banda a considerar en este tipo de aplicaciones.

Como líneas futuras, proponer la fabricación de estos diseños ideales simulados y comprobar si los resultados obtenidos distan de los resultados que aportarían los diseños reales medidos.

Además, dichos diseños también se podrían optimizar. La posibilidad de incorporar otras técnicas de diseño u otros materiales, siempre con el fin de alcanzar una antena cada vez más compacta, simple, que aporte flexibilidad al diseño y que sea fácil de integrar en cualquier dispositivo móvil portátil orientado para comunicaciones inalámbricas.



Continuando con lo expuesto en este trabajo, se podría seguir con el estudio de la antena F invertida situada en otros puntos del plano. Además, sería de especial interés plantear un nuevo diseño que contenga una antena F invertida multibanda, que, incluso, sería posible de replicar y combinar sobre un mismo diseño, y hacer que sea posible su funcionamiento en diversas bandas de frecuencia simultáneamente.

Por último, como línea futura, también se podría proponer la apertura de otra línea de investigación que presente como objetivo el estudio de otros tipos de antenas que las mostradas en este proyecto, pero que posean la misma funcionalidad.

Capítulo 8. Bibliografía

- [1] Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C. K., and Zhang, J. C. (2014). « What Will 5G Be? ». *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32 (6), 1065-82
- [2] GSA Global Mobile Suppliers Association, « 5G Spectrum Bands », Feb 2017. [En línea]. Available: <https://gsacom.com/5g-spectrum-bands> [Último acceso: 21 Mayo 2019]
- [3] Morgado, A., Huq, K., M., S., Mumtaz, S., and Rodríguez, J. (2018). « A survey of 5G technologies: regulatory, standardization and industrial ». *Digital Communications and Networks*, 4 (2), 87-97.
- [4] Moreno, A. (2015). «Agrupación de Antenas Multihaz de Banda Ancha para Aplicaciones de Localización y Comunicaciones en las Bandas de Microondas». (Proyecto Final de Carrera). Dep. Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [5] CableFree, « 5G Frequency bands: Spectrum Allocations for Next-Gen LTE », Feb 2019. [En línea]. Available: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/4glte/5g-frequency-bands-lte/> [Último acceso: 24 Junio 2019]
- [6] Razavizadeh, S. M., Ahn, M., and Lee I. (2014). « Three-Dimensional Beamforming: A new enabling technology for 5G wireless networks ». *IEEE Signal Processing Magazine*, 31 (6), 94-101
- [7] Moreno, A. (2015). « Agrupación de Antenas Multihaz de Banda Ancha para Aplicaciones de Localización y Comunicaciones en las Bandas de Microondas ». (Proyecto Final de Carrera). Dep. Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [8] Ward, M., Van Kranenburg, R. and Backhouse, G. (2006) « RFID: Frequency, standards, adoption and innovation ». *JISC Technology and Standards Watch*, volume 5, 2006.
- [9] Dong, Y., Chen, Z., Fan, P., and Letaief, K. B. (2016). « Mobility-Aware Uplink Interference Model for 5G Heterogeneous Networks ». *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15 (3), 2231-44.
- [10] Chen, Z. N., Qing, X., See, T. S. P., and Toh, W. K. (2012). « Antennas for Wi-Fi Connectivity ». *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 100 (7), 2322-29.
- [11] Waterhouse, R. B. (2003). « Microstrip Patch Antennas: A Designer 's Guide ». [edited by] Waterhouse, R. B.
- [12] CST Computer Simulation Technology GmbH, « CST Computer Simulation Technology », Dassault Systemes, 2018. [En línea]. Available: <https://www.cst.com/products/csts2>. [Último acceso: 28 Junio 2019]
- [13] Gemalto: a Thales company, « Red 5G – Características y usos de esta tecnología », Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.gemalto.com/latam/telecom/inspiracion/5g> [Último acceso: 12 Junio 2019]
- [14] Fractal Microsoft, « Las 9 aplicaciones más importantes del Internet de las Cosas (IoT) », 2019. [En línea]. Available: <https://www.fractal.com/blog/2018/10/10/9-aplicaciones-importantes-iot> . [Último acceso: 1 Julio 2019]
- [15] RedesZone, « Conoce todo sobre la tecnología 5G, el futuro de las redes móviles », Enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.redeszone.net/2019/01/07/tecnologia-5g-caracteristicas-avances-2/> [Último acceso: 21 Mayo 2019]
- [16] Página web del SIG (*Special Interest Group*) de Bluetooth: <http://www.bluetooth.com>, consultada en fecha 13/4/2019.
- [17] Página web del IEEE sobre el estándar 802.11: <http://www.ieee802.org/11/>, consultada en fecha 13/4/2019.



- [18] Página web del IEEE sobre el estándar 802.16: <http://grouper.ieee.org/groups/802/16/index.html>, consultada en fecha 13/4/2019.
- [19] Página web del IEEE sobre el estándar 802.15.4: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>, consultada en fecha 15/4/2019.
- [20] Página web de la organización Wimedia Alliance, organismo que promueve la adopción del estándar UWB: <http://www.wimedia.org>, consultada en fecha 15/4/2019.
- [21] IEEE Antennas and Propagation Society. (2014). « IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas ». *IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Std 145-2013*.
- [22] Pozar, D. M. (2012), « *Microwave engineering* », University of Massachusetts at Amherst, United States, John Wiley & Sons, 4th ed.
- [23] Cardama, A., et al. (2002), « *Antenas* », Universitat Politècnica de Catalunya, España, Edicions UPC 2nd ed.
- [24] Balanis, C. A. (2016), « *Antenna theory: analysis and design* », New Jersey, United States, John Wiley & Sons, 4th ed.
- [25] Stuzman, W. L., and Thiele, G. A. (2012), « *Antenna Theory and Design* », United States, John Wiley & Sons, 3rd ed.
- [26] Ferrando, M., y Valero, A. « *Antenas microstrip* », Dep. Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [27] Anguera, J., Andújar, A., Huynh, M., Orlenius, C., Picher, C. and Puente, C. (2012). « *Advances in Antenna Technology for Wireless Handheld Devices* ». *International Journal of Antennas and Propagation*, volume 2013.
- [28] MUYCANAL, « *Inicios, evolución y futuro del teléfono móvil* », Enero 2014. [En línea]. Available: <https://www.muycanal.com/2014/01/31/futuro-del-telefono-movil> [Último acceso: 2 Mayo 2019]
- [29] Puri, S., Kaur, K. and Kumar, N. (2014). « *A Review of Antennas for Wireless Communication Devices* ». *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, volume 2 (3), September 2014.
- [30] Secmen, M. (2011). « *Multiband and Wideband Antennas for Mobile Communication Systems* ». *Electrical and Electronics Engineering Department, Yasar University, Turkey*.
- [31] Zhang, Z., (2017), « *Antenna design for mobile devices* », John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, Singapore.
- [32] Martínez, M., (2003), « *Antenas integradas para terminales móviles de tercera generación* », (Tesis Doctoral). Dep. Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [33] González – Arbesú, J., Blanch, S. and Romeu, J. (2003), « *Are Space-Filling Curves Efficient Small Antennas?* ». *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, volume 2, 2003.
- [34] Moon, J. and Park, S. (2003), « *Small Chip Antenna for 2.4/5.8 GHz Dual ISM-Band Applications* ». *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, volume 2, 2003.
- [35] Ghosh, I. S., Hilgers, A., Schlenker, T. and Porath, R. (2001), « *Ceramic microwave antennas for mobile applications* ». *Journal of the European Ceramic Society*, 21 (2001) 2621 – 2628.
- [36] Página web de Digikey, distribuidor de componentes electrónicos: <https://www.digikey.es/es/product-highlight/j/johanson-tech/miniature-rf-ceramic-chip-antenna>, consultada en fecha 3/3/2019
- [37] Página web de Direct Industry, distribuidor de componentes electrónicos: <http://www.directindustry.es/prod/wuerth-elektronik-eisos/product-40615-512712.html>, consultada en fecha 17/3/2019



- [38] Comunicaciones Inalámbricas Hoy, «Antena Cerámica de 2.4 GHz », Junio 2015. [En línea]. Available: <https://www.comunicacionesinalambricashoy.com/antena-ceramica-de-2-4-ghz-miniatura/> [Último acceso: 15 Mayo 2019]
- [39] Lai, H. and Luk, K. (2007), « Wideband Patch Antenna Fed by Printed Meandering Strip », *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 50, No 1, pp. 188-192, 2008.
- [40] Página web de Johanson Technology, datasheet 868 MHz Antenna for small form factor applications: <https://www.johansontechnology.com/datasheets/0868AT43A0020/0868AT43A0020.pdf>, consultada en fecha 1/7/2019