



DISEÑO ANTENAS RANURADAS DE BAJO PERFIL PARA APLICACIONES 5G/IOT

Rafael Jordá Cascant

Tutor: Marta Cabedo Fabrés

Cotutor: Miguel Ferrando Rocher

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2021-22

Valencia, 5 de diciembre de 2021



Resumen

El objetivo de este TFG es diseñar antenas ranuradas para aplicaciones 5G/IoT. Se comenzará realizando un estudio del estado del arte y de las antenas más comúnmente empleadas en aplicaciones 5G e IoT. También se revisarán los fundamentos de radiación asociados a antenas de ranura tipo notch en las que se centrará el trabajo. Mediante el software de simulación CST, se evaluarán distintas topologías de antenas ranuradas con el objetivo de determinar como afectan a las prestaciones de las antenas variaciones de los diferentes parámetros del diseño . Para aislar la antena del entorno y conseguir que sea fácilmente integrable, el diseño de ranura final se integrará en una pequeña caja metálica, que ayudará a disminuir la radiación hacia atrás. A fin de demostrar la validez del diseño final propuesto, la antena se simulará en un entorno de aplicación realista, considerando los posibles tipos de superficie sobre los podría ser instalada y demostrando su inmunidad a la presencia de los mismos.

Resum

L'objectiu d'este TFG és dissenyar antenes ranurades per a aplicacions 5G/IoT. Es començarà realitzant un estudi de l'estat de l'art i de les antenes més comunmente empleades en aplicacions 5G i IoT. També es revisaran els fonaments de radiació associats a antenes de ranura tipus notch en les que se centrarà el treball. Per mitjà del programari de simulació CST, s'avaluaran distintes topologies d'antenes ranurades amb l'objectiu de determinar com afecten les prestacions de les antenes les variacions dels diferents paràmetres del disseny . Per a aïllar l'antena de l'entorn i aconseguir que siga fàcilment integrable, el disseny de ranura final s'integrarà en una xicoteta caixa metàl·lica, que ajudarà a disminuir la radiació cap arrere. A fi de demostrar la validesa del disseny final proposat, l'antena se simularà en un entorn d'aplicació realista, considerant els possibles tipus de superfície sobre els podria ser instal·lada i demostrant la seua immunitat a la presència dels mateixos

Abstract

The objective of this TFG is to design slotted antennas for 5G / IoT applications. A study of the state of the art and of the antennas most commonly used in 5G and IoT applications will be carried out. The fundamentals of radiation associated with notch-type slot antennas, on which the work will focus, will also be reviewed. Using the CST simulation software, different topologies of slotted antennas will be evaluated in order to determine how variations of the different parameters influence the performance of the antenna. To isolate the antenna from the environment and make it easily integrable, the final slot design will be integrated into a small metal box, which will help reduce backward radiation. In order to demonstrate the validity of the final proposed design, the antenna will be simulated in a realistic application environment, considering the possible types of surface on which it could be installed and demonstrating its immunity to their presence



Índice

Capítulo 1. Introducción	3
1.1 Motivación y Objetivos	3
1.2 Contexto	3
1.3 Metodología	3
Capítulo 2. Introducción a IoT	5
2.1 IoT	5
2.2 Tecnologías usadas en IoT	6
2.2.1 IEE 802.11	6
2.2.2 RFID	6
2.2.3 ZigBee	7
2.2.4 Bluetooth	7
2.2.5 5G	8
Capítulo 3. Antenas para IoT	9
3.1. Parámetros de Antenas	9
3.1.1 Parámetros en Recepción	9
3.1.2 Parámetros en Recepción	11
3.2 Antenas utilizadas en Iot y 5G	12
3.2.1 Antena IFA	12
3.2.2 Antena Microstrip	13
3.2.3 Antenas de ranura y notch	14
3.3 Historia y Estado del Arte antenas de ranura	18
Capítulo 4. Antena <i>notch</i> básica	22
Capítulo 5. Antena <i>notch</i> en L	29
Capítulo 6. Antena notch T	33
Capítulo 7. Estudio efecto Caja	37
Capítulo 8. Diseño Final	42
Capítulo 9. Conclusiones	46
9.1 Líneas Futuras	46
Capítulo 10. Bibliografía	48



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TELECOM ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

Capítulo 1. Introducción

1.1 Motivación y Objetivos

En la bibliografía disponible es posible encontrar multitud de antenas de bajo perfil para aplicaciones IoT, como es el caso de las *microstrip*, de las variaciones del dipolo clásico como las ILAs, IFAs o su versión impresa las PIFAs. Pero todos estos tipos de antenas si bien presentan diseños compactos y fácilmente integrables además de buenos comportamientos radiantes, todas tienen inconvenientes, las *microstrip* presentan anchos de banda estrechos y las IFAs se desintonizan con los materiales del entorno. Y todo esto evidentemente supone un problema en la mayoría de las aplicaciones de IoT, ya que a la hora de diseñarlos hay que tener en cuenta la geometría y los materiales del dispositivo en el que se va a integrar la antena si se quiere realizar un diseño óptimo.

Al detectar este problema común en las antenas IoT, la antena propuesta final de este proyecto se realizará sobre una caja metálica que disminuirá la radiación hacia atrás del diseño permitiendo así, reducir la influencia de los diferentes materiales del entorno.

Para resolver este problema en este proyecto se estudiarán las antenas ranuradas sobre cavidad abierta, las llamadas antenas *notch*. Estas son resonadores en $\lambda/4$ que surgen como variación de las antenas de ranura clásicas.

Por lo tanto, el objetivo principal de este proyecto será entender cómo se comportan las antenas de tipo *notch* y cómo afecta la introducción de la caja metálica, con el fin de conseguir un diseño final válido en aplicaciones IoT.

1.2 Contexto

Aunque el término IoT se definió hace décadas, es en los últimos años cuando ha cobrado más importancia, hasta tal punto que se calcula que en dos años habrá 18 mil millones de dispositivos conectados. La razón principal por la que el IoT ha podido desarrollarse tanto es debido a la introducción de las redes de tecnología móvil de quinta generación el 5G, que entre otras cosas permite más velocidad y más capacidad de tráfico que la antigua generación el 4G.

Por esta razón cada vez es más alta la demanda de antenas de bajo perfil que puedan funcionar en aplicaciones 5G/IoT. Las antenas de tipo *notch* ya mencionadas presentan una estructura compacta y son fácilmente integrables, lo que las hace viables en aplicaciones IoT.

1.3 Metodología

Para conseguir los objetivos descritos anteriormente se ha hecho uso de la siguiente metodología:

En primer lugar, se ha realizado un estudio del estado del arte que abarca una búsqueda bibliográfica de las antenas más empleadas en aplicaciones IoT y sus limitaciones en cuanto a ancho de banda, diagramas de radiación y eficiencia. Además, se ha hecho hincapié en la teoría, historia y estado de las antenas de ranura y *notch* que son el eje principal sobre el que gira este proyecto.

Seguidamente se han realizado análisis y simulaciones de las antenas de tipo *notch*. Dentro de estas simulaciones se incluye un análisis paramétrico de las distintas variables principales de la antena, análisis de variantes de la antena de tipo *notch* y finalmente un análisis de como influye el acoplar este tipo de antenas sobre una la caja metálica y su efecto a la exposición sobre diferentes materiales.

Todas las simulaciones descritas se han realizado con el software comercial de simulación electromagnética CST Microwave Studio.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TELECOM ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN

2.2 Tecnologías usadas en IoT

Debido a la gran importancia de IoT en la actualidad y su constante evolución será necesario para su desarrollo una tecnología que esté ampliamente establecida. También es indispensable que la comunicación sea inalámbrica ya que el uso de cable aumentaría mucho el coste de la instalación y evidentemente supondría muchos problemas de movilidad.

A continuación, se analizan los medios más usados en IoT, con sus características.

2.2.1 IEE 802.11

El IEE 802.11 o WIFI es la tecnología de comunicación inalámbrica más extendida y conocida en el mundo que trabaja en las bandas ISM de 2.4 GHz y 5 GHz. El primer estándar, creado en 1997 bajo el nombre de IEE 802.11.a, podía llegar a alcanzar una velocidad máxima de 54 Mbps, hoy en día debido a la importancia que tienen las redes WIFI se pueden llegar a lograr velocidades de hasta 9.6 Gbps, con la creación del último estándar IEE 802.11.ax en 2018. El rango de este último estándar es de unos 45 metros en interior y hasta 100 metros en exteriores.

La trascendencia de las redes Wifi y su extensión en todo el mundo hace que sea y vayan a ser importantes en IoT, principalmente en aplicaciones que necesiten un gran ancho de banda, pero debido al consumo de energía de estas redes y a sus limitaciones de rango, WIFI parte con desventaja respecto a sus competidores, Bluetooth, BLE y Zigbee, en las aplicaciones con sensores IoT. Este es el principal motivo por el cual en 2017 se crea la tecnología WIFI HaLow o IEE 802.11.ah [4], que consume menos energía que las tecnologías nombradas anteriormente, puede tener un alcance de hasta 1.5 km y una velocidad máxima de 15 Mb/s. En la Figura 3 se muestra una imagen con algunos de los campos de aplicación.

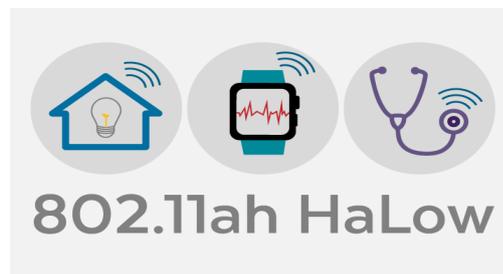


Figura 3. Ejemplo de aplicaciones WIFI HaLow [5]

2.2.2 RFID

La identificación por radio frecuencia o RFID es una tecnología que utiliza las ondas de radio para transmitir datos. Para llevarlo a cabo se utilizan una especie de etiquetas que funcionan entre 135 KHz y 5.815 GHz. Las etiquetas pueden ser de tres tipos dependiendo de la alimentación y pueden trabajar en cinco bandas diferentes [6]. Los diferentes tipos y frecuencias de la tecnología RFID hace que las etiquetas tengan un gran potencial en IoT sobre todo en el ámbito de la identificación. A continuación, en la Tabla 1 y 2 se ven las principales características, usos y bandas de operación de las diferentes etiquetas.

Tipo	Pasivo	Semi-Pasivo	Activo
Alimentación	Cosechamiento energía	Batería	Batería
Comunicación	Respuesta	Respuesta	Inicio o Respuesta
Rango	10 m	>100 m	>100 m

Usos	Códigos EPC	Control electrónico de peajes	Seguimiento de paquetes grandes
Coste	→		

Tabla 1. Tipos de etiquetas RFID con sus características

Rango Frecuencias	LF	HF	UHF	Microondas	UWB
Frecuencia operación	120-140 KHz	13.56 MHz	868-928 MHz	2.45 y 5.8 GHz	3.1-10.6 GHz
Rango	10-20 cm	10-20 cm	3 m	3 m	10 m

Tabla 2. Frecuencias de operación de las etiquetas

2.2.3 ZigBee

Zigbee es una especificación basada en el estándar IEEE 802.15.4 para redes de área local. Es una tecnología de bajo coste y consumo que opera en las bandas ISM de 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz. La velocidad de transmisión de Zigbee es de 250 kbps y su rango de transmisión varía entre los 10 y los 100 metros. Además, en comparación con otras tecnologías inalámbricas como WIFI o Bluetooth, Zigbee resulta más barato y simple.

Las principales aplicaciones de Zigbee son la monitorización y los equipos de control, es por eso por lo que algunos de sus usos según [7] son: monitorización de pacientes en el ámbito de la medicina, sistemas de transporte inteligentes o el control de parámetros de los motores DC. Pero el principal uso de Zigbee es la domótica, es por ello por lo que está tomando tanta importancia en el IoT. En la Figura 4 vemos una imagen extraída de [8] del ZigBee en el control del hogar.



Figura 4. ZigBee en la domótica [8]

2.2.4 Bluetooth

Bluetooth es un tipo de tecnología diseñado para transmitir e intercambiar datos y voz en distancias cortas, además está pensado para dispositivos de bajo consumo. Se trata de una red inalámbrica de área personal (WPAN) que opera en la banda ISM de 2.4 GHz. En su creación en 1999 Bluetooth tenía una velocidad de transmisión de 721 kbps, en su última versión esta puede llegar hasta los 50 Mbps. El alcance de los dispositivos bluetooth varía según las diferentes clases, estos van desde los 0.5 metros hasta los 100 metros

Bluetooth juega un papel fundamental hoy en día en IoT, ya que muchos dispositivos electrónicos como puedan ser auriculares, relojes, o móviles utilizan esta tecnología. Además, con la reciente creación del Bluetooth Low-Energy (BLE) o Bluetooth Smart [9], que expande las aplicaciones del Bluetooth tradicional para poder usarse en dispositivos de baja energía como sensores, parece que bluetooth seguirá siendo importante en el IoT. En la Figura 5 vemos las distintas aplicaciones IoT de BLE.

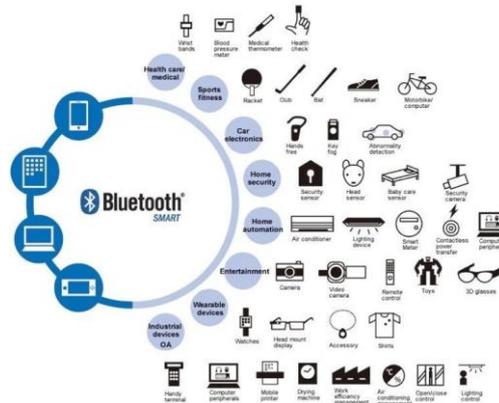


Figura 5. Aplicaciones IoT de Bluetooth.[10]

2.2.5 5G

La expansión y futuro desarrollo del IoT no se puede entender sin el crecimiento reciente de las redes móviles y su quinta generación, el 5G. El 5G cumple algunas características que ayudarán al avance definitivo del IoT como son la baja latencia, velocidad y mayor capacidad de red.

Las características principales que incluyen las redes 5G son una velocidad de 10 Gbit/s que en condiciones ideales puede llegar a 20 Gbit/s, velocidad de datos de usuario de 100 Mbit/s, capacidad para soportar 1 millón de dispositivos conectados por km², latencias de 1 ms, una eficiencia espectral 3 veces mayor que las de las IMT-Avanzadas, movilidad máxima de 500 km/h y mejora de la eficiencia energética [11]. Para hacernos una idea de lo que suponen estos números en la Figura 6 vemos la comparación de los parámetros mencionados respecto a las redes de antigua generación.

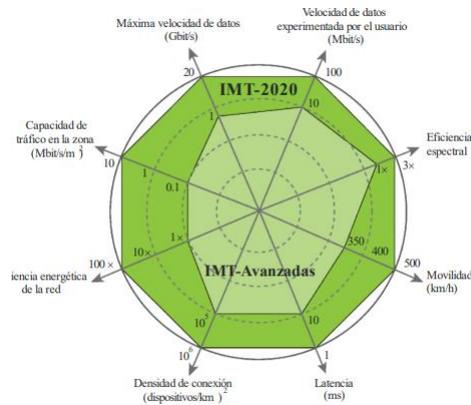


Figura 6. Comparación 5G y LTE-advanced [11]

En noviembre de 2016 el Radio Spectrum Policy Group (RSPG) definió las bandas que usaría el 5G en la Unión Europea estas son la banda de 3.4-3.8 GHz considerada la principal para el despliegue 5G, la banda de 700 MHz y por encima de 6 GHz la banda de 26 GHz para alta transmisión de datos.

Capítulo 3. Antenas para IoT

Según el “Iec Standard Definitions of Terms of Antennas” [12] una antena es la parte de un sistema de transmisión o recepción diseñado para radiar o recibir ondas electromagnéticas, es decir la región de transición entre el espacio libre y un dispositivo guiado.

Todas las ondas vienen determinadas por su frecuencia (f) y longitud de onda (λ), que se relacionan mediante la velocidad de propagación en el medio siendo normalmente la velocidad de la luz (c). Dentro de las radiocomunicaciones están definidas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) una serie de bandas de frecuencia, cada una con sus aplicaciones y normalizaciones. (Tabla 3)

Banda	Denominación	Frecuencias	Longitud de onda
ELF	Extremely Low Frequency	<3 kHz	>100 km
VLF	Very Low Frequency	3-30 kHz	100-10 km
LF	Low Frequency	30-300 kHz	10-1 km
MF	Medium Frequency	0.3-3 MHz	1000-100 m
HF	High Frequency	3-30 MHz	100-10 m
VHF	Very High Frequency	30-300 MHz	10-1 m
UHF	Ultra High Frequency	0.3-3 GHz	100-10 cm
SHF	Super High Frequency	3-30 GHz	10-1 cm
EHF	Extremely High Frequency	30-300 GHz	10-1 mm

Tabla 3. Nomenclatura de las bandas de frecuencia

Cada una de las antenas tienen una serie de parámetros que la permiten caracterizar y evaluar su comportamiento dentro de un determinado sistema, algunos de estos parámetros se describen a continuación:

3.1. Parámetros de Antenas

3.1.1 Parámetros en Recepción

Impedancia

Como podemos considerar una antena como parte de un circuito podremos definir alguno de los parámetros habituales de la teoría de circuitos como es la impedancia, por lo tanto, la impedancia será la relación entre la tensión y la corriente, tendrá una parte real y una parte imaginaria (Ecuación 3.1) llamadas resistencia y reactancia respectivamente.

$$Z_a = R_a + jX_a = R_r + R_\Omega + jX_z \quad (3.1)$$

La resistencia de antena se puede descomponer en dos términos, la resistencia de radiación y la de pérdidas. Con estos dos parámetros podemos definir la eficiencia óhmica que es la relación entre la potencia radiada y la entregada a la antena. (Ecuación 3.2)

$$\eta = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega} \quad (3.2)$$

Directividad y Ganancia

La directividad (D) de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría a esa misma distancia una antena isotrópica que radiase la misma potencia. En la Figura 7 podemos ver el concepto de forma gráfica.

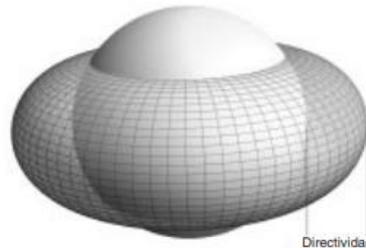


Figura 7. Directividad de una antena [13]

Un parámetro estrechamente relacionado con la directividad es la ganancia (G), que tiene la misma definición, pero la relación se establece con la potencia entregada a la antena. Ambos parámetros se pueden relacionar mediante la eficiencia óhmica conforme a la Ecuación 3.3.

$$G(\theta, \phi) = D(\theta, \phi)\eta_{\Omega} \quad (3.3)$$

Diagramas de radiación

El diagrama de radiación es la representación gráfica de las características de radiación de las antenas. Existen tres tipos de ellos, isotrópico cuando la radiación es idéntica en todas las direcciones del espacio, omnidireccional cuando el diagrama de radiación es igual en todas las direcciones de un plano y directivo cuando hay una dirección predominante de radiación. (Figura 8)

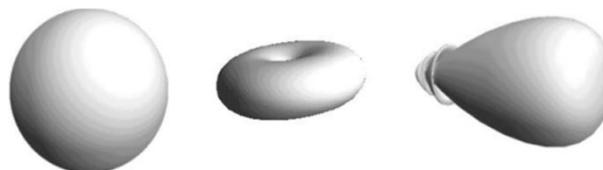


Figura 8. Tipos de diagramas de radiación [14]

Hay varios parámetros de radiación que se pueden representar como el campo eléctrico o la polarización, pero lo más común es representar la densidad de potencia radiada expresada en W/m^2 . Las formas más comunes de representación son las gráficas tridimensionales que nos permiten visualizar el diagrama completo y las representaciones en dos dimensiones que nos dan los cortes del diagrama en un determinado plano.

Es importante destacar los denominados planos E y planos H que son los cortes del diagrama de radiación en los planos más importantes. El plano E es definido por la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección, mientras que el plano H es el definido por la dirección de máxima radiación y el campo magnético en dicha dirección.

Dentro de los diagramas los parámetros más destacados son el ancho de haz a $-3dB$ que es la separación angular de las direcciones donde el diagrama de radiación de potencia toma el valor mitad del máximo. Otro parámetro importante es el nivel lóbulo principal al secundario (NLPS).

Polarización

La polarización se define como la orientación del vector campo eléctrico de la señal emitida por la antena. En base a esto podemos definir tres tipos de polarizaciones: lineal, circular y elíptica (Figura 9). La polarización lineal es cuando el máximo y mínimo del vector campo E está definido en la misma recta, si el vector campo E gira de forma que describe un círculo se denomina polarización circular y finalmente el caso más común es cuando el vector describe una elipse. En circular y elíptica podemos diferenciar polarización a derechas o a izquierdas en función de si el vector gira en sentido horario o antihorario.

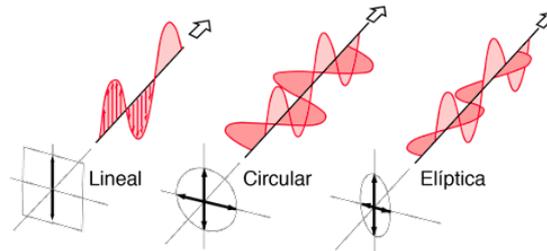


Figura 9. Tipos de polarizaciones [15]

Ancho de Banda

El ancho de banda de una antena (BW) es el intervalo de frecuencias en el que un parámetro de la antena no sobrepasa unos límites predefinidos. Se suele expresar como se expone en la ecuación 3.4.

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_o} \quad (3.4)$$

f_{max} y f_{min} son el margen de frecuencias máximo y mínimo donde se cumplen las restricciones acotadas y f_o la frecuencia central.

3.1.2 Parámetros en Recepción

Adaptación

La adaptación de una antena es la relación entre la impedancia de la antena (Z_a) y la impedancia de carga (Z_L). Si queremos conseguir una máxima transferencia de potencia las dos impedancias deben ser complejas conjugadas entre si $Z_L = Z_a^*$.

Área y longitud efectiva.

El área efectiva (A_{ef}) se define como la relación entre la potencia recibida y la densidad de potencia de la onda incidente (Ecuación 3.5).

$$A_{ef} = \frac{P_L}{\rho_{in}} \quad (3.5)$$

Para antenas en las que el cálculo del área pueda ser complejo, como en los dipolos o hilos, se define la longitud efectiva como la relación entre la tensión en circuito abierto y la amplitud del campo incidente (Ecuación 3.6).

$$l_{ef} = \frac{V_{ca}}{E} \quad (3.6)$$

Parámetros de dispersión

Además de los parámetros en recepción y transmisión también es importante conocer los parámetros de dispersión. Se definen como los coeficientes de transmisión y reflexión entre la onda incidente y la reflejada. En circuitos de alta frecuencia al no poder obtener las corrientes y tensiones de forma adecuada se utilizan estos parámetros para describir el comportamiento del circuito. En la matriz de parámetros S el S_{11} es el coeficiente de reflexión a la entrada, S_{22} el coeficiente de reflexión a la salida, S_{21} la ganancia de transmisión directa y S_{12} la inversa (Figura 10).

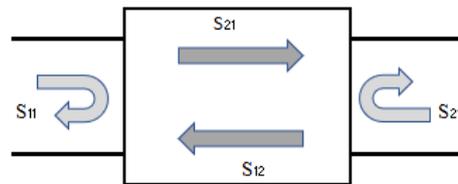


Figura 10. Esquema básico de parámetros S_{11}

3.2 Antenas utilizadas en Iot y 5G

Para que una antena sea útil en aplicaciones IoT debe cumplir dos condiciones básicas. La primera es el tamaño, para la mayoría de las aplicaciones esta es la característica fundamental, ya que en campos como los *wearables* o el *tracking* resulta evidente que si no se trabaja con antenas pequeñas se pierde toda utilidad. La segunda característica básica es la integración, y es que deben ser fácilmente integrables si se quiere conseguir un dispositivo compacto.

A continuación, se presentarán y explicarán varios tipos de antenas que junto con la antena de ranura son las más usadas en la actualidad para IoT.

3.2.1 Antena IFA

La antena f invertida (IFA) como su nombre indica tiene una forma similar a una “F”. La antena IFA surge como evolución de la antena ILA, su estructura es la de un monopolo doblado a la que se le ha añadido un *stub* en vertical para aumentar la impedancia. (Figura 11)

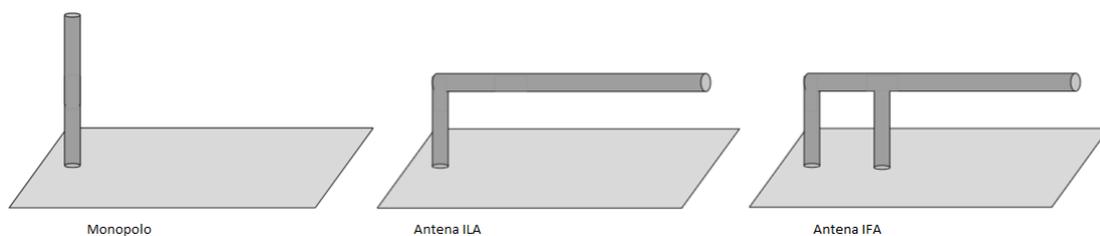


Figura 11. Evolución del monopolo hasta IFA

El equivalente circuital de esta antena es el de una línea resonante a $\lambda/4$ con un extremo acabado en cortocircuito y otro en circuito abierto. El *stub* mediante el cual se alimentará la línea se debe colocar a $\lambda/2$.

Alguno de las características principales de esta antena es su carácter omnidireccional, polarización lineal, anchos de banda estrechos y su fácil sintonía debido a la estructura propia de la antena. El principal problema que presenta esta antena es que se desintonizan muy fácilmente con materiales del entorno y con la interacción con el cuerpo humano.

Normalmente opera en las bandas sub-6 GHz y actualmente es la antena líder en IoT y dispositivos móviles principalmente debido a su fácil integración, fabricación y compactación. Dentro de las IFAs la variante más extendida es la *Printed IFA* que junto con la técnica de *meandering* se logran modelos incluso más compactos (Figura 12).



Figura 12. Ejemplos de PIFA en IoT

El principal problema de estas antenas es que se ven muy afectadas por el entorno, lo que supone que si bien en condiciones de espacio libre se obtienen buenos resultados al integrarse sobre un dispositivo se desintonizan y dejan de operar a la frecuencia deseada, obligando a realizar diseños *ad-hoc*.

3.2.2 Antena Microstrip

Las antenas *microstrip* o antenas de tipo parche consisten en un sustrato dieléctrico con un cierto grosor donde una de sus caras está completamente metalizada y en la otra se encuentra un parche metálico. Este tipo de antenas son relativamente modernos, alrededor de los años 70, y surgen por la necesidad de integrar una antena a circuitos impresos. (Figura 13).

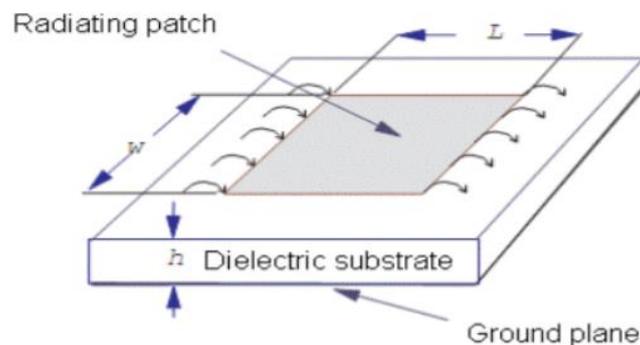


Figura 13. Estructura antena *microstrip* básica [16]

El grosor del sustrato suele tomar unos valores entre $0.003\lambda < h < 0.05\lambda$ y la constante dieléctrica entre $2.2 < \epsilon_r < 12$. En cuanto al parche las formas más habituales que suele tomar son la cuadrada, rectangular, en forma de dipolo o circular, pero también puede adoptar otras formas más complejas.

Existen varias formas típicas de alimentar estas antenas: mediante un cable coaxial que atraviesa el dieléctrico para conectarse al parche, con una línea microstrip desde un extremo hasta el parche, el llamado acoplamiento por ranura o el acoplamiento por proximidad.

Las principales ventajas de este tipo de antenas de bajo perfil son la robustez y facilidad de integración al poder ir fabricadas sobre circuitos impresos, también se puede destacar la sencillez de su diseño y el bajo coste que supone fabricarlas.

Son directivas y focalizan su radiación en el semiplano superior. La presencia de un plano de masa en su propia estructura minimiza la radiación hacia atrás asilando la antena del entorno. Por esto último es por lo que apenas se desintonizan al integrarse en un dispositivo, sin embargo, presenta problemas tales como baja eficiencia y ancho de banda estrecho.

Las ventajas de las antenas de parche superan ampliamente a sus desventajas es por eso por lo que se usan en tantos campos diferentes. Algunos de ellos son los siguientes: comunicaciones móviles y por satélite, aplicaciones GPS, RFID, telemedicina o incluso para el tratamiento de tumores malignos mediante microondas. [17].

Un ejemplo del aspecto de una antena *microstrip* comercial se puede ver en la Figura 14.

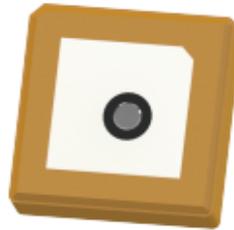


Figura 14. Antena *Microstrip* comercial

3.2.3 Antenas de ranura y *notch*

La estructura de las antenas ranuradas es muy simple, consiste en una lámina conductora con una ranura cortada que suele tener una longitud de $\lambda/2$ y un ancho mucho menor a $\lambda/2$ como se muestra en la Figura 15.

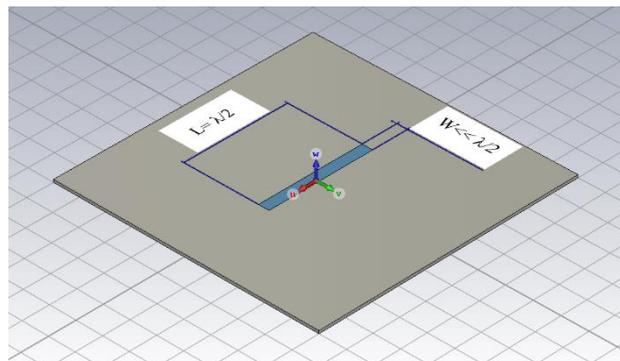


Figura 15. Estructura básica antena de ranura

Para entender el funcionamiento de este tipo de antena se tiene que recurrir al principio de Babinet. El principio de Babinet es un teorema óptico desarrollado por el físico francés Jacques Babinet que establece que, si al campo de visión detrás de una pantalla con una apertura (Caso 2) le sumas el campo de visión de su estructura complementaria (Caso 1), el resultado será el mismo que cuando no hay ninguna pantalla (Caso 3). Este principio lo podemos ver más claro en la siguiente imagen (Figura 16).

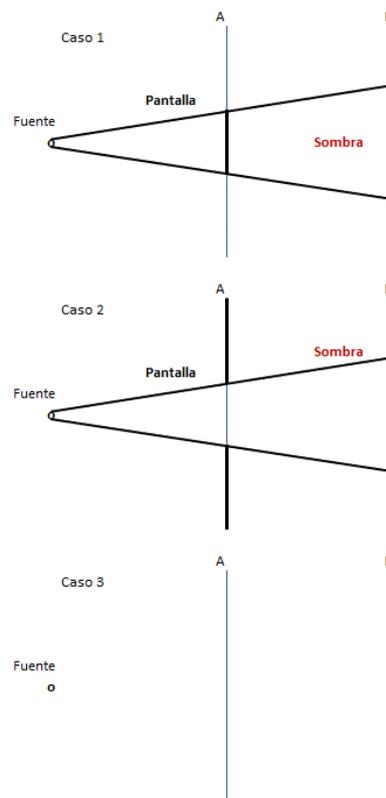


Figura 16. Principio de Babinet

Partiendo de este teorema óptico, en 1946 HG Booker [18] lo expandió y lo llevó a términos electromagnéticos. En este modelo se considera que las pantallas son planas, conductores perfectos e infinitesimalmente finas. Según este principio la estructura de una antena de ranura es complementaria a la estructura de un dipolo de media onda con las mismas dimensiones que la ranura (Figura 17). Además, si la ranura está realizada sobre un metal conductor perfecto ($\sigma = \infty$), su complementaria, el dipolo de media onda, tiene una permeabilidad infinita ($\mu = \infty$).

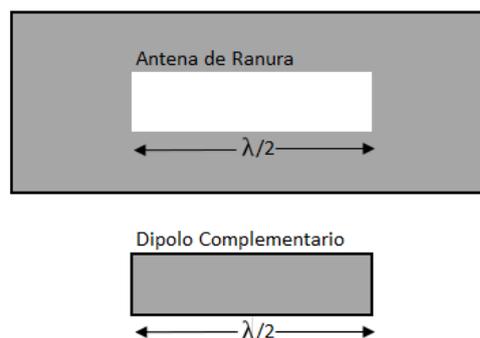


Figura 17. Antena de ranura y su complementaria.

Booker también explicó en [18] los diagramas de radiación de las antenas ranuradas. Estos son los mismos que en los dipolos de media onda al ser complementarios, omni-direccionales con forma de toroide, pero con dos diferencias. La primera diferencia es que todos los campos eléctricos y magnéticos se intercambian, esto soluciona el problema de que la antena complementaria debe ser un conductor perfecto de magnetismo ya que no hay materiales que cumplan con esta característica. La segunda diferencia es que el componente del campo eléctrico de

la ranura normal a la lámina es discontinuo de un lado al otro de la lámina, la dirección del campo se invierte [19], estas diferencias se pueden apreciar en la Figura 18.

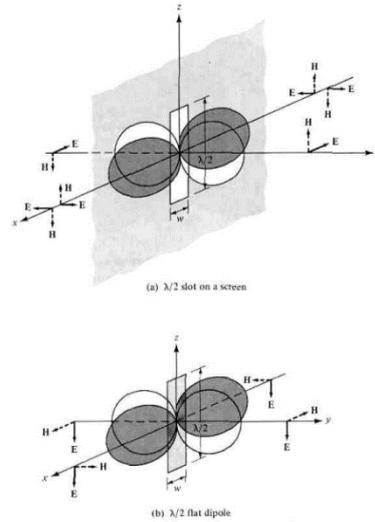


Figura 18. Comparación campos ranura y dipolo [20]

Finalmente, en su artículo Booker también estableció la relación entre las impedancias de la antena ranurada y su complementaria como se muestra en la siguiente Ecuación 3.7. (ecuación 1), donde Z_0 es la impedancia característica, Z_s la de la ranura y Z_d la impedancia del dipolo.

$$Z_s = \frac{Z_0^2}{4Z_d} \quad (3.6)$$

Las antenas ranuradas se pueden alimentar de varias formas. La primera con el uso de una línea de transmisión microstrip, la segunda de forma inductiva usando un cable coaxial y finalmente mediante una guía de onda (Figura 19). En [19] se explica que a la hora de realizar un diseño hay que tener en cuenta que en una ranura de $\lambda/2$ la impedancia en su centro es de unos 500Ω y como la impedancia de la alimentación suele ser de 50Ω , es mejor desplazar del centro la alimentación para que haya adaptación.

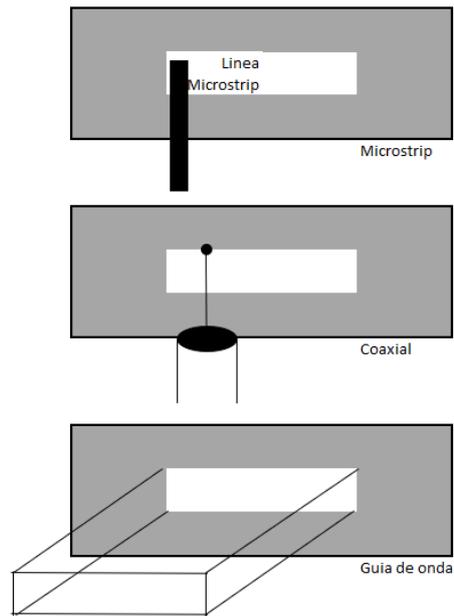


Figura 19. Tipos de alimentación antena de ranura

Las antenas de hendidura o *notch* son una variación de las de ranura. Las hendiduras se consiguen “cortando” una antena de ranura para así pasar de tener dos cortos circuitos en los extremos a uno corto y uno abierto (Figura 20), de modo que una línea de transmisión acabada en dos cortocircuitos resuena en $\lambda/2$ mientras que una acabada en circuito abierto y corto circuito resuena en $\lambda/4$. El hecho de que resuene en $\lambda/4$ permite a la hora de realizar un diseño disminuir considerablemente el tamaño respecto a las ranuras. Los circuitos equivalentes de los dos tipos se pueden ver en la Figura 21.

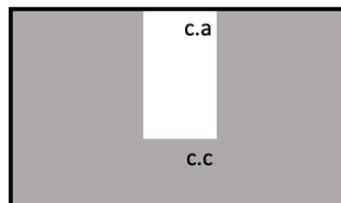


Figura 20. Estructura básica antena “notch”

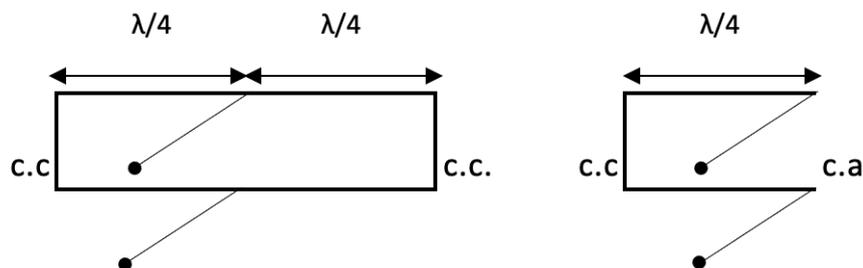


Figura 21. Circuitos equivalentes de la ranura y del notch

Estas antenas suelen operar entre 300 MHz y 30 GHz, es decir en las bandas de UHF, VHF y SHF. Son muy populares ya que por su estructura son fáciles de instalar en cualquier superficie, además su diagrama de radiación es omnidireccional con polarización lineal.

3.3 Historia y Estado del Arte antenas de ranura

Las antenas ranuradas fueron inventadas por el ingeniero inglés A. D. Blumlein. Su objetivo era crear un tipo de antena para transmisión de televisión VHF con polarización horizontal y con un patrón de radiación omnidireccional. Su patente consistía en un cilindro ranurado alimentado por una espira o por una línea de transmisión bifilar conectada a los extremos de la ranura. Este primer modelo es el que se muestra en la Figura 22.

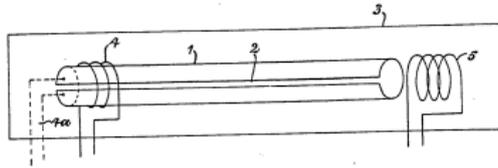


Figura 22. Antena Ranurada propuesta por Blumlein[21]

Fue H.G. Booker en 1946 en el artículo mencionado anteriormente [18] quien estudió y expandió el concepto de las antenas de ranura. En este documento el autor amplió el principio de Babinet para llevarlo a términos electromagnéticos, estableciendo así la relación de las impedancias y los diagramas de radiación entre las ranuras y los dipolos de media onda.

El desarrollo de las antenas de ranura siguió principalmente durante la segunda guerra mundial y el periodo de posguerra, es decir durante los años 40 y 50. En el capítulo 5 de [22] explica que este avance se produjo debido a la necesidad de antenas VHF y UHF con baja fricción aerodinámica para la aviación militar de la época. En [23] se pueden ver los primeros diseños de estas antenas en aplicaciones militares y se hace hincapié en que eran necesarias para las aeronaves de alta velocidad y el guiado de misiles.

Es precisamente en las aplicaciones militares donde las antenas *notch* tuvieron un papel más importante, sobre todo en aviación y misiles. Fueron tan populares ya que gracias a su propia estructura eran muy fáciles de adaptar en los fuselajes de la aviación militar, en la Figura 23 se muestra la disposición habitual de estas antenas en aviones.

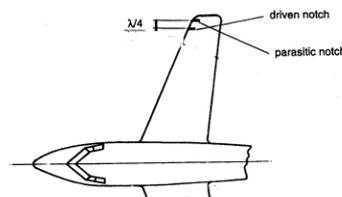


Figura 23. Antena notch en el ala de un avión [22]

En la década de los 80 se popularizaron las Tapered Slot Antennas (TSA), consisten en antenas ranuradas donde la dimensión de la ranura varía gradualmente. Existen varios tipos como la Vivaldi, LTSA o CWSA (Figura 24) que se diferencian en la forma del *taper*. En [24] el autor propone diferentes aplicaciones de estas antenas en la banda EHF como detectores de banda ancha o comunicaciones satelitales empleando agrupaciones de TSAs.

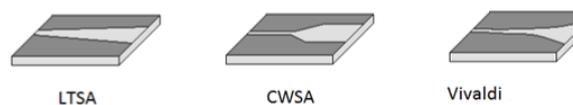


Figura 24. Diferentes tipos de TSAs

A finales de los años 90 y principios de los 2000 destaca la antena de ranura en forma de U (Figura 25), y es que durante esta época la demanda de antenas de banda ancha para usos en comunicaciones de alta frecuencia y velocidad era cada vez más grande.

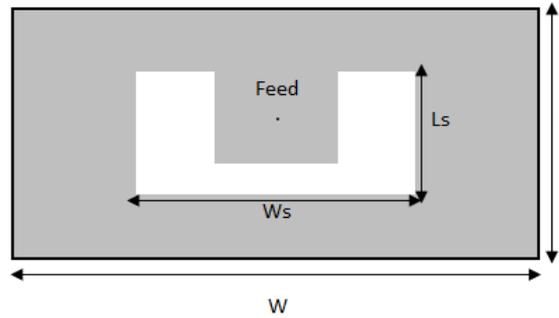


Figura 25. Estructura básica de una ranura en U.

Si bien las antenas de ranura eran fáciles de implementar gracias a su tamaño y estructura, su ancho de banda estrecho hacía imposible su uso en redes comerciales como 2.5G, WLAN o Bluetooth. Para aumentar el ancho de banda los investigadores propusieron varios métodos como introducir elementos parásitos o introducir estructuras multi capa, el problema de estos métodos es que se aumentaba considerablemente las longitudes de la antena eliminando así una de las principales ventajas de la antena de ranura. Es por ello que en 1995 T.Huynh y K.F.Lee en [25] presentaron la ranura en U consiguiendo así aumentar el ancho de banda sin aumentar las dimensiones. Desde entonces se han hecho numerosos estudios de esta variación como es el caso de [26] donde propone un diseño de banda ultra ancha. (Figura 26)

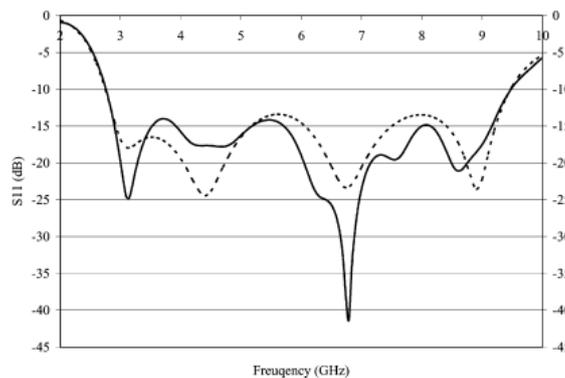


Figura 26. Parámetro S_{11} de [26]

De los últimos años podemos destacar artículos como [27] de 2019 en el cual el autor tiene como objetivo una antena de ranura que pueda funcionar a 28 GHz y 39 GHz, ya que esta es una banda del 5G como se ha comentado en el capítulo 2. El diseño en principio parece simple, pero tiene una peculiaridad, y es que la ranura está doblada 90°, con esto consigue dos resonancias distintas ya que la alimentación afecta a dos lados diferentes. En la Figura 27 se ve la estructura de la antena, donde la frecuencia alta se consigue con Ls_2 y la baja con la suma de Ls_2+Ls_1 .

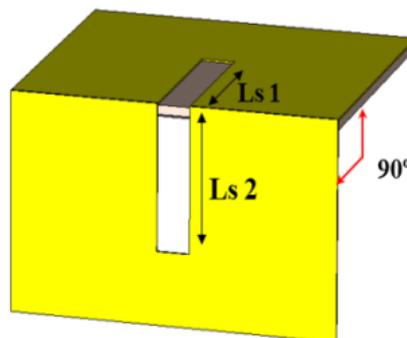


Figura 27. Modelo de la antena propuesta en [27]

Otro artículo reciente es [28], en él se diseña una antena ranurada integrada en una célula fotovoltaica para aplicaciones IoT, con el objetivo de disminuir el uso de las baterías de litio en este campo. La célula fotovoltaica está formada por tres capas, una rejilla de metal en la parte superior, una lámina de GaAs y un plano metálico que servirá como masa y es donde irá recortada la ranura. Con esta disposición de dimensiones 25 mm x 25 mm el autor logra cubrir de 5.6 a 5.94 GHz. En la Figura 28 por orden vemos la célula fotovoltaica, el plano de masa con el slot y una vista lateral del modelo.

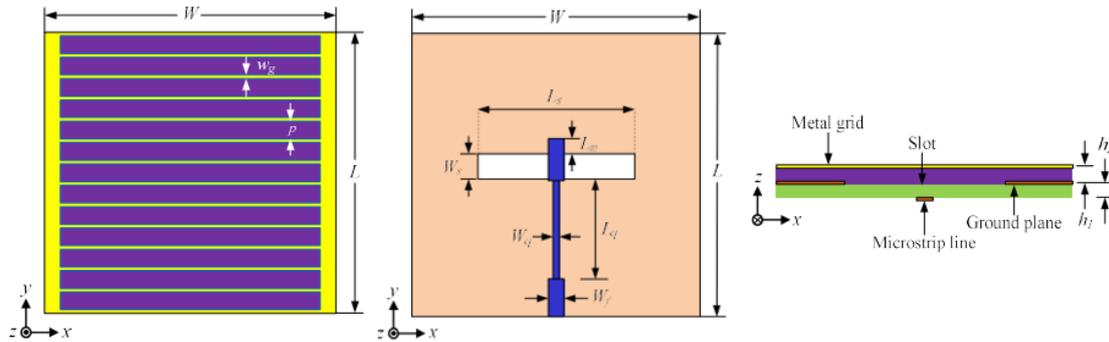


Figura 28. Disposición modelo de [28]

En la actualidad se siguen usando las antenas *notch* en los fuselajes de los aviones, este es el caso del artículo de 2020 [29], en el que los autores buscan integrar una antena en el avión de transporte EV-55, para trabajar en la banda VHF de aviación civil: 117.975-137 MHz. Su integración en el ala del avión se muestra en la Figura 29.

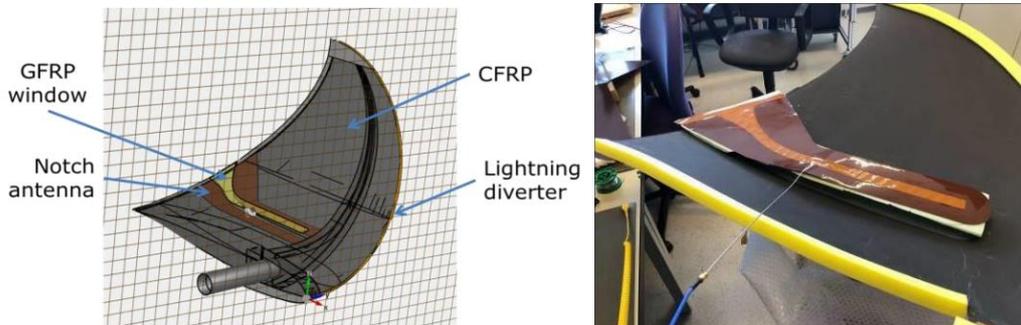


Figura 29. Antena notch integrada en ala de avión [29]

Finalmente, el punto de referencia de este trabajo es el artículo [30]. En él el autor diseña una antena *notch* de bajo perfil que opere en las bandas de 2.4 GHz y 5.8 GHz para aplicaciones *on-body*. El problema que se presenta con las antenas que están operando cerca del cuerpo humano es que el propio cuerpo desintoniza mucho la antena, para solucionar este problema los autores deciden crear una especie de caja con planos de masa disminuyendo así la radiación de la antena hacia el cuerpo. La estructura de la antena se muestra en la Figura 30.

Capítulo 4. Antena *notch* básica

Una vez presentados el contexto y objetivos del proyecto, en este capítulo se empezarán a diseñar modelos de antena *notch*. Para el diseño de la antena se ha empleado el *software CST Microwave Studio*.

Antes de empezar a diseñar una antena final válida se realizarán estudios paramétricos de las principales variables que están presentes en la antena. En este primer apartado se trabajará con una antena *notch* básica sobre un plano lo suficientemente grande como para considerarse infinito, como la mostrada en la Figura 33.

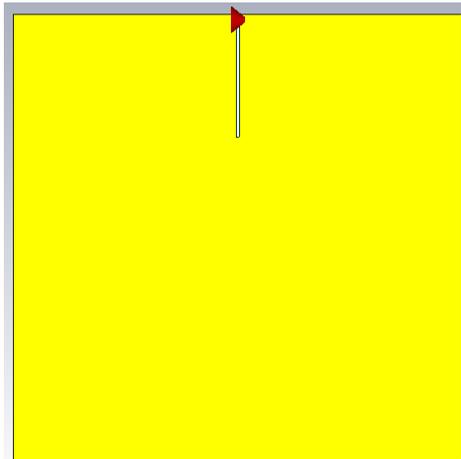


Figura 33. Estructura antena de partida

Como se ha comentado en la explicación de la antena de ranura en el capítulo 3.2.3, los parámetros más importantes de este tipo de antena son la longitud (L) y el ancho de la ranura (W).

Se empezará diseñando una antena de tipo *notch* que resuene a la banda típica de 2.4 GHz y posteriormente se analizará como afecta su longitud. Para ello como se ha mencionado en el capítulo 3 un *notch* es un resonador en $\lambda/4$, por lo que teóricamente la longitud será la calculada en la siguiente Ecuación 4.1

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f} = \frac{3e8}{4 \cdot 2.4e9} = 31.25 \text{ mm} \quad (4.1)$$

Con estas dimensiones, se consigue el resultado de la Figura 34 (gráfica roja). Esta gráfica muestra el parámetro S_{11} del diseño, este es especialmente importante ya que nos permite ver en que rango de frecuencias donde nuestro proyecto es funcional. El S_{11} nos indica la cantidad de energía que se refleja de la antena, para considerar que una antena trabaja a cierta frecuencia el parámetro S_{11} debe ser inferior a -10 dB lo que supondría que se refleja 1/10 de la potencia que le llega. En antenas para telefonía móvil se considera aceptable a partir de -6dB. Se puede apreciar que el resultado no es el esperado ya que este diseño se encuentra centrado en 4.33 GHz, para poder trabajar a 2.4 GHz se modificará la longitud del slot hasta aproximadamente 55mm. También se aprecia como al bajar en frecuencia aparece otra resonancia por el efecto del plano metálico.

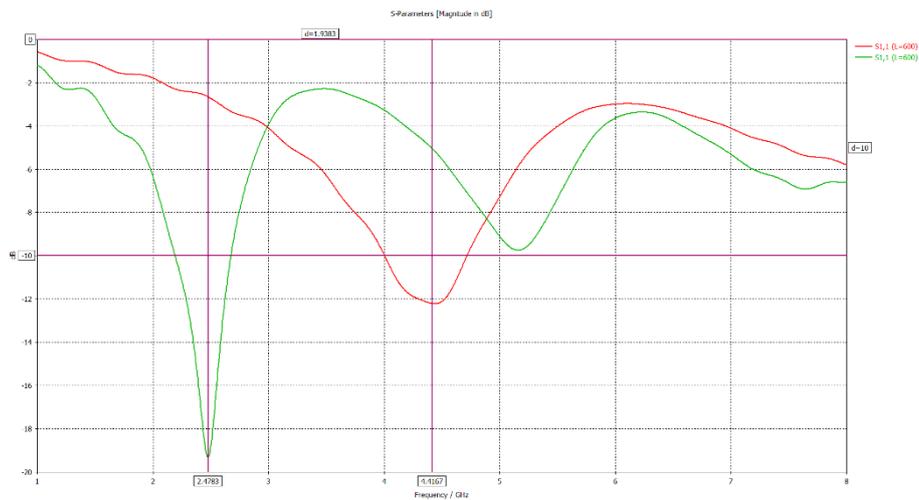


Figura 34. S_{11} a 31.25 mm y 55 mm

Una vez conocido el valor aproximado de la longitud del slot para 2.4 GHz se estudiará hasta qué punto el plano deja de comportarse como un plano infinito, con el objetivo de disminuir el tiempo de simulación de los resultados. En la Figura 35 se aprecia que, a partir de 400 mm, es decir un plano cuadrado $L \times W$ de 400x400 mm, el tamaño del conductor afecta a nuestro diseño y no se puede considerar infinito. Es por esta razón que durante las parametrizaciones de las dimensiones básicas se trabajará con un plano de 400x400 mm.

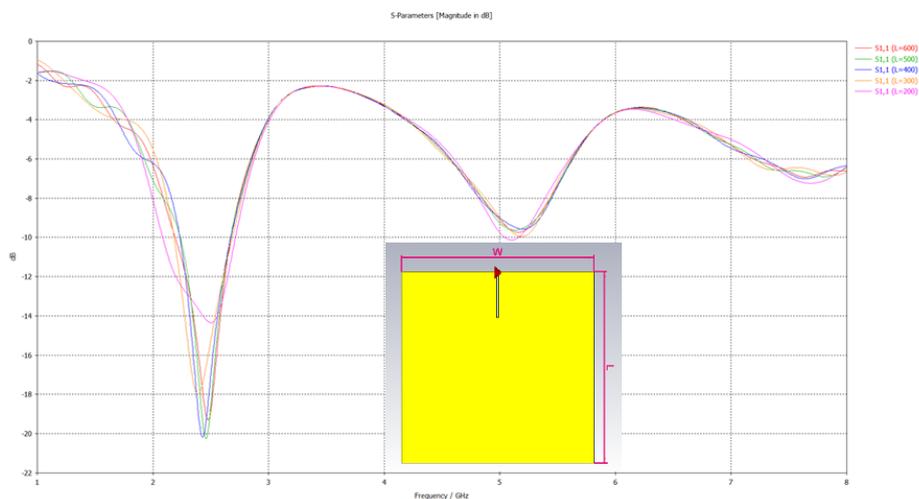


Figura 35. Estudio comportamiento plano infinito

Una vez definido el tamaño del plano y la longitud aproximada del slot a 2.4 GHz, ahora sí se empezará con la parametrización en concreto con la longitud del slot L_s . En la Figura 36 se muestra cómo afecta la variación de la longitud del slot a el coeficiente de reflexión. Como se ve, se obtiene el resultado que se esperaba, a longitudes mayores del slot (L_s) se consiguen frecuencias de trabajo más bajas.

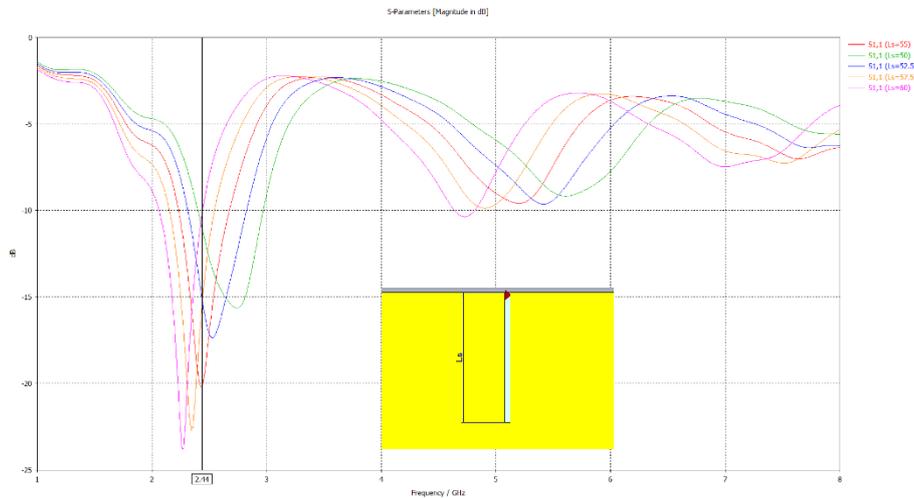


Figura 36. Parametrización longitud slot L_s

El siguiente parámetro para modificar será el ancho del *notch* (W_s). Como se ha comentado esta longitud debe ser mucho menor a $\lambda/2$, en este caso se partirá de 3 mm y se irá reduciendo de 0.2 en 0.2 mm para ver su comportamiento. En la Figura 37 se muestra el coeficiente de reflexión y como se aprecia variando W_s prácticamente no se modifica la frecuencia de trabajo, pero sí que puede ser útil a la hora de ajustar la banda a la que está funcionando el diseño. Vistos los resultados de la Figura 37 se tomará un valor de 2 mm para W_s ya que si bien se descentra un poco de 2.44 GHz se consigue un parámetro S_{11} de casi -45 dB y evidentemente 2.44 GHz está dentro de sus frecuencias de trabajo.

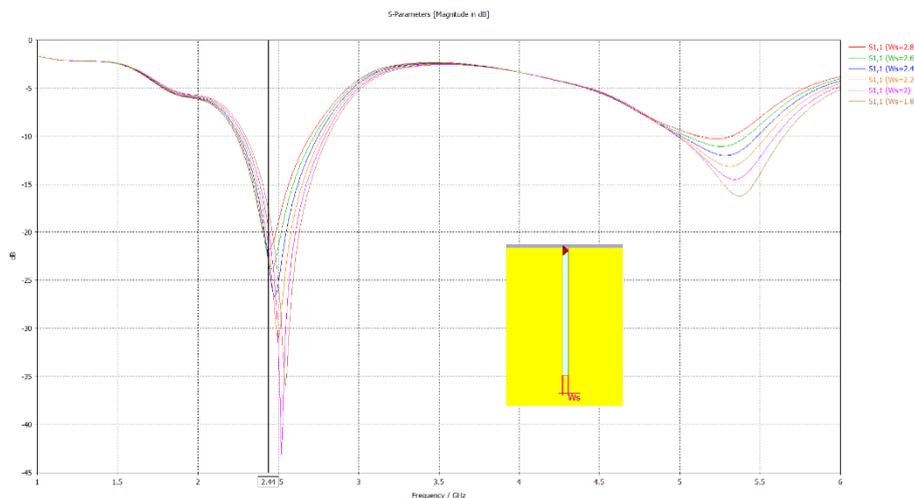


Figura 37. Parametrización ancho slot W_s

También se modificará la posición de la alimentación, para poder entender que es lo que ocurre. Al variar la posición de la alimentación se debe tener en cuenta dos hechos. El primero de ellos es, que como se ha venido comentando, a menor longitud del *notch* frecuencias más altas y, en consecuencia, si bajamos la posición de la alimentación en el slot disminuimos el recorrido que hará la corriente y es por eso por lo que en la Figura 38 se ve como a medida que se distancia la alimentación del inicio del slot ($y=0$) aumenta la frecuencia de operación. El segundo hecho para tener en cuenta es que acercar la alimentación al final del *notch*, aumentará la capacitancia y disminuirá la sección inductiva, ya que esta parte se corresponde con el cortocircuito.

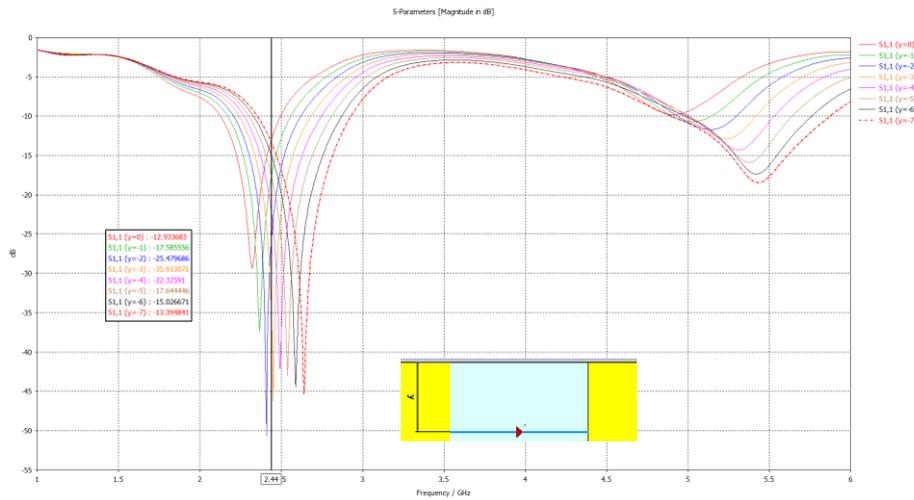


Figura 38. Parametrización posición alimentación y

Una vez estudiados los parámetros básicos sobre un plano infinito se disminuirán las longitudes de este. En primer lugar, se modificará la longitud del plano de masa. Se partirá de 120 mm y se reducirá hasta 60 mm de 5 en 5 mm. El resultado de estas simulaciones se muestra en la Figura 39. Como se aprecia la disminución de este parámetro no afecta prácticamente en nada al coeficiente de reflexión, por lo que para este primer capítulo de diseño se elegirá la menor posible, 60 mm. El hecho de que la longitud prácticamente no influya será de gran ayuda en el diseño final, ya que se podrá ajustar este parámetro prácticamente al máximo.

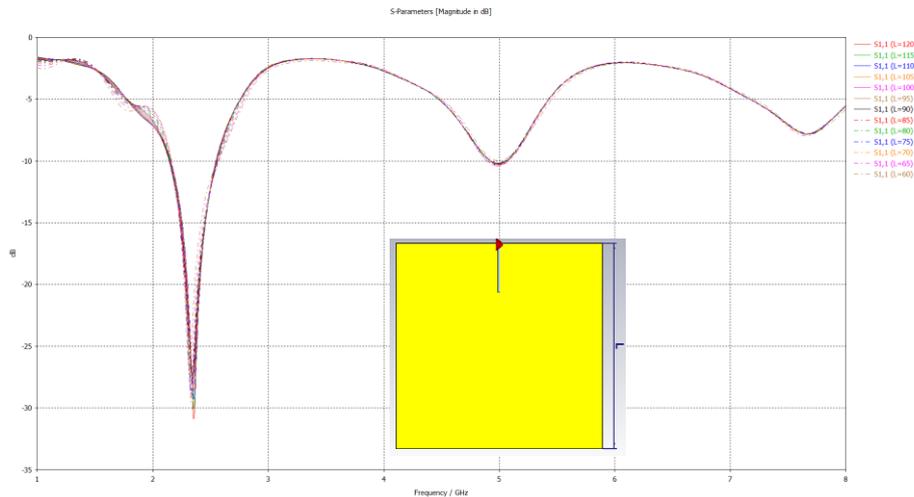


Figura 39. Reducción longitud plano de masa L

Seguidamente se analizará el efecto del ancho del conductor, en este caso se partirá de 100 mm y se reducirá hasta 35 mm con otra vez pasos de 5 mm. En la Figura 40 se ve el resultado de las simulaciones, donde se ve como claramente este parámetro si modifica en gran medida los resultados, de la imagen se puede concluir como a medida que se disminuyen las dimensiones se disminuye también la frecuencia de operación. Para este primer diseño básico se tomará el valor $W=90$ mm, que se mantiene centrado en 2.4 GHz.

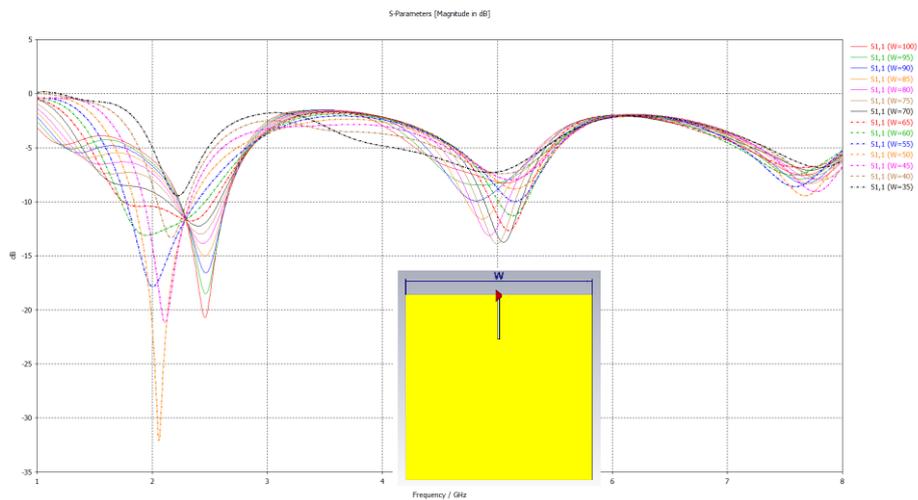


Figura 40. Reducción ancho conductor W

Finalmente, con las parametrizaciones realizadas en este primer capítulo se llega a una antena optimizada cuyo parámetro S_{11} se muestra en la Figura 41. En ella se ve como se consigue un ancho de banda bastante elevado de unos 0.416 GHz y relativo de 0.169 GHz con un parámetro S_{11} que sobrepasa los -16 dB.

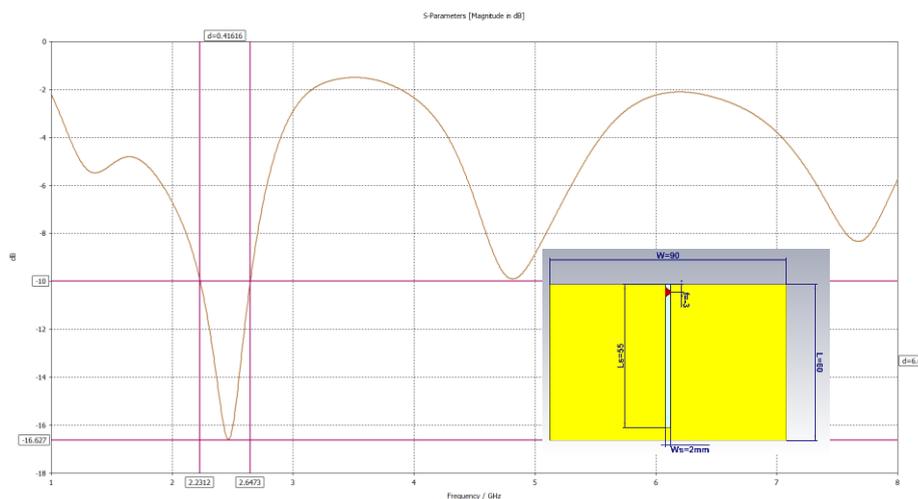


Figura 41. S_{11} de la antena optimizada

En la siguiente figura (Figura 42) se muestra la gráfica de la impedancia. Este tipo de gráfica permite entender de mejor manera como está funcionando el diseño. Es importante identificar donde están los cortes por 0 de la parte imaginaria ya que los cortes se corresponden con las resonancias y anti-resonancias. Los cortes donde la reactancia cruza el 0 de valores negativos a positivos se corresponden con resonancias. Los puntos donde la reactancia cruza el 0 de positivo a negativo se denominan anti-resonancias. En general en las resonancias la reactancia se mantiene más o menos estable, mientras que en las anti-resonancias la parte real es muy alta. Se considerará que la antena está adaptada cuando la parte imaginaria es 0 y la real está próxima a 50.

Dicho esto, en la Figura 42 se destacan tres resonancias a las frecuencias que nos interesan. La primera y segunda de ellas son anti-resonancias y la tercera es una resonancia a prácticamente 2.44 GHz donde la parte real está muy próxima a 50 por lo que se puede afirmar que existe buena adaptación.

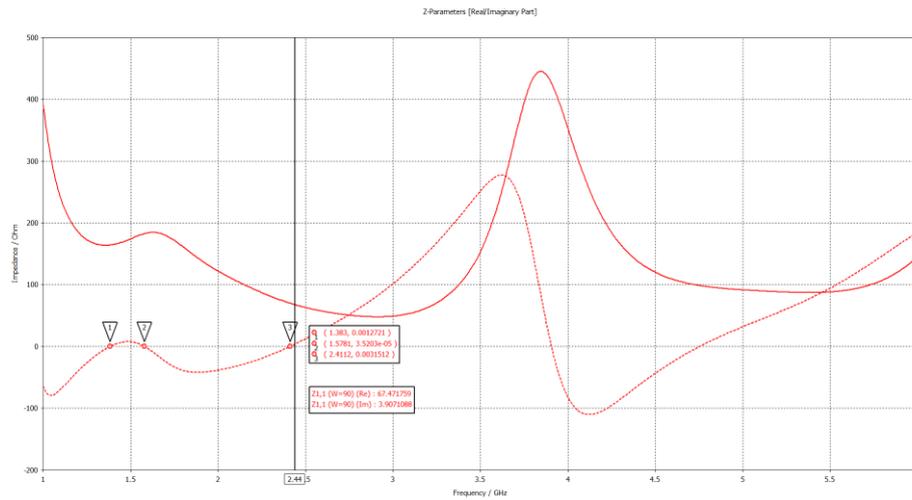


Figura 42. Impedancia de la antena optimizada

Para este primer diseño a continuación se muestra su comportamiento radiante en 2D en la Figura 43 y en 3D en la figura 44, donde se aprecia la radiación bidireccional de las antenas de ranura.

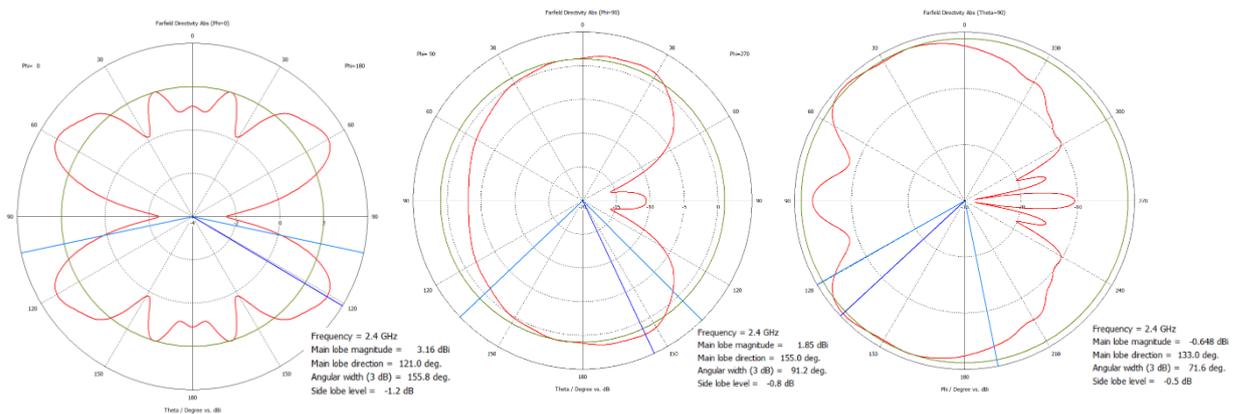


Figura 43. Diagramas de radiación 2D de la antena estudiada

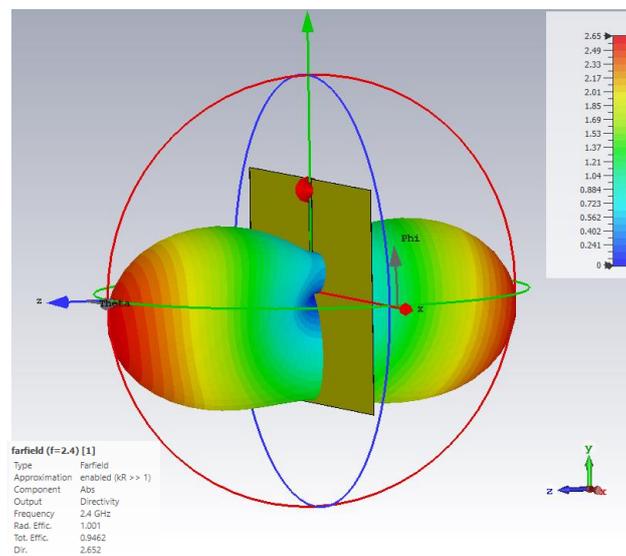


Figura 44. Diagrama de radiación 3D de la antena estudiada

Por último se ha analizado la eficiencia de radiación y la total de la antena optimizada se observa que en la primera banda de trabajo en la banda de 2.4 GHz, como se puede comprobar la eficiencia total (que incluye las pérdidas por desadaptación) es superior al 90% en toda la banda y toma valores próximos al 99% en la resonancia.

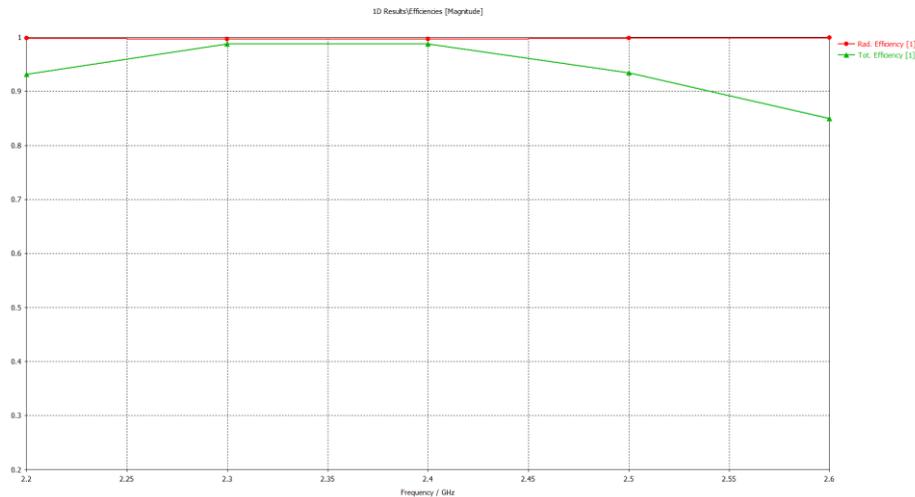


Figura 45. Eficiencia de la antena optimizada.

Si bien en este primer apartado se ha conseguido una antena centrada en 2.44 GHz con buenas características de ancho de banda, radiación y eficiencia, esta antena es poco funcional en aplicaciones IoT ya que sus grandes dimensiones lo hacen obviamente inviable en este campo. Además, en caso de encontrar una aplicación válida la antena se desintonizaría a estar expuesta a los materiales del entorno. Es decir, este modelo no es válido para IoT, pero ha servido para ver cómo se comportan los parámetros básicos.

En otros contextos esta antena sí que sería válida. Por ejemplo en caso de trabajar con grandes superficies metálicas como pudiera ser en fuselajes de vehículos con un tamaño considerable, como camiones o aviones.

Capítulo 5. Antena *notch* en L

Uno de los aspectos en los que más se trabaja en este tipo de antenas de bajo perfil es en buscar que sea lo más compacta posible con el objetivo de disminuir su tamaño sin disminuir sus prestaciones. Una de las técnicas más empleadas es modificar la forma del *notch*, en este capítulo se partirá del modelo obtenido en el capítulo anterior, pero se trabajará con un *notch* en forma de L, para posteriormente disminuir el tamaño del plano conductor.

Dicho esto, se tomará como punto de partida el *notch* de 55 mm, con un plano infinito y se harán simulaciones aumentando cada vez en 5 mm el brazo que conforma la L. En la Figura 46 se muestra el resultado obtenido de esta simulación, donde se ve como claramente aumentar la longitud del brazo inferior de la L, empeora el diseño, pero aun así si no trabajamos con los casos extremos se puede llegar a compactar la antena sin empeorar mucho el coeficiente de reflexión.

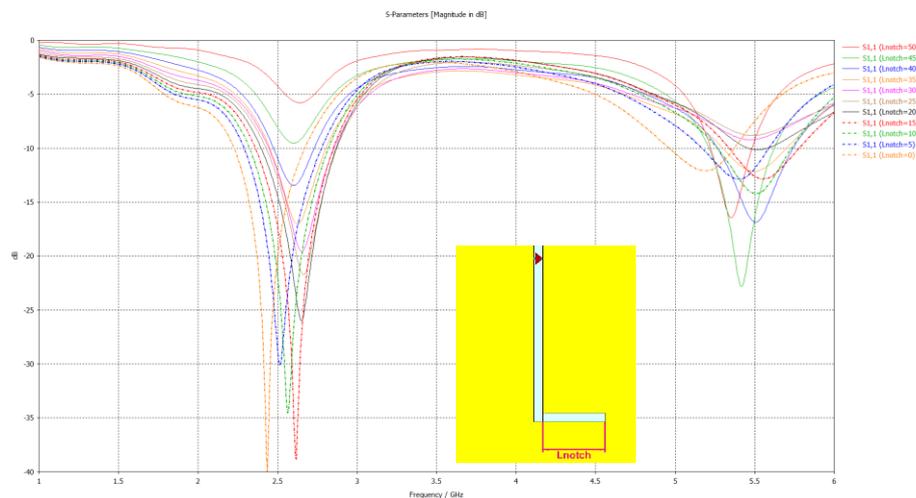


Figura 46. Estudio tamaño “L”

Por lo tanto, tomaremos un valor de brazo inferior de 15 mm y se empezará a disminuir el tamaño del conductor. Para disminuir el tamaño, longitud y ancho, se han propuesto dos casos, la primera opción es fijando la longitud y variando la anchura y la segunda opción correspondería al caso contrario.

Se empezará fijando la longitud y viendo hasta que punto se puede disminuir la anchura, en la Figura 47 se disminuye el ancho desde 100 mm hasta 35 mm con saltos de 5 mm, se puede dejar el ancho en 55 mm (línea naranja) donde se sigue manteniendo un buen coeficiente de reflexión mientras se disminuye considerablemente el tamaño.

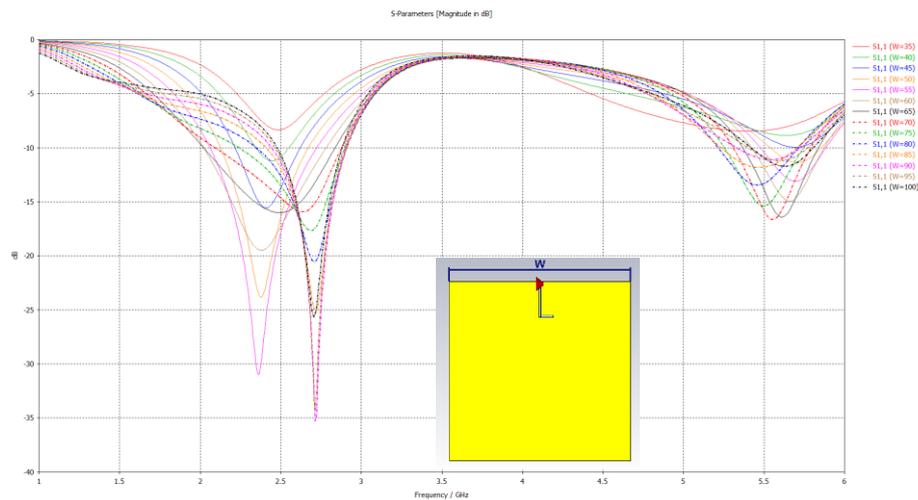


Figura 47. Reducción ancho conductor W, L fija

Con $W=55$ mm el siguiente paso a seguir será disminuir la longitud L (Figura 48), se procederá del mismo modo con un estudio de 120 mm a 45 mm con saltos de 5 mm. Se ve como a partir de una L inferior a 60 mm (línea marrón) se pierde la banda de operación por eso se tomará este valor. También se aprecia, como se comentó en el capítulo anterior, que disminuir el tamaño del ancho disminuye la frecuencia de operación mientras que la longitud no produce un efecto no muy considerable.

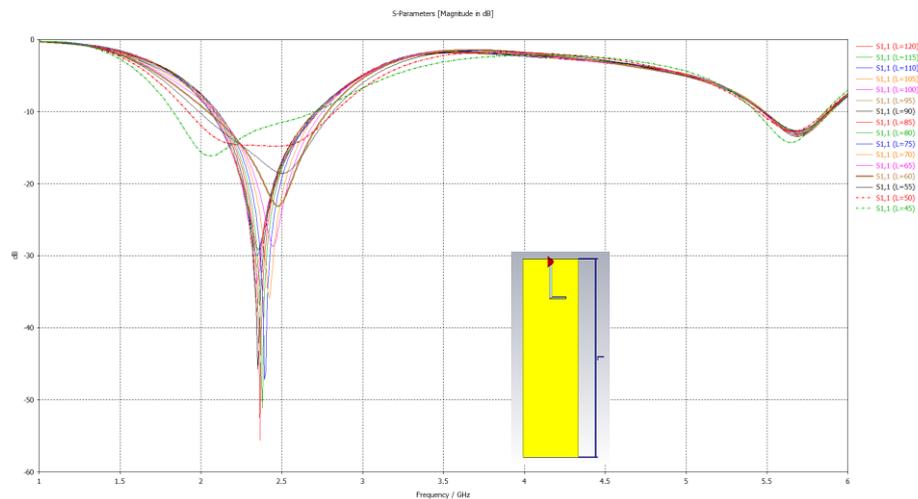


Figura 48. Reducción longitud conductor L, W fija

Ahora se procederá al caso contrario, se fijará primero el ancho W y se modificará la longitud otra vez desde 120 a 45 mm. En la Figura 49 se ve como con la longitud en 45 mm se consigue el mayor ancho de banda de toda la parametrización manteniendo un buen coeficiente de reflexión.

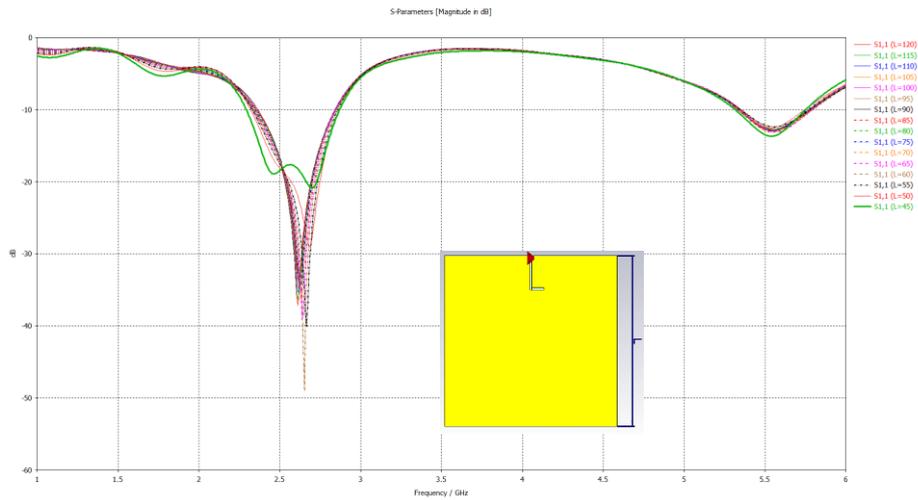


Figura 49. Reducción longitud conductor L, W fija

Finalmente variando el ancho del conductor (Figura 50). Se puede tomar un valor $W=45$ mm, obteniendo de este segundo modo un tamaño $L \times W$ 45×45 mm que mejora con respecto al 60×45 mm de la primera prueba.

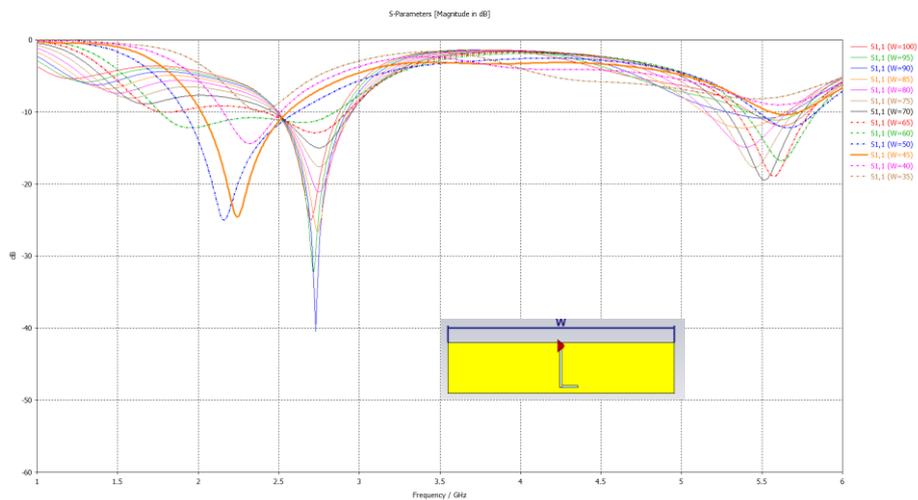


Figura 50. Reducción ancho conductor W, W fija

Para este segundo capítulo de diseño se obtiene el diseño en la banda de 2.4 GHz que se muestra en la Figura 51, donde doblando la longitud del *notch* se ha conseguido disminuir el tamaño de la antena del capítulo anterior.

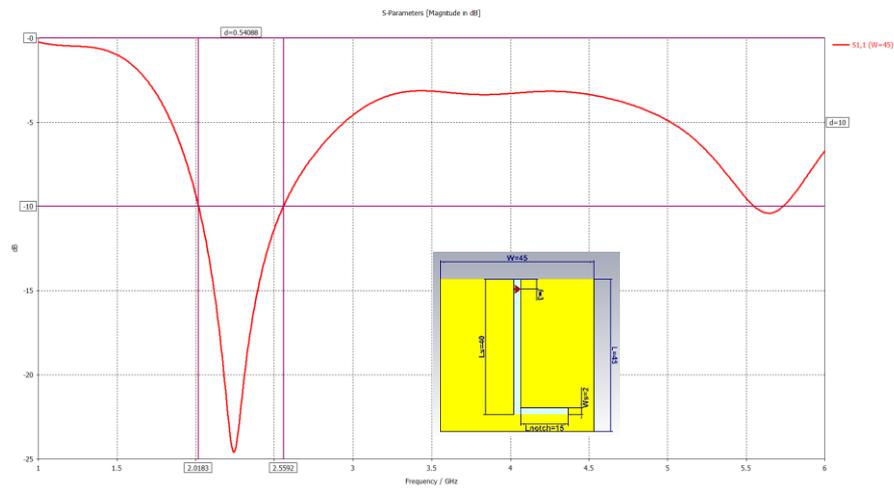


Figura 51. S_{11} antena final con *notch* en “L”

Capítulo 6. Antena notch T

Hasta ahora se ha venido trabajando solo en una banda de operación, la de 2.4 GHz, pero es interesante poder incluir en nuestro diseño varias bandas de operación para aumentar las aplicaciones de este. Este será el principal objetivo de este capítulo, para ello se creará un “brazo” adicional en el *notch* y se estudiará su comportamiento.

Se empezará partiendo del diseño final del capítulo anterior. A este diseño se le creará un “brazo” simétrico al que existía formando así un *notch* en forma de “T” y se modificará su longitud. En la Figura 52 se muestra el coeficiente de reflexión del slot propuesto (gráfica roja) comparado con el del capítulo 5 (gráfica verde). Además, se muestra el resultado de modificar la longitud del “brazo” de la izquierda desde 15 a 9 mm, manteniendo el de la derecha en 15 mm, generando una geometría en forma de T asimétrica.

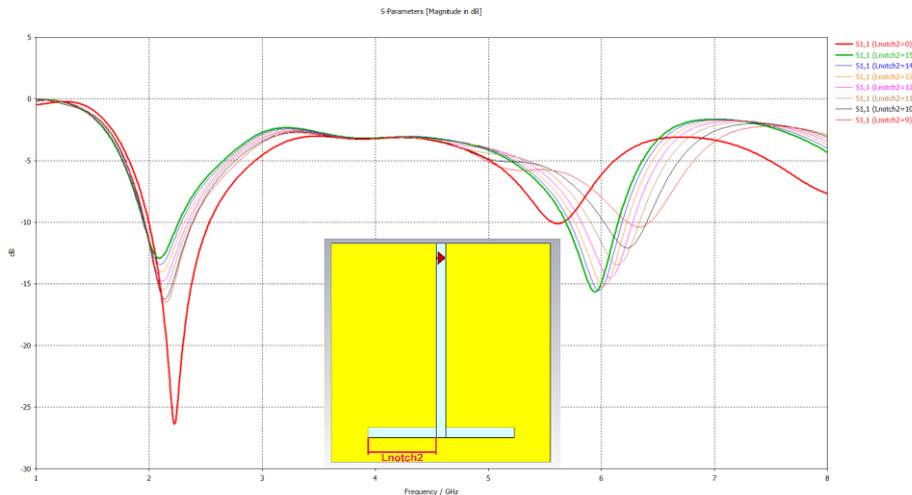


Figura 52. S_{11} “T” simétrico

De la Figura 52 se pueden extraer varias conclusiones, en primer lugar, se consigue trabajar a otra banda de frecuencia cerca de los 6 GHz que aumenta conforme se disminuye la longitud del segundo “brazo” como era de esperar, también se puede destacar como al crear el segundo “brazo” simétrico a la misma altura se empeora notablemente el coeficiente de reflexión en la banda que cubre 2.4 GHz posiblemente por el efecto que introduce el plano conductor.

Es por esta segunda razón que para que los dos *notches* adicionales o “brazos” se influyan lo menos posible, se ha optado por colocarlos a diferentes alturas. En la Figura 53 se muestra el resultado de desplazar este segundo “brazo” a lo largo del *notch* principal, concretamente desde la posición de la alimentación, 3 mm, hasta 13 mm. Como se aprecia a medida que el segundo slot se desplaza hacia abajo se consigue operar en frecuencias menores, ya que lo que sucede es que se está aumentando la longitud física del slot. Se tomará el valor a 11 mm, ya que logra cubrir los canales 149, 153, 157, 161 y 165 de WIFI en 5 GHz.

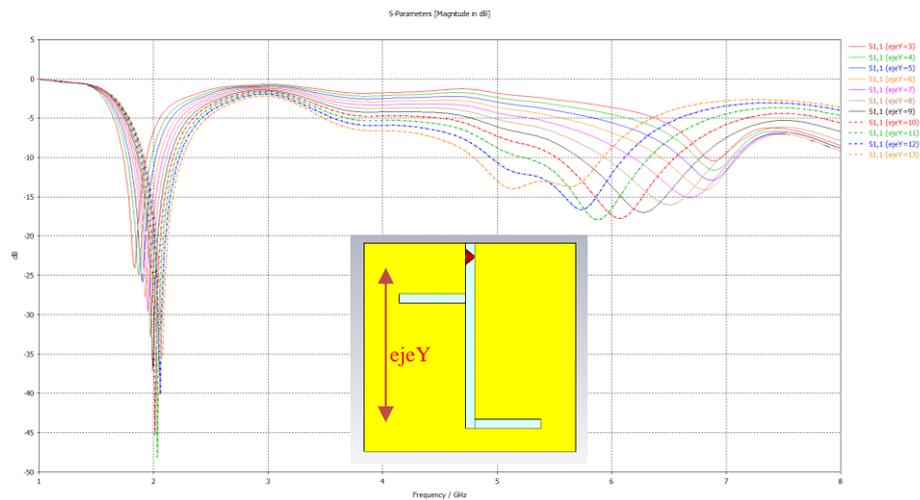


Figura 53. S_{11} resultante de modificar la posición del segundo “brazo”

Si se coge el valor a 11 mm y se modifica la longitud del segundo “brazo” de la izquierda *notch* tal como se hizo en la Figura 52 obtenemos lo mostrado en la Figura 54. El resultado es el esperado, aumentamos la longitud del *notch* y se disminuye la frecuencia de trabajo del diseño. Por lo tanto, las dos formas de modificar la longitud del *notch* que se han mostrado en las dos últimas Figuras (53 y 54) serán de gran ayuda a la hora de diseñar una antena final funcional.

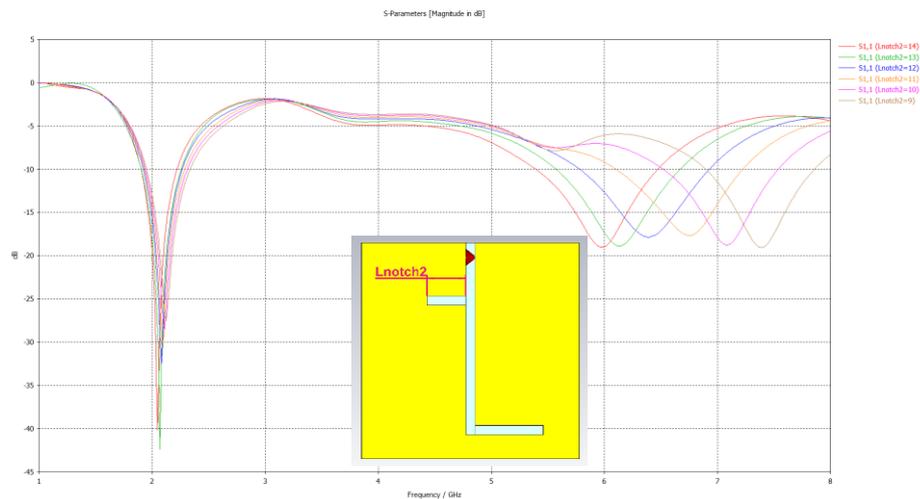


Figura 54. S_{11} resultante de aumentar la longitud del segundo “brazo” a alturas diferentes

También se puede destacar que se puede trabajar con anchos diferentes en los distintos *notches*, como se comentó el ancho nos permitía ajustar un poco la banda a la que se trabaja (Figura 55) por lo que con diferentes anchos podremos ajustar cada banda como sea conveniente.

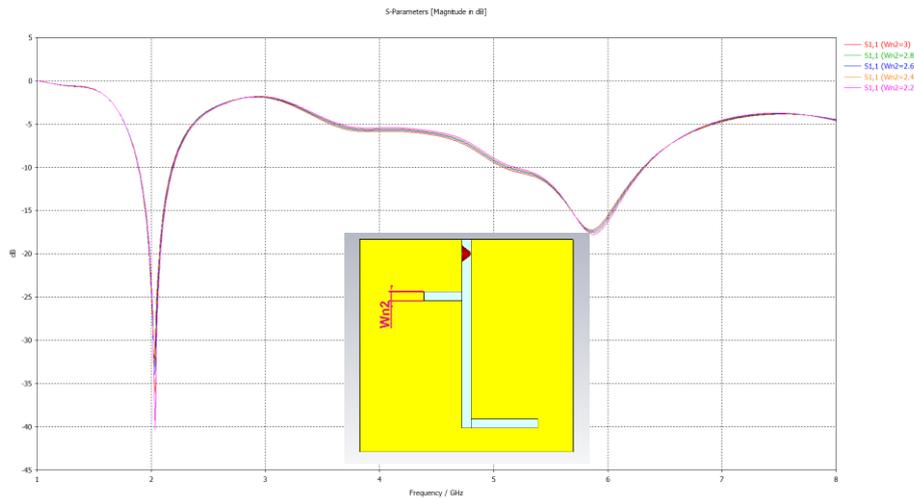


Figura 55. Modificación ancho del segundo notch

Finalmente modificando un poco la longitud del slot central principal se consigue una antena multibanda tal y como se muestra en la Figura 56. En la imagen se aprecia como esta tiene un rango de operación entre 2.1019 - 2.483 GHz y entre 5.0889 – 6.6602 GHz.

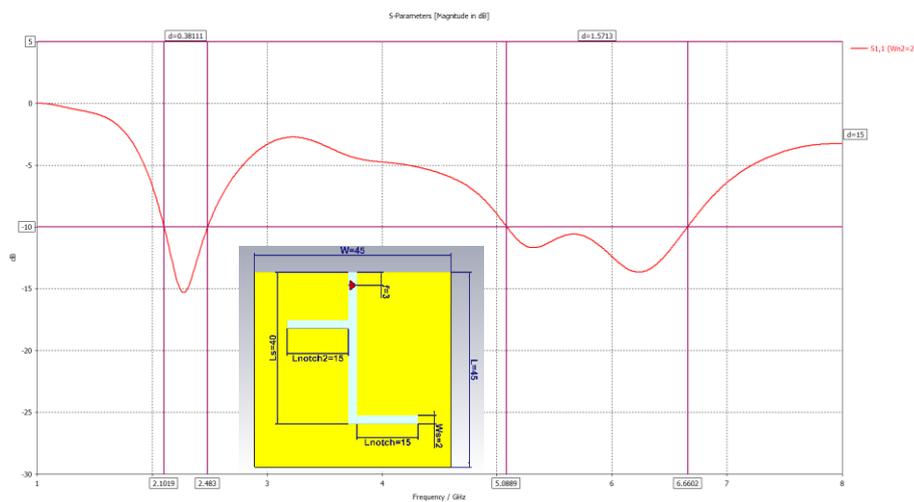


Figura 56. S_{11} antena final con notch en “T”

En el siguiente capítulo se estudiará como afecta el integrar este tipo de antenas sobre una caja con el objetivo de evitar que se desintonicen, pero antes de avanzar se simulará el diseño final obtenido en este capítulo sobre un bloque de 100x65 mm de *lead glass* (Figura 57). El resultado de esta simulación se muestra en la Figura 58, se ve como claramente el resultado difiere mucho del obtenido en condiciones de espacio libre, lo que justificará la introducción de la caja metálica en los próximos diseños.

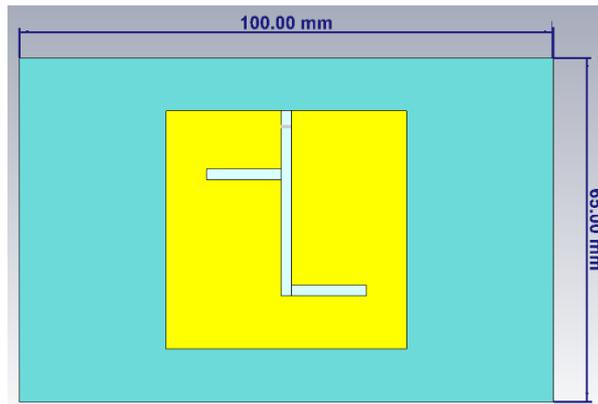


Figura 57. Antena final con notch en “T” sobre bloque de *lead glass*

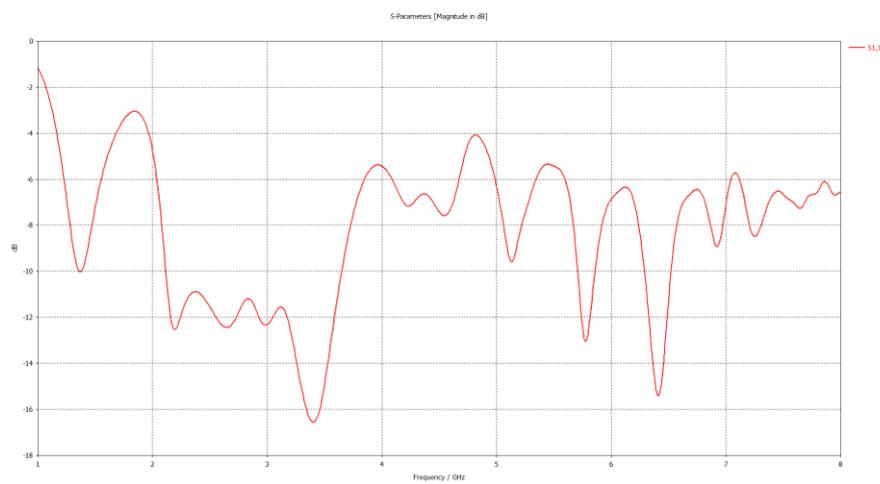


Figura 58. S_{11} antena final con notch en “T” sobre un bloque de *lead glass*

Capítulo 7. Estudio efecto Caja

Si bien tanto la antena notch como las mencionadas en el capítulo 3.2, presentan muchas ventajas a la hora de implementarse en un dispositivo, como pueden ser su fácil adaptación, tamaño o compactación, comparten una desventaja un del todo problemática, la desintonización. En condiciones de espacio libre en un simulador se pueden obtener buenos resultados, como es el caso de los diseños anteriores, pero luego la realidad al fabricarlas es otra, ya que son muy sensibles a los materiales típicos del entorno como madera, cristal, o incluso el propio cuerpo humano.

Corregir la desintonización a los materiales del entorno es uno de los objetivos principales de este proyecto, para ello se implementará la antena en una especie de caja metálica que hará disminuir la radiación de la antena hacia la dirección no deseada. Esto además de que permitirá aislar la antena del entorno también resulta interesante si el diseño se va a integrar sobre dispositivos *wearables*, ya que se minimiza la radiación hacia el cuerpo humano evitando así la desintonización que este pueda introducir.

La estructura de la caja será la siguiente, en la cara superior es donde irá ubicado el *notch*, a una distancia d de esta cara se colocará otra con las mismas dimensiones, grosor y material, pero sin tener recortada ningún *notch*, finalmente se unirán ambas caras con tres planos laterales, los dos de los costados y el inferior.

En este capítulo para ver el efecto paso a paso que introduce la caja se partirá de un diseño de antena *notch* básico centrado en 2.44 GHz a la que se le añadirá la cara inferior, seguidamente se le añadirán los dos planos laterales de los costados de la caja y finalmente se completará la caja metálica con el ultimo plano lateral. Para todas las simulaciones se han considerado varias distancias (d) y además se ha estudiado el efecto de introducir el substrato FR-4 entre el hueco de las dos caras principales, siempre con dimensión $d/2$. En la Figura 59 se puede ver tanto la estructura de la caja como la distribución del substrato.

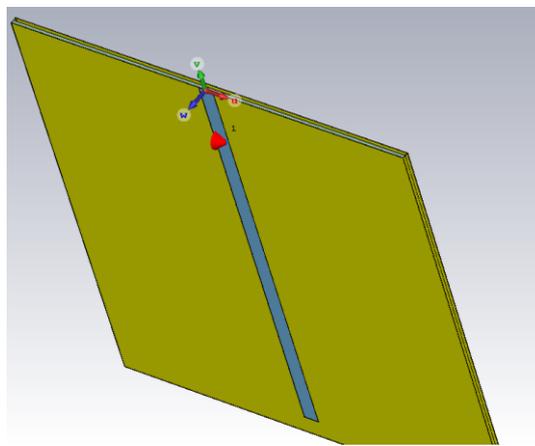


Figura 59. Estructura de la caja metálica

El parámetro S_{11} y las dimensiones de la antena de partida se pueden ver en la Figura 60, como se ve presenta un comportamiento multibanda, la primera banda que abarca de 2 a 3 GHz y la segunda centrada en 5.8 GHz que aparece por el efecto del plano metálico. El comportamiento radiante de la antena se puede ver en la Figura 61, donde claramente se aprecia como el *notch* radia indistintamente hacia ambos semiespacios, siendo esta una de las características tanto de las ranuras como de los *notches*.

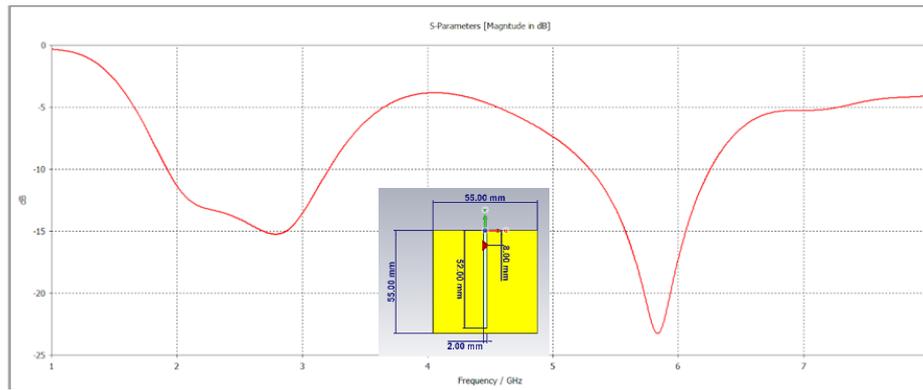


Figura 60. S_{11} antena de partida

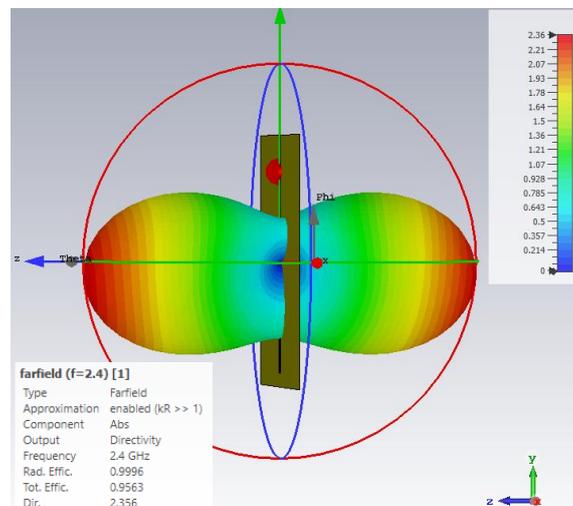


Figura 61. Diagrama de radiación antena de partida

Como se ha comentado se empezará añadiendo la inferior (Figura 62 y Figura 63), se seguirá añadiendo los planos laterales (Figura 64 y Figura 65) y finalmente se completará la caja añadiendo el plano lateral inferior (Figura 66 y Figura 67). Todas las simulaciones se realizarán con una separación entre caras que variará de 1.6 a 0.8 con pasos de 0.2 mm.

En la Figura 62 vemos el resultado obtenido de la primera simulación, a primera vista se ve claramente como se desajustan las bandas de operación, además a medida que se aumenta la distancia entre las dos caras se aumenta ligeramente el ancho de banda y se mejora el coeficiente de reflexión.

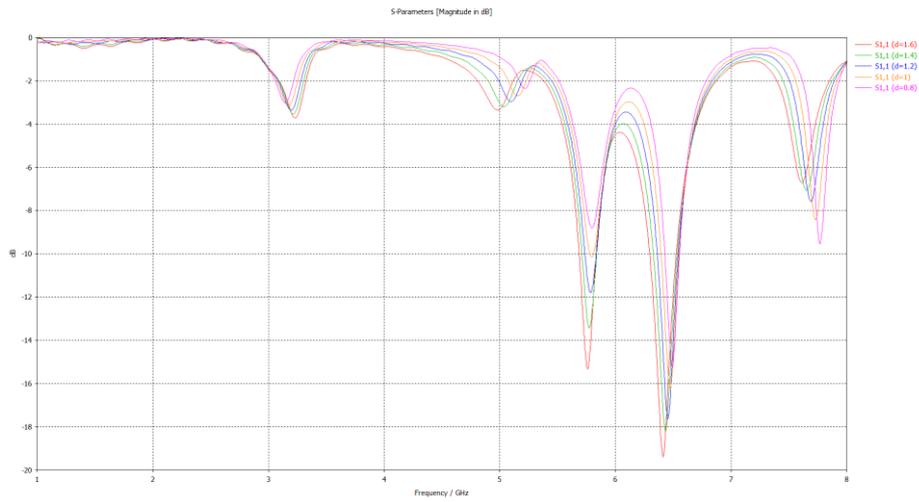


Figura 62. S₁₁ planos opuestos sin sustrato

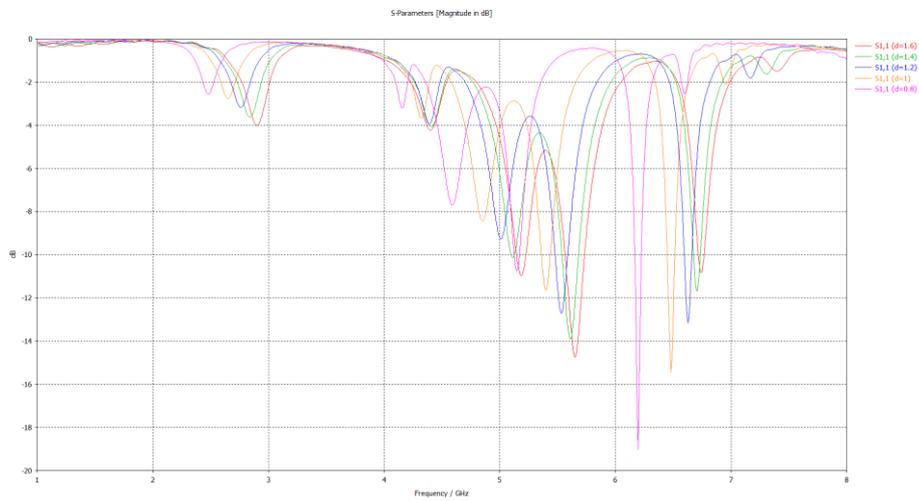


Figura 63. S₁₁ planos opuestos con sustrato

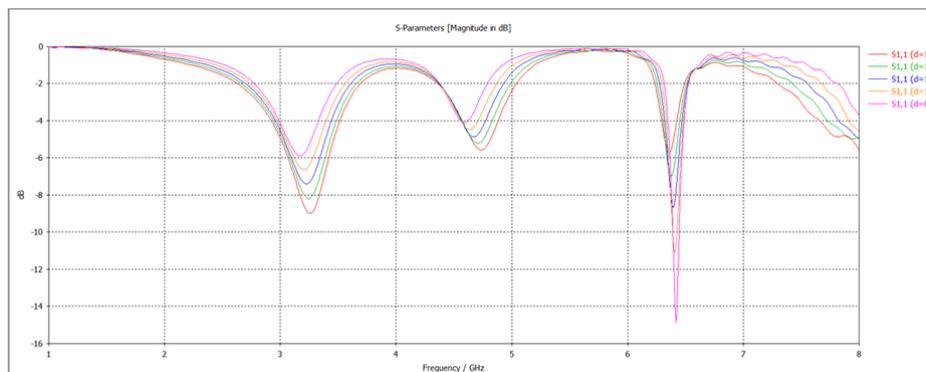


Figura 64. S₁₁ planos laterales sin sustrato

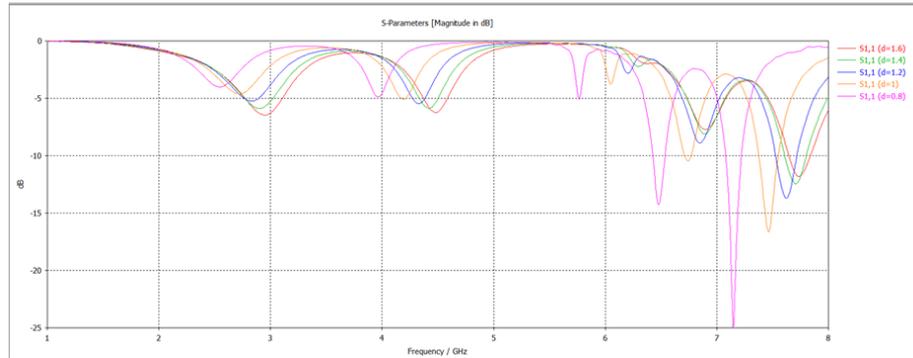


Figura 65. S_{11} planos laterales con sustrato

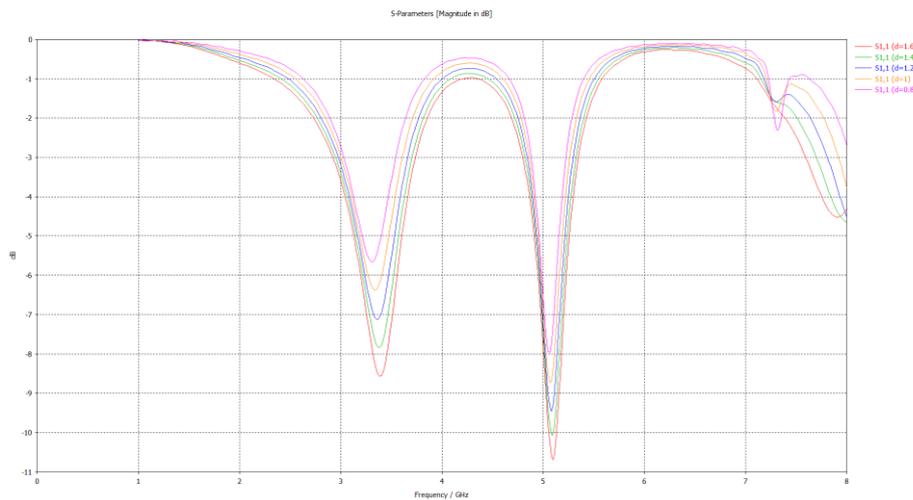


Figura 66. S_{11} caja completa sin sustrato

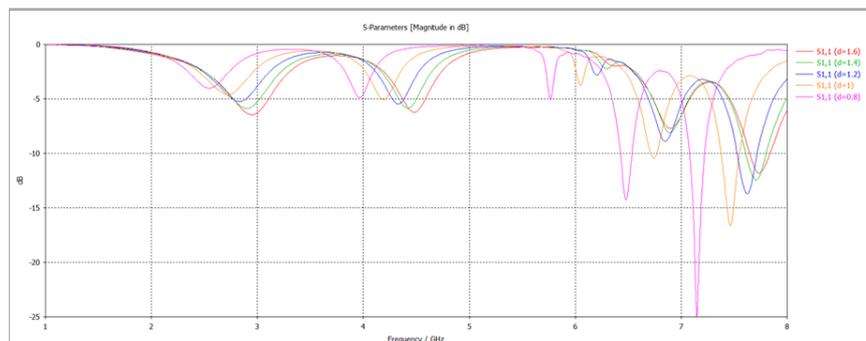


Figura 67. S_{11} planos laterales con sustrato

Para el resto de Figuras anteriores se aprecia el mismo resultado. A primera vista se ve claramente como se desajustan las bandas de operación, además a medida que se aumenta la distancia entre las dos caras se aumenta ligeramente el ancho de banda y se mejora el coeficiente de reflexión. También se puede destacar el efecto crítico que introduce la longitud d del sustrato.

En la Figura 68 se muestra el diagrama de radiación 3D de la última simulación a $f=6.2$ GHz con $d=0.8$ mm. Se ve como claramente el resultado es el esperado, la introducción de la caja ha hecho que la radiación hacia atrás sea prácticamente nula.

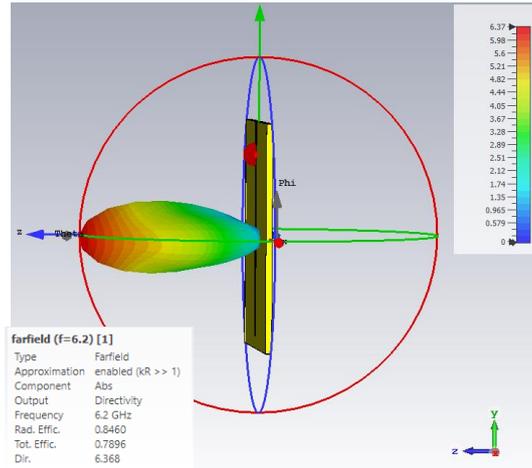


Figura 68. Diagrama de radiación 3D de la antena implementada en la caja

Capítulo 8. Diseño Final

Tras el estudio de los parámetros de la antena *notch* y del efecto que produce acoplar la misma en una caja metálica, después de realizar múltiples simulaciones variando anchos, longitud y posición de los “brazos”, ancho, largo y profundidad de la caja entre otros parámetros básicos se ha podido llegar a un diseño final que se muestra en la Figura 69.

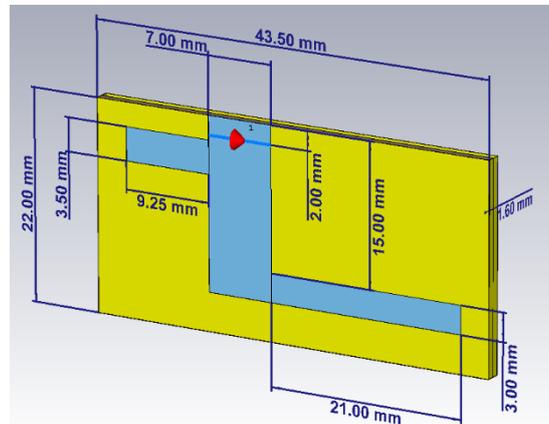


Figura 69. Dimensiones diseño final

Se trata de una antena de muy bajo perfil con 43.5 mm de ancho (W) por 22 mm de largo (L) incluida dentro de una caja con una profundidad de 1.6 mm. Se ha querido conseguir un comportamiento multibanda a las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz, esto se ha logrado colocando dos brazos de diferente longitud a diferentes alturas en el *notch* principal.

Las dimensiones de los *notches* se aproximan a su valor teórico, el notch de mayor tamaño (2.4 GHz) tiene una dimensión física de 36 mm respecto a los 31.25 mm que se obtienen de forma teórica. El de menor tamaño tiene una longitud física de 11.75 mm respecto a los 13.7 mm que se obtendrían de forma teórica a 5.45 GHz.

El coeficiente de reflexión de este modelo se muestra en la Figura 70. En él se muestra como el diseño se logra cubrir la banda de 2.4 GHz, esta contiene 12 canales diferentes cada uno con 22 MHz de ancho de banda que se superponen entre sí, siendo el rango de operación de 2.412 GHz a 2.472 GHz.

La banda de 5 GHz tiene más canales que la de 2.4 GHz ya que no tiene superposición, en Europa la frecuencia de operación de esta abarca desde 5.15 GHz hasta 5.895 GHz. El rango de operación del diseño propuesto cubre de 5.2994 GHz hasta 5.6182 GHz, lo que permitiría emplear los canales: 64,68,96,100,102,104,106,108,110,112,114,116,118 y 120.

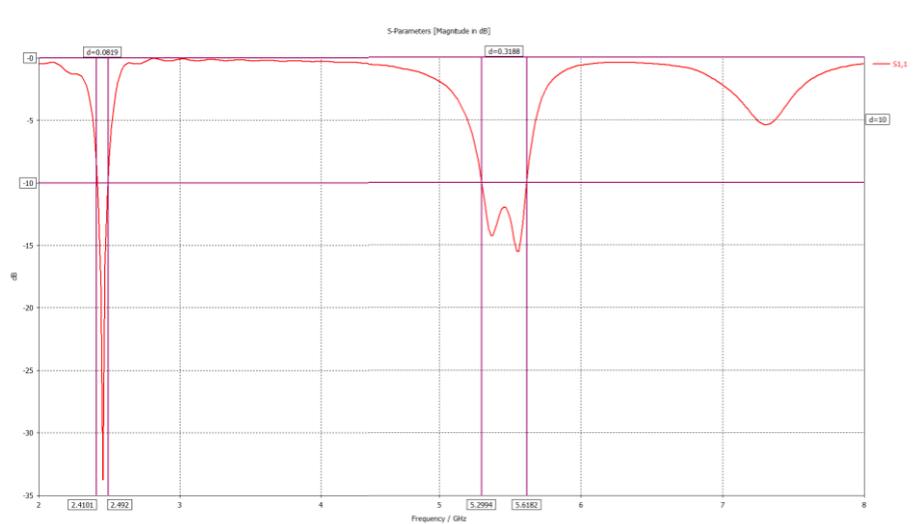


Figura 70. S₁₁ diseño final

En la Figura 71, se muestra el diagrama de radiación tanto a 2.44 GHz como a 5.45 GHz. Si bien para 5.45 GHz como se observa el efecto de la caja hace que la antena no radie prácticamente nada hacia atrás, para la banda de 2.4 GHz aunque si se nota el efecto este puede ser mejorable.

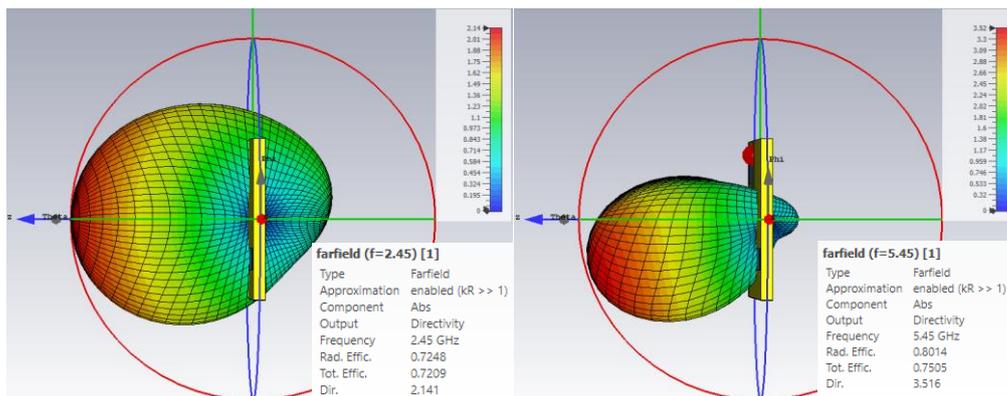


Figura 71. Diagrama de radiación 3D del diseño final para ambas bandas.

De este diseño final en las figuras 72 y 73 se muestra la gráfica de las eficiencias para ambas bandas.

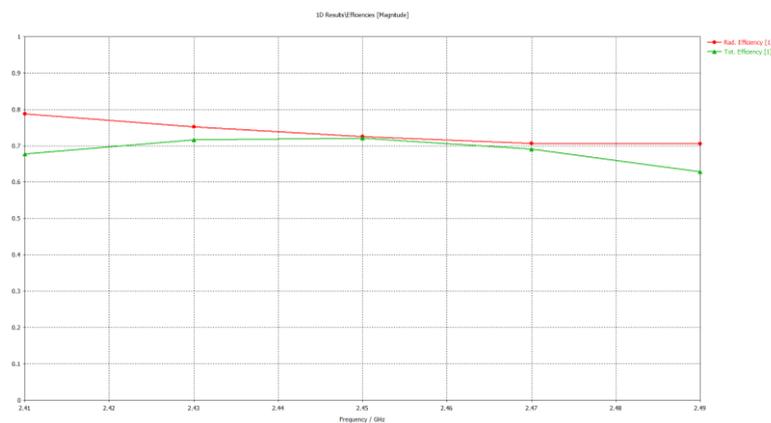


Figura 72. Eficiencia de la antena final a 2.44 GHz.

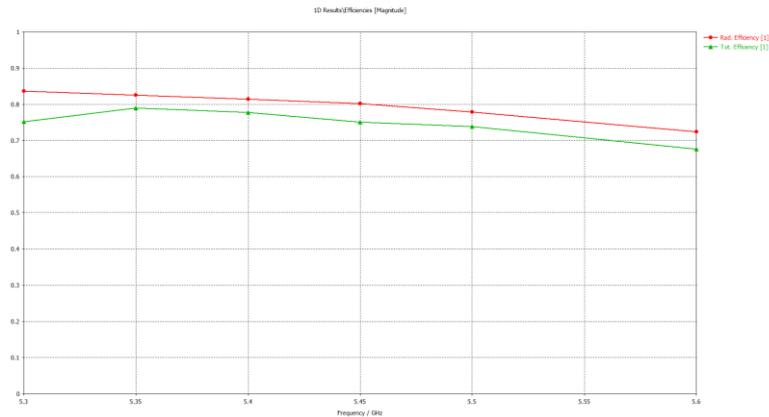


Figura 73. Eficiencia de la antena final a 5 GHz.

Finalmente, de la misma manera que se hizo al final del capítulo 6 se colocará la antena sobre un bloque, de dimensiones 100x50x10 mm, de materiales típicos del entorno (Figura 74), para ver si al estar expuestos se desintonizan. En la Figura 75 el bloque está compuesto de madera mientras que en la 76 está compuesto por *Lead Glass*. Como era de esperar habiendo visto los diagramas de radiación, en el caso de la banda de 5 GHz prácticamente no tienen influencia, mientras que para la banda de 2.4 GHz si bien se mantiene centrado empeora el parámetro S_{11} .

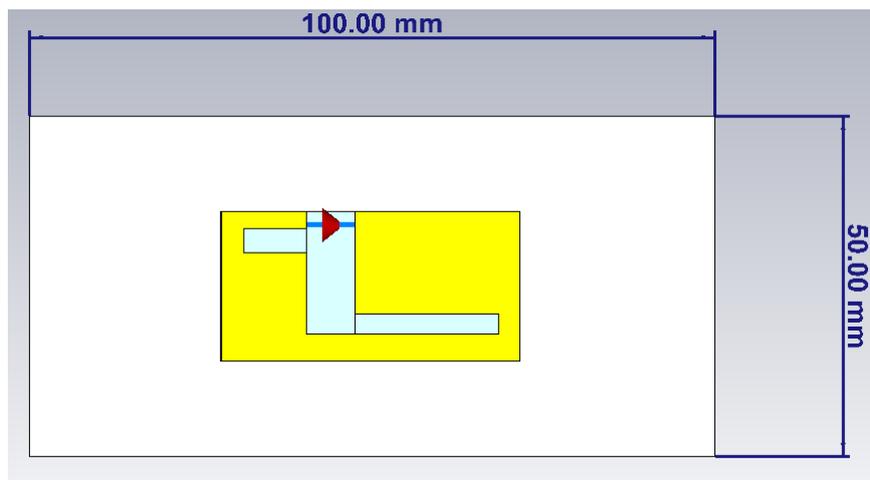


Figura 74. Diseño Final apoyado sobre bloque.

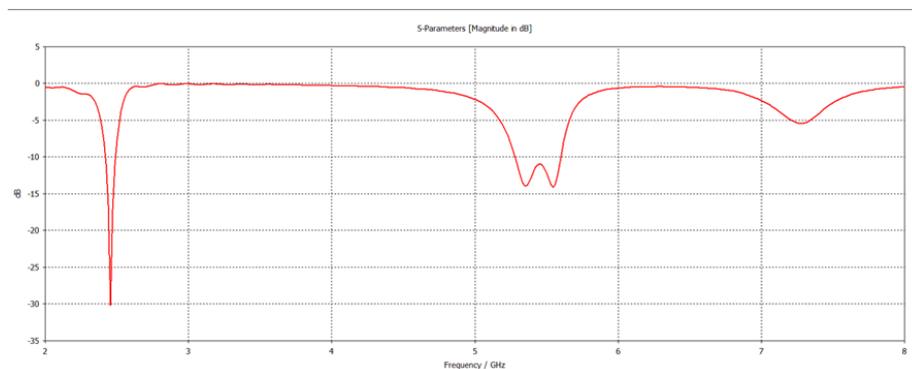


Figura 75. S_{11} diseño final sobre bloque de madera

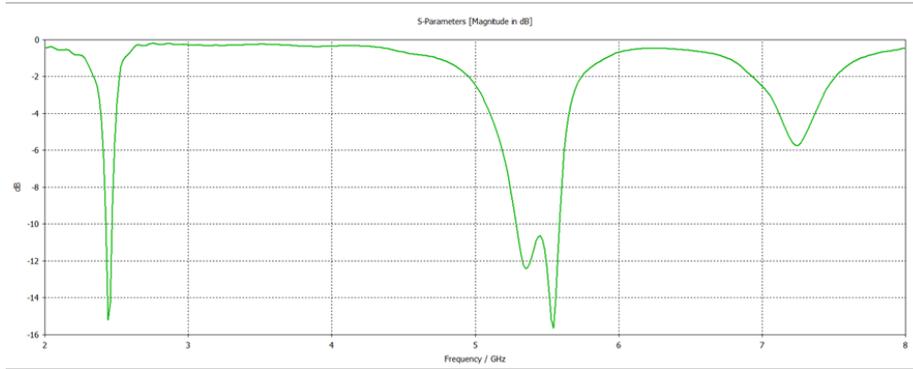


Figura 76. S₁₁ diseño final sobre bloque de *lead glass*

Capítulo 9. Conclusiones

A lo largo de este trabajo se han hecho numerosas simulaciones con el objetivo de entender el funcionamiento de las antenas *notch* y como se podrían integrar en dispositivos IoT.

Si se escogió la antena *notch* como punto central de este proyecto es porque se pueden integrar fácilmente debido a su bajo perfil y tamaño compacto además de presentar algunas ventajas respecto a las antenas más utilizadas en IoT.

En primer lugar, en el caso de las antenas *microstrip* si bien focalizan su radiación en el semiplano superior y por la presencia de un plano de masa no se desintonizan, presentan anchos de banda estrechos y eficiencia baja. En el caso de las antenas IFA o PIFA su principal problema radica en que se ven considerablemente afectados por el entorno.

Finalmente, la ventaja de la antena *notch* respecto a la de ranura es que la primera es un resonador en $\lambda/4$ mientras que la segunda lo es a $\lambda/2$, lo que permite llegar a las mismas frecuencias de trabajo con la mitad de tamaño, algo esencial a la hora de querer integrar cualquier diseño en dispositivos IoT.

Se han estudiado diferentes modificaciones de la antena *notch* básica. En primer lugar, doblando el *notch* principal dejando una forma similar a una “L”. El doblar el *notch* manteniendo su tamaño permite seguir operando en el mismo rango con la ventaja de obtener un diseño más compacto y reducido.

La segunda técnica ha sido añadiendo un segundo “brazo” al diseño obteniendo un *notch* en forma de “T”. Esta técnica resulta especialmente interesante ya que permite introducir varias bandas de operación consiguiendo así un diseño multi-banda.

Una de las características y problemas principales tanto de las antenas *notch* como las de ranura, es que tienen un diagrama de radiación bidireccional igual tanto para el semiplano superior como para el inferior. Esto evidentemente supone un problema a la hora de incorporar este tipo de antenas sobre dispositivos IoT, ya que el entrar en exposición sobre materiales del entorno haría que la antena se desintonizase por completo.

Con el fin de corregir este problema se ha integrado la antena sobre una caja metálica que hará disminuir la radiación hacia atrás, aislando la antena de los diferentes materiales.

En último lugar se ha obtenido un diseño final cumple con los criterios de ancho de banda de adaptación, diagrama unidireccional, eficiencia e inmunidad relativa frente al entorno.

9.1 Líneas Futuras

Como líneas futuras de este proyecto se pueden plantear varios escenarios. En primer lugar, la fabricación del modelo final obtenido en el Capítulo 8 y su posterior medición en una cámara anecoica con el objetivo de ver como difiere el resultado obtenido en las simulaciones con el medido.

Del mismo modo una vez fabricada la antena se integraría la misma sobre diferentes materiales. Esto nos permitiría ver como se comporta la antena al estar expuesta al entorno, además de proporcionar información del efecto de la caja metálica y hasta que punto el diseño es útil en dispositivos IoT.

También se podría probar a alimentar la antena de forma más realista mediante una línea *microstrip*, es decir con acoplo capacitivo.

Además, con el objetivo de disminuir la frecuencia de trabajo sin disminuir el tamaño del diseño se podría introducir un *notch* cargado, esto se realizaría introduciendo una tira interna dentro del *notch* principal.



Finalmente, como es lógico se podría mejorar el diseño final presentado, disminuyendo así el tamaño y obteniendo mejores resultados.

Capítulo 10. Bibliografía

- [1] Thestartupstimes.com. 2021. Las 20 mejores startups de IoT para ver en 2020 | The Startups Times. [online] Available at: <<https://thestartupstimes.com/las-20-mejores-startups-de-iot-para-ver-en-2020/>> [Accessed 16 August 2021].
- [2] S. Chaudhary, R. Johari, R. Bhatia, K. Gupta and A. Bhatnagar, "CRAIoT: Concept, Review and Application(s) of IoT," 2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/IoT-SIU.2019.8777467.
- [3] Cantera de empresas. 2021. ¿Que son las Smart Cities y que importancia tienen en nuestro proyecto? [online] Available at: <<https://canteradeempresas.com/que-son-las-smart-cities-y-que-importancia-tienen-en-nuestro-proyecto/>>.
- [4] I. -G. Lee et al., "WiFi HaLow for Long-Range and Low-Power Internet of Things: System on Chip Development and Performance Evaluation," in IEEE Communications Magazine, vol. 59, no. 7, pp. 101-107, July 2021, doi: 10.1109/MCOM.001.2000815.
- [5] pc-solucion.es. 2021. Wi-Fi HaLow. [online] Available at: <<https://pc-solucion.es/2018/05/06/wi-fi-halow/>>.
- [6] Weis, S.A.: RFID (Radio Frequency Identification): Principles and Applications. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.182.5224&rep=rep1&type=pdf>.
- [7] Varghese, Jobina & K V, Nibi & Varghese, Vijo & Rao, Sethuraman. (2015). A Survey of the State of the Art in Zigbee. International Journal on Cybernetics & Informatics. 4. 145-155. 10.5121/ijci.2015.4214.
- [8] S. Safaric and K. Malaric, "ZigBee wireless standard," Proceedings ELMAR 2006, 2006, pp. 259-262, doi: 10.1109/ELMAR.2006.329562.
- [9] K. Chang, "Bluetooth: a viable solution for IoT? [Industry Perspectives]," in IEEE Wireless Communications, vol. 21, no. 6, pp. 6-7, December 2014, doi: 10.1109/MWC.2014.7000963.
- [10] MOKOBlue: Bluetooth original / BLE IoT & Fabricante de dispositivos inteligentes. 2021. Por qué Bluetooth IoT? La tecnología Bluetooth se ha integrado en IoT. [online] Available at: <<https://www.mokoblue.com/es/why-bluetooth-iot/>>
- [11] UIT- R, "Concepción de las IMT – Marco y objetivos generales del futuro desarrollo de las IMT para 2020 y en adelante"
- [12] "IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas," in IEEE Std 145-1993 , vol., no., pp.1-32, 18 July 1993, doi: 10.1109/IEEESTD.1993.119664.
- [13] Cardama Aznar, A., 1998. Antenas. 2nd ed. Barcelona: UPC, p.19.
- [14] Media.upv.es. 2021. media UPV. [online] Available at: <<https://media.upv.es/#/portal/video/0c710040-d0ad-11e5-ace0-e9c555cc61a1>>.



- [15] Hyperphysics.phy-astr.gsu.edu. 2021. Classification of Polarization. [online] Available at: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polclas.html>> [Accessed 1 December 2021].
- [16] Rop, K.V. & Konditi, Dominic. (2012). PERFORMANCE ANALYSIS OF A RECTANGULAR MICROSTRIP PATCH ANTENNA ON DIFFERENT DIELECTRIC SUBSTRATES. International Institute for Science, Technology and Education (IISTE). 3. 7-14.
- [17] Singh, Indrasen & Tripathi, Dr. (2011). Micro strip Patch Antenna and its Applications: a Survey. International Journal of Computer Technology and Applications. 2. 1595-1599.
- [18] H. Booker, Slot Aerials and Their Relation to Complementary Wire Aerials (Babinet's Principle), J. I.E.E. 93, 620 (1946),
- [19] Kraus, J., Marhefka, R. and Khan, A., 2002. Antennas and wave propagation. 4th ed. India: McGraw-Hill, pp.267-283.
- [20] Balanis, C., 1997. Antenna theory. 1st ed. New York: Wiley.
- [21] Blumlein, Alan (1938-03-07), "Improvements in or relating to high frequency electrical conductors or radiators", British patent no. 515684
- [22] Burberry, R., 1992. VHF and UHF Antennas. Stevenage: IET, p.91. [23] N. E. Lindenblad, "Slot Antennas," in Proceedings of the IRE, vol. 35, no. 12, pp. 1472-1479, Dec. 1947, doi: 10.1109/JRPROC.1947.234572.
- [24] K. S. Yngvesson, T. L. Korzeniowski, Y. - Kim, E. L. Kollberg and J. F. Johansson, "The tapered slot antenna-a new integrated element for millimeter-wave applications," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 37, no. 2, pp. 365-374, Feb. 1989, doi: 10.1109/22.20062.
- [25] T.Huynh and K.F.Lee, "Single-layer single-patch wideband microstrip antenna," Electronics Letters, Vol. 31, No. 16, pp. 1313-1312, 1995
- [26] Chair, Kishk and Lee, "Ultrawide-band coplanar waveguide-fed rectangular slot antenna," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 3, pp. 227-229, 2004, doi: 10.1109/LAWP.2004.836580.
- [27] T. H. Choi, S. S. Kim, Y. J. Yoon and H. Kim, "Wide-band slot Antenna on metal bezel for covering 28/39GHz in 5G Communication System," 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting, 2019, pp. 29-30, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2019.8888748.
- [28] A. Ali and I. Park, "A Photovoltaic Cell Integrated Slot Antenna for IoT Applications," 2020 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), 2020, pp. 492-494, doi: 10.1109/WPTC48563.2020.9295585.
- [29] Martinez-Vazquez, Marta & Řezníček, Zdeněk & Steeger, Stefan & Vrchota, Petr & Lungaho, V.. (2020). VHF Communication Antenna Integrated into an Aircraft Winglet. 10.23967/emus.2020.010.
- [30] K. Wong, H. Chang, C. Wang and S. Wang, "Very-Low-Profile Grounded Coplanar Waveguide-Fed Dual-Band WLAN Slot Antenna for On-Body Antenna Application," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 19, no. 1, pp. 213-217, Jan. 2020, doi: 10.1109/LAWP.2019.2958961.