



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

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

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de
Telecomunicación

Diseño de antenas multihaz conmutadas para las nuevas
bandas de comunicaciones 5G

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de
Telecomunicación

AUTOR/A: Talaya Aroca, Daniel

Tutor/a: Cabedo Fabrés, Marta

Cotutor/a: Ferrando Bataller, Miguel

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

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

RESUMEN EJECUTIVO

La memoria del TFG del Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación debe desarrollar en el texto los siguientes conceptos, debidamente justificados y discutidos, centrados en el ámbito de la ingeniería de telecomunicación

CONCEPT (ABET)	CONCEPTO (traducción)	¿Cumple? (S/N)	¿Dónde? (páginas)
1. IDENTIFY:	1. IDENTIFICAR:		
1.1. Problem statement and opportunity	1.1. Planteamiento del problema y oportunidad	Sí	5
1.2. Constraints (standards, codes, needs, requirements & specifications)	1.2. Toma en consideración de los condicionantes (normas técnicas y regulación, necesidades, requisitos y especificaciones)	Sí	5, 25
1.3. Setting of goals	1.3. Establecimiento de objetivos	Sí	7-8
2. FORMULATE:	2. FORMULAR:		
2.1. Creative solution generation (analysis)	2.1. Generación de soluciones creativas (análisis)	Sí	27, 38, 49
2.2. Evaluation of multiple solutions and decision-making (synthesis)	2.2. Evaluación de múltiples soluciones y toma de decisiones (síntesis)	Sí	60
3. SOLVE:	3. RESOLVER:		
3.1. Fulfilment of goals	3.1. Evaluación del cumplimiento de objetivos	Sí	70
3.2. Overall impact and significance (contributions and practical recommendations)	3.2. Evaluación del impacto global y alcance (contribuciones y recomendaciones prácticas)	Sí	72



Abstract

Este trabajo de final de grado presenta el diseño y análisis de una antena conmutada optimizada para estaciones base de comunicaciones 5G, enfocada en mejorar la eficiencia espectral y la cobertura en entornos urbanos. La antena propuesta incorpora técnicas avanzadas de conmutación de haces, permitiendo intercambiar entre diagramas de radiación predefinidos y direccionar las señales hacia los usuarios, reduciendo las interferencias y aumentando la capacidad de la red. Se exploran diferentes configuraciones de antenas y se validan mediante simulaciones en el software CST, con el objetivo de operar de manera efectiva en la banda media del espectro 5G, entre 2 y 6 GHz. Los resultados obtenidos muestran un buen comportamiento tanto en la banda de trabajo como en los diagramas de radiación, haciendo que este diseño sea una posible solución para las futuras implementaciones de redes 5G.

Abstract

This final degree Project presents the desing and análisis of an optimised switched antenna for 5G communications base stations, focused on improving spectral efficiency and coverage in urban environment. The proposed antenna incorporates advanced beam-switching techniques, allowing to switch between predefined radiation patterns and to rouge signals to users, reducing inteference and increasing network capacity. Different antenna configurations are explored and validated through simulations in CST software, with the objective of operating effectively in the mid-band of the 5G spectrum, between 2 and 6 GHz. The results obtained show Good performance both in the working band and the raditation patterns, making this desing a posible solution fot the future 5G network deployments.

Abstract

Este treball de final de grau presenta el disseny i anàlisi d'una antena commutada optimitzada per a estacions base de comunicacions 5G, enfocada a millorar l'eficiència espectral i la cobertura en entorns urbans. L'antena proposada incorpora ècniques avançades de commutació de feixos, permetent intercanviar entre diagrames de radiació predefinits i adreçar els senyals cap als usuaris, reduint les interferències i augmentant la capacitat de la xarxa. S'exploren diferents configuracions d'antenes i es validen mitjançant simulacions en el programari CST, amb l'objectiu d'operar de manera efectiva en la banda mitjana de l'espectre 5G, entre 2 i 6 GHz. Els resultats obtinguts mostren un bon comportament tant en la banda de treball com en els diagrames de radiació, fent que este disseny siga una possible solució per a les futures implementacions de xarxes 5G.



Introducción	5
Capítulo 1. Motivación y objetivos del trabajo	7
Capítulo 2. Antenas para estaciones base 5G	9
2.1 Evolución y estado actual de las estaciones base	9
2.2 Tecnología MIMO	13
2.3.1 MIMO	13
2.3.2 MU- MIMO	13
2.3.3 Massive MIMO	14
2.3 Técnicas de conformado de haces	15
2.3.1 Beamforming	15
2.3.2 Beamsteering	16
2.3.3 Beamswitching	16
2.4 Antenas impresas	18
2.4.1 ILAs	21
2.4.2 Antena Notch	22
2.4.3 Antena Vivaldi	23
Capítulo 3. Elementos base optimizados propuestos para celda unidad	25
3.1 Primer modelo (ILA y Notch)	27
3.2 Segundo modelo (2 ILAs y Notch)	37
3.3 Tercer modelo (ILAs y Vivaldi)	49
Capítulo 4. Formas propuestas para la estructura conmutada	57
4.1 Estructuras propuestas	57
4.2 Estructura definitiva	61
Capítulo 5. Fabricación y medición de la estructura conmutada	69
Capítulo 6. Conclusiones y propuesta de trabajo futuro	74
Capítulo 7. Bibliografía	76



Introducción

La tecnología de comunicaciones móviles ha experimentado una gran evolución desde sus inicios, marcando cada generación con mejoras significativas. La quinta generación de comunicaciones móviles, conocida como 5G, promete revolucionar la conectividad global mediante el soporte de una gama más amplia de aplicaciones, como el Internet de las cosas (*Internet Of things*), la realidad virtual y aumentada, y los vehículos de conducción autónoma. Estas diversas aplicaciones se traducen en las siguientes mejoras.

- **Velocidades ultra rápidas.** Las velocidades de 5G pueden alcanzar hasta 20 Gbps, aproximadamente 20 veces más que 4G
- **Baja latencia.** El 5G reduce la latencia a niveles inferiores a 1 ms, en comparación con los 25 ms de 4G
- **Mayor capacidad de conexión.** Se espera que una red 5G pueda manejar hasta 1 millón de dispositivos por km², 10 veces más que 4G.
- **Mayor eficiencia espectral.** El 5G utiliza nuevas técnicas como el conformado de haces y la multiplexación espacial para poder transmitir más datos en el mismo espectro
- **Energía y eficiencia de costos.** La tecnología 5G promete una mejor gestión de la energía y reduce los costos de operación mediante el uso de tecnologías e infraestructuras avanzadas.

Una parte importante de este avance tecnológico son las estaciones base 5G. cuyos componentes clave son las antenas diseñadas específicamente para cumplir con las exigencias de esta tecnología.

El diseño de antenas base para 5G presenta un conjunto de desafíos y oportunidades. Las antenas deben ser capaces de operar en un amplio rango de frecuencias, desde las bandas tradicionales hasta las nuevas bandas milimétricas, esenciales para alcanzar velocidades ultra rápidas y baja latencia. Además, tienen que soportar una densidad de dispositivos enorme y técnicas avanzadas.

La implementación de redes 5G requiere el desarrollo de nuevas antenas planas de banda ancha, necesitando un único elemento para operar en toda la banda media de las comunicaciones 5G. Este tipo de antenas de banda ancha son esenciales porque permiten una transmisión eficiente de señales en un amplio rango de frecuencias, lo que es crítico para manejar la densidad de dispositivos conectados y las altas demandas de datos. La banda media de 5G, que abarca frecuencias entre los 2 y los 6 GHz, es muy importante por ofrecer un equilibrio entre cobertura y capacidad. Dentro de esta banda, la banda C, que abarca desde los 3,4 hasta los 5 GHz, es de gran relevancia para proporcionar servicios 5G urbanos y suburbanos. Esta banda C incluye las distintas bandas destinadas a las comunicaciones móviles, como la banda n48 (3,55-3,7) GHz, n77 Global (3,2-4,2) GHz, n78 Europa (3,3-3,8) GHz y la n79 APAC (4,4-5) GHz. La necesidad que el trabajo plantea cubrir es diseñar una antena capaz de trabajar en todas las bandas comentadas, además de diseñarla con el objetivo de montar una estructura conmutada para estaciones base 5G.



El Trabajo Final de Grado se centra en desarrollar un diseño optimizado de antena base para 5G que cumpla con los estrictos requisitos de rendimiento y eficiencia. Se investigarán diferentes configuraciones de antenas para identificar las soluciones más eficientes. Además, se realizarán simulaciones para validar los diseños propuestos, asegurando que sean viables para su implementación en entornos reales.

En los siguientes capítulos se presentará una revisión de la literatura sobre el diseño de antenas 5G,



Capítulo 1. Motivación y objetivos del trabajo

En este capítulo se plantean los objetivos del trabajo. Como objetivo principal está el diseño y optimización de una celda unidad de una antena conmutada para estaciones base de comunicaciones 5G, buscando mejorar la eficiencia y cobertura de las comunicaciones móviles. Para lograr el objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos secundarios.

- **Analizar las características técnicas y requerimientos de las redes 5G.** Se llevará a cabo una revisión exhaustiva de la literatura y de las especificaciones técnicas de las redes 5G, con el fin de entender los diseños y conocer las necesidades
- **Diseñar un prototipo de antenas conmutadas adaptadas a estaciones base 5G:** Utilizando el software de simulación CST Studio Suite, y considerando las distintas especificaciones técnicas, se desarrollarán diversos prototipos de antenas.
- **Optimizar el rendimiento de las antenas diseñadas.** Se realizarán pruebas y simulaciones para evaluar el rendimiento de los prototipos diseñados, ajustando y mejorando parámetros técnicos para maximizar la eficiencia, ganancia y directividad de las antenas.
- **Proponer mejoras y recomendaciones para futuros diseños.** A partir de los resultados obtenidos, se formularán recomendaciones y mejoras para futuros desarrollos en el diseño de antenas para estaciones base 5G, contribuyendo en el avance de la tecnología y la eficiencia de las redes de comunicación.

Si nos centramos en los objetivos técnicos de la antena, se establecen los siguientes:

- **Factor de reflexión (S_{11}) < -10 dB.** El principal objetivo es garantizar que el factor de reflexión, S_{11} , sea menor que -10 dB en toda la banda de trabajo de la antena. Este valor indica el porcentaje de potencia que no se transmite a la antena. El valor de -10 dB indica que el 10% de la potencia no se transmite. Un factor de reflexión bajo es crucial para asegurar una buena adaptación de impedancia entre la antena y el transceptor, reduciendo las pérdidas que puedan degradar el rendimiento del sistema. El valor de impedancia de la antena deseado es de 50Ω , ya que este es el valor más típico como impedancia de los componentes electrónicos. Consiguiendo una impedancia 50Ω , teóricamente se conseguiría una transmisión total de potencia entre la antena y el transceptor.
- **Eficiencia de radiación elevada.** Otro objetivo clave es lograr un rendimiento elevado de la antena. Esto implica maximizar la eficiencia de radiación y minimizar las pérdidas de energía en los componentes de la antena. Un alto rendimiento asegura que la mayor parte de la energía transmitida se utiliza eficazmente para la comunicación.
- **Directividad de la antena y ancho de haz $\alpha - 3$ dB.** La directividad de la antena es un objetivo crucial, ya que determina la capacidad de la antena para enfocar la radiación en una dirección específica. El ancho de haz $\alpha - 3$ dB se define como el ángulo entre los dos puntos en el diagrama de radiación donde la intensidad de la señal se reduce a la mitad de su valor máximo. Estos parámetros están altamente relacionados. Se desea diseñar una antena cuyo ancho de haz permita la formación de una antena conmutada. Esto significa que, si buscamos una antena conmutada de 4 sectores, el ancho de haz debe ser



aproximadamente de 90° . Si se trata de una antena de 5 sectores, necesitamos un ancho de 72° , y para una antena de 6 sectores, un ancho de 60° .

- **Diseño de una antena conmutada.** Finalmente, el diseño debe incluir la capacidad de hacer una antena conmutada. Esto implica la integración de elementos que permitan intercambiar entre los distintos diagramas de radiación de manera dinámica. Las antenas conmutadas son esenciales en aplicaciones modernas como redes 5G, donde la flexibilidad y la adaptabilidad de la antena son esenciales para el rendimiento y la eficiencia.

Una vez marcados los objetivos del trabajo, revisaremos los diversos estudios sobre el diseño de este tipo de antenas y analizaremos las tecnologías disponibles en el mercado.



Capítulo 2. Antenas para estaciones base 5G

En el siguiente capítulo se exploran los principios fundamentales y las innovaciones recientes en el diseño de antenas para estaciones base 5G. Se aborda la evolución de las tecnologías de antenas, destacando su importancia en la mejora de la eficiencia y cobertura de las redes de comunicaciones modernas.

2.1 Evolución y estado actual de las estaciones base

Las estaciones base de telecomunicaciones móviles han experimentado una evolución significativa desde la introducción de las redes de primera generación, 1G, hasta las redes 5G. A continuación, se presenta un resumen de esta evolución [1][2][3]

- **1G. Primera Generación.** Las primeras estaciones base 1G, introducidas en los años 80, se centraban en la transmisión de voz. Estas estaciones eran grandes y costosas, ofrecían una calidad de llamada muy limitada con problemas de interferencia.
- **2G. Segunda Generación.** Se desplegó en los años 90 y marcó el paso a la tecnología digital con el estándar GSM. Incluyó una mejora en la calidad de transmisión de voz, además de poder enviar SMS. Las estaciones se hicieron más pequeñas y eficientes, además, la capacidad de la red se mejoró con CDMA
- **3G. Tercera Generación.** Las estaciones base empezaron a soportar mayores velocidades de datos, permitiendo servicios como videollamadas o acceso a Internet. El estándar UMTS ofrecía hasta 20 Mbps, Las velocidades de descarga y de subida aumentaron gracias al uso de HSPA
- **4G. Cuarta Generación.** Introdujo LTE, que permitió velocidades de datos superiores, hasta 1 Gbps en condiciones ideales. Las estaciones base 4G son más eficientes y utilizan técnicas avanzadas de modulación y agregación de portadoras.
- **5G. Quinta Generación.** Las estaciones base 5G representan un salto significativo en la tecnología de comunicaciones móviles. Utilizan técnicas avanzadas como *Massive MIMO* y *beamforming* para aumentar la capacidad y eficiencia del espectro. Además, soportan latencia ultra baja y velocidades de datos extremadamente altas. Estas estaciones pueden llegar a trabajar a 26 GHz, lo que requiere una mayor densidad de estaciones base debido a la mejor cobertura de estas frecuencias.

En la figura 2.1 se muestra de manera visual las principales mejoras que han tenido las generaciones de comunicaciones móviles.

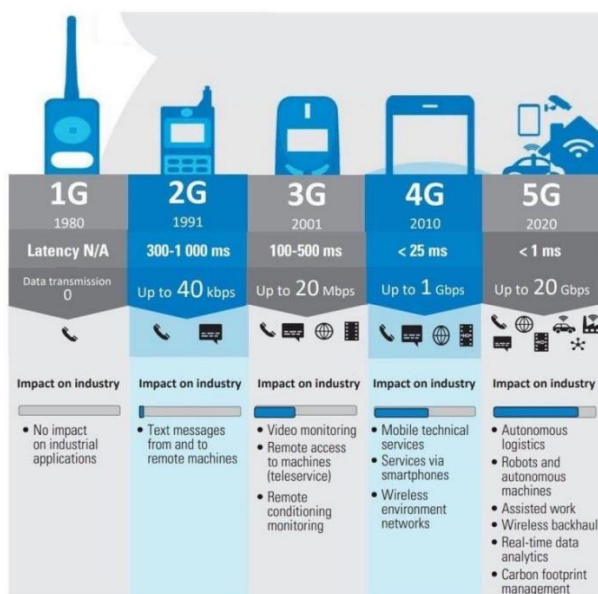


Figura 2.1 Evolución de las comunicaciones móviles. Fuente: Comunicaciones móviles, transparencias bloque 1, Narcís Cardona

En la figura 2.2 se muestra la evolución física de las estaciones base de comunicaciones móviles. Los primeros modelos estaban formados por BBU (Unidad en banda base), conectada por fibra al transceptor, que se conectaba con la antena pasiva a través de un cable coaxial. El siguiente paso fue reducir la distancia de cable coaxial colocando el transceptor cercano a la antena. Las estaciones base 5G pretenden juntar el transceptor con la antena, para formar un array de antenas activas conectado directamente por fibra óptica al elemento en banda base. Este es uno de los principales problemas con el despliegue de las redes 5G, el diseño de antenas inteligentes capaces de dar servicio de calidad a un número masivo de usuarios.

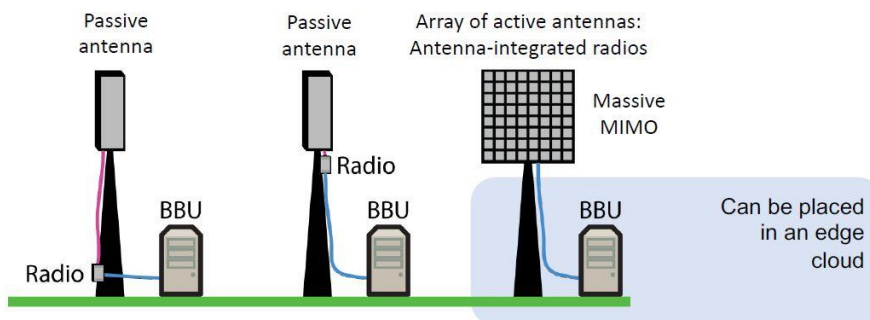


Imagen2.2. Evolución de las estaciones base. Fuente: Multiple Antenna Communications, lecture 14: Practical aspects and Outlook. Emil Björnson.

A medida que las estaciones base de telefonía móvil han evolucionado, las antenas han jugado un papel crucial en esta transformación. Ahora, con la implementación de antenas inteligentes, se pueden aprovechar técnicas avanzadas como *beamforming* o *Massive MIMO*, que permiten optimizar la cobertura y eficiencia de las redes. Algunos ejemplos comerciales de antenas inteligentes 5G son:

- **Huawei AAU (Active Antenna Unit).** Este producto integra tanto la antena como el sistema radio en un solo módulo. Estas antenas utilizan tanto *beamforming* como *Massive*

MIMO. La AAU se ha desplegado en múltiples países, incluyendo operadores en Europa y Asia.

- **Samsung Massive MIMO Radio.** Son antenas diseñadas para ser altamente eficientes y fáciles de desplegar. Samsung ha desplegado estas antenas en Corea del Sur y Estados Unidos, permitiendo aumentar la velocidad de transmisión y bajar la latencia en áreas urbanas densamente pobladas
- **Ericsson AIR (Antenna Integrated Radio).** De la misma manera que Huawei, este elemento combina la antena y el sistema radio en una única unidad y permiten *beamforming* y *Massive MIMO*. Ericsson ha desplegado estas unidades AIR en varias redes 5G de Norte América y Europa
- **ZTE AAU.** ZTE también ofrece unidades que combinan la antena y el sistema radio en un solo dispositivo, con *Massive MIMO* y *beamforming*.
- **Nokia AirScale Active Antenna.** Las antenas de Nokia son altamente configurables y pueden adaptarse a diferentes necesidades de despliegue. Nokia ha colaborado con operadores en Asia y Europa para implementar sus antenas *AirScale* en redes comerciales 5G.

Estas antenas inteligentes son fundamentales para el éxito de las redes 5G, ya que permiten mejorar significativamente la capacidad y cobertura de las comunicaciones móviles, adaptándose a las crecientes demandas de datos y usuarios en entornos modernos.

En las figuras 2.3-2.6 se muestran los distintos modelos comerciales de antenas 5G. Cada modelo tiene distintos productos, cuya diferencia son el número de transmisores y receptores que conforman la antena. En cada una de las figuras se especifica el nombre del producto y el número de Tx/Rx que forman la antena.

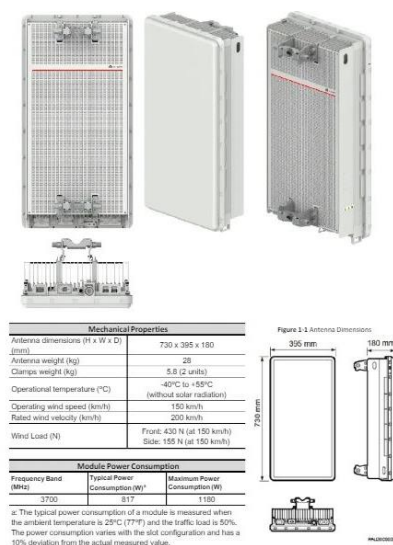


Figura 2.3 Huawei AAU5636w. Fuente:[4]



Figura 2.4 Antenas Samsung Massive MIMO Radio 32T32R Fuente. [5]



Figura 2.5 Ericsson AIR 6449 Fuente [6]



Figura 2.6 Nokia AirScale Active Antenna Habrok 64 Massive MIMO. Fuente [7]

Tras analizar la evolución y estado actual de las estaciones base 5G, es crucial explorar la tecnología que potencia estas redes. En este contexto, la tecnología MIMO aparece como un componente fundamental, permitiendo una mayor eficiencia espectral y mejorando la capacidad y cobertura de las redes 5G. A continuación, se detallará el funcionamiento de MIMO y su impacto en las comunicaciones móviles modernas.

2.2 Tecnología MIMO

En el desarrollo de comunicaciones móviles e inalámbricas, la tecnología MIMO (*Multiple Output Multiple Input*) ha sido fundamental para mejorar la capacidad y la eficiencia de las redes. La evolución ha llevado a la implementación de MU-MIMO, que mejora con la aparición de *Massive MIMO*.

2.3.1 MIMO

MIMO es una técnica que utiliza múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor, mejorando la capacidad de transmisión y recepción de datos. Al utilizar varias rutas espaciales, MIMO puede aumentar significativamente la eficiencia espectral, mejorando la calidad de la señal. [9]

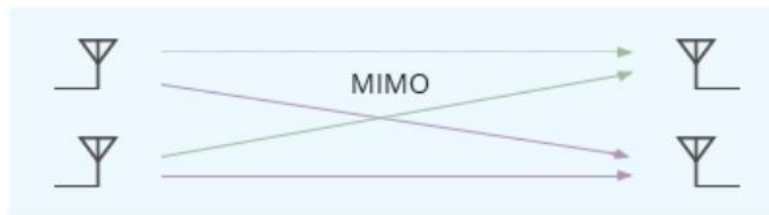


Figura 2.7. MIMO. Fuente [10]

2.3.2 MU-MIMO

MU-MIMO es una extensión de MIMO que permite a una estación base comunicarse con múltiples usuarios a través de diferentes flujos de datos espaciales. De esta manera, se mejora la capacidad y eficiencia del sistema. MU-MIMO es especialmente útil en entornos densamente poblados, donde varios dispositivos necesitan acceder a la red al mismo tiempo [11][12][13]

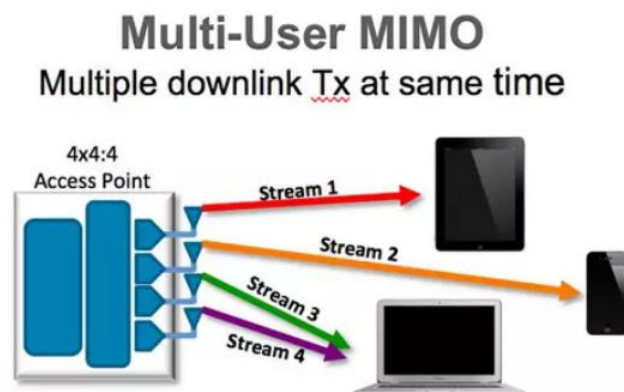


Figura 2.8. MU-MIMO. Fuente:[14]

2.3.3 Massive MIMO

Massive MIMO lleva el concepto de MU-MIMO a gran escala al emplear un gran número de antenas en las estaciones base, siendo decenas o cientos de elementos radiantes. Esta configuración permite servir simultáneamente a un gran número de usuarios, mejorando drásticamente la eficiencia espectral y energética. Las antenas adicionales permiten un mayor grado de control sobre los haces de radiación, lo que reduce la interferencia y mejora la calidad del servicio incluso en entornos con alta densidad de usuarios. [15][16][17]

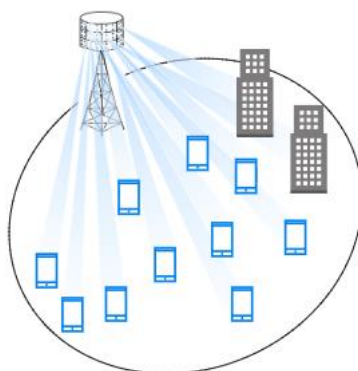


Figura 2.9. Massive MIMO. Fuente: [18]

En la tabla 2.1 se muestran las ventajas y desventajas de MIMO, MU-MIMO y *Massive MIMO*.

	Ventajas	Desventajas
MIMO	Aumento significativo de la tasa de datos	Complejidad en el diseño y en la implementación
	Mejora la calidad de la señal y la cobertura	Requiere más recursos de computación para el procesamiento de la señal
	Reducción de las interferencias	
MU-MIMO	Capacidad para servir múltiples usuarios simultáneamente	Mayor complejidad en la gestión de interferencias entre usuarios
	Mayor eficiencia espectral en entornos densamente poblados	Requiere algoritmos avanzados de procesamiento de señales.
	Mejor utilización de los recursos de la red	

Massive MIMO	Mejora significativa en la eficiencia espectral y energética	Altos costos de implementación debido a la gran cantidad de antenas
	Capacidad para atender a gran número de usuarios simultáneamente	Mayor complejidad en el diseño y en la gestión de la red.
	Mayor control sobre los haces de radiación reduciendo las interferencias	Necesidad de algoritmos de procesamiento de señales más avanzadas

Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de la tecnología MIMO

Tras explorar las capacidades y beneficios de la tecnología MIMO, es esencial profundizar en los mecanismos que optimizan la dirección y control de las señales. *Beamforming*, *beamsteering* y *beamswitching* son las técnicas que permiten una mayor precisión y adaptabilidad en la transmisión de señales, potenciando aún más la capacidad de las redes modernas. A continuación, se detallan estos métodos y como permiten maximizar el rendimiento de las comunicaciones móviles e inalámbricas

2.3 Técnicas de conformado de haces

En el diseño de antenas para estaciones base 5G, son fundamentales tres técnicas para mejorar la eficiencia y cobertura de las redes móviles: *Beamforming*, *beamsteering* y *beamswitching*. Cada una de estas técnicas tiene sus ventajas e inconvenientes, y se implementan en diferentes escenarios dependiendo de las necesidades específicas de la red

2.3.1 *Beamforming*

El *beamforming* es una técnica que se basa en el uso de un array de antenas, donde cada elemento puede emitir una señal con una amplitud y fase específicas. Al modificar estos parámetros, las ondas emitidas se combinan de manera constructiva y destructiva en las direcciones deseadas. Este proceso se logra mediante algoritmos de procesamiento de señales que calculan los ajustes necesarios para formar un haz en la dirección deseada.

Como desventajas, el *beamforming* es una técnica muy compleja, ya que requiere de un control preciso de las señales de cada elemento del array, lo que puede ser técnicamente complejo y costoso. Además, la necesidad de múltiples antenas y hardware avanzado aumentan los costos de implementación. [19][20][21].

En la figura 2.10 se muestra cómo funciona el *beamforming* y cómo afecta el número de antenas.

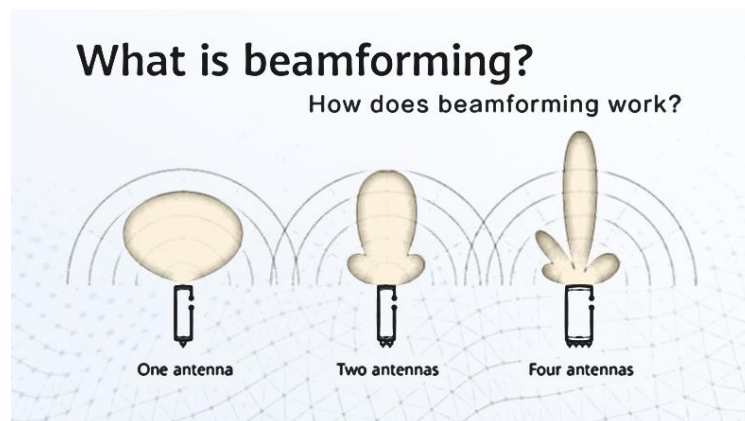


Figura 2.10. Beamforming Fuente [22]

2.3.2 Beamsteering

El *beam steering* es una técnica que permite cambiar la dirección del haz de una señal sin mover físicamente el array de antenas. Esto es posible mediante el ajuste de las fases de los elementos, permitiendo que el haz de la señal se dirija hacia diferentes direcciones.

La capacidad de dirigir la señal hacia el objetivo reduce la pérdida de energía y mejora la energía general del transmisor.

Similar al *beamforming*, el *beam steering* requiere de un control preciso y sofisticado del hardware para ajustar las fases de las señales. Además, los cambios en la dirección del haz pueden introducir latencia, lo que podría afectar al rendimiento en aplicaciones de baja latencia.

En la figura 2.11 Se muestra un array de antenas con *beam steering*. El ángulo muestra como varía la dirección del haz principal del diagrama de radiación. Este ángulo está directamente relacionado con el desfase progresivo entre los distintos elementos que conforman el array. [23][24]

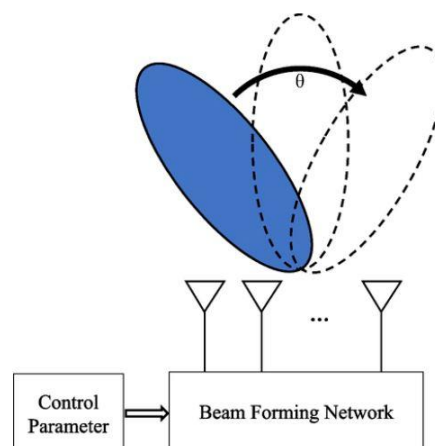


Figura 2.11. Beam steering. Fuente [25]

2.3.3 Beamswitching

El *beamswitching* implica cambiar entre diferentes haces predefinidos para dirigir la señal hacia el receptor. En lugar de ajustar continuamente las fases y amplitudes de las señales, esta técnica

utiliza múltiples haces fijos y selecciona el más adecuado en cada momento. Es una técnica más sencilla que las anteriores, ya que se basa en cambiar entre haces predefinidos. Además, permite cambios rápidos entre diferentes haces sin necesidad de ajustes.

Sin embargo, esta técnica está limitada en cobertura al estar basa en haces predefinidos. Tampoco ofrece el mismo nivel de precisión en la dirección de la señal que el *beamforming* o el *beam steering*, lo que puede llevar a una peor calidad de señal en algunos casos.

En la figura 2.12 se observa un conjunto de antenas con *beamswitching*, los 4 diagramas de radiación están predefinidos, y se controlan con las entradas de la red de alimentación, normalmente esta red suele ser un conmutador 1xN, siendo N el número de diagramas distintos. [26][27]

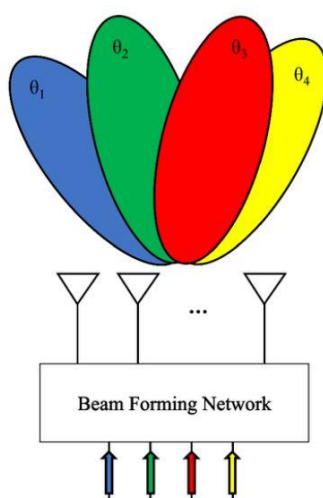


Figura 2.12. Beamswitching. Fuente [25]

En la tabla 2.2 se recogen las ventajas y desventajas de cada técnica para poder compararlas.

	Ventajas	Desventajas
<i>Beamforming</i>	Mejora la calidad de la señal y reduce la interferencia	Requiere algoritmos complejos de procesamiento de señales
	Aumenta la eficiencia espectral y la capacidad de la red	Costoso de implementar debido al hardware y al elevado número de antenas
	Optimiza la cobertura y el rendimiento de las áreas densamente pobladas	Sensible a cambios en el entorno y movimiento del usuario

<i>Beam steering</i>	Permite la orientación precisa de la señal hacia los usuarios específicos	Requiere sistemas avanzados de control y seguimiento del usuario
	Aumenta la capacidad de la red al enfocar los recursos hacia áreas de alta demanda	Puede tener limitaciones en la frecuencia de cambio de dirección del haz
	Mejora la eficiencia energética al reducir la dispersión de la señal	La implementación y el mantenimiento es más costoso debido a la necesidad de seguimiento continuo
<i>Beamswitching</i>	Facilita el cambio rápido de la dirección del haz para mantener una conexión óptima	Puede generar interrupciones breves con los cambios de haz
	Adecuando para redes dinámicas con usuarios móviles	No ofrece la misma precisión en el apuntamiento de la señal que las otras técnicas
	Menor complejidad en comparación con <i>beamforming</i> y <i>beam steering</i>	Eficiencia variable dependiendo de la frecuencia de cambios en la dirección del haz

Tabla 2.2. Ventajas y desventajas de Forming

Después de explorar las técnicas avanzadas de conformado de haces, y su impacto en la mejora de las comunicaciones móviles, nos enfocamos en la implementación práctica de estas técnicas a través del uso de antenas impresas. Estas antenas, con su diseño compacto, son cruciales para llevar a cabo las técnicas avanzadas mencionadas, proporcionando un rendimiento óptimo en las aplicaciones modernas. A continuación, se analiza las características y las ventajas de las antenas impresas en este contexto tecnológico.

2.4 Antenas impresas

Las antenas impresas, también conocidas como antenas *microstrip*, son un tipo de antena caracterizada por su estructura plana y delgada, fabricada mediante técnicas de impresión sobre un sustrato dieléctrico. Estas antenas se componen principalmente de tres capas, un parche conductor, que suele ser el elemento radiante, un plano de tierra, ambas capas separadas por un sustrato dieléctrico.

El principio de funcionamiento de las antenas impresas es la resonancia electromagnética que ocurre entre el parche radiante y el plano de tierra. Al aplicar una señal a la antena, se genera una onda electromagnética que se propaga a través del sustrato y se radia al espacio libre. La geometría del parche y las propiedades del sustrato determinan la frecuencia de resonancia y las características de radiación de la antena.[28]



Ventajas:

- **Tamaño compacto.** Son muy delgadas y pueden llegar a ser muy pequeñas, lo que las hace ideales en aplicaciones donde el espacio es limitado.
- **Facilidad de fabricación.** Pueden ser producidas en masa utilizando técnicas de impresión estándar.
- **Flexibilidad en el diseño.** Se pueden diseñar con diferentes formas y configuraciones para adaptarse a diversas aplicaciones.
- **Integración en circuitos electrónicos.** Las antenas impresas son muy fáciles de integrar en circuitos impresos (PCB), permitiendo una mayor miniaturización y simplificación del diseño.

Desventajas:

- **Limitación en el ancho de banda.** Las antenas impresas están muy limitadas en ancho de banda, lo que imposibilita su uso en aplicaciones de banda ancha.
- **Eficiencia reducida.** Comparadas con otras antenas, las antenas impresas pueden tener una eficiencia de radiación menor, sobre todo en frecuencias bajas.
- **Sensibilidad a los materiales del sustrato.** Son muy sensibles a los materiales de fabricación, que afectan significativamente al rendimiento de la antena.

Las antenas impresas son ampliamente utilizadas en diversas aplicaciones debido a sus ventajas. Se encuentran comúnmente en dispositivos móviles, sistemas de comunicaciones inalámbricas y aplicaciones de radar y satélites entre otras.

Existen 4 formas distintas de alimentar este tipo de antenas impresas: Por *microstrip*, por cable coaxial, por acoplo por ranura y por acoplo electromagnético. Nos centramos en este último por ser el método más utilizado.

El acoplo electromagnético o acoplo por proximidad implica colocar una línea de alimentación cerca del parche radiante, pero en una capa diferente. La señal se transfiere por proximidad a través del campo electromagnético que se forma entre la línea de alimentación y el parche radiante. [29]

Ventajas:

- **Aislamiento de la fuente de alimentación.** Esto reduce las interferencias mutuas entre la antena y la fuente
- **Eficiencia mejorada.** Al no estar en contacto directo con la antena, se minimizan las pérdidas por conductividad y se mejora la eficiencia de la antena.

Desventajas:

- **Complejidad de alineación.** Requiere un alineamiento preciso entre la línea de alimentación y el parche radiante, lo que puede complicar el diseño y la fabricación.

En este diseño se utiliza una variación de este tipo de alimentación. Solo una capa de dieléctrico, donde el parche radiante está conectado directamente a tierra. Esta variación permite ahorrar

materiales y facilita el diseño, con la desventaja de que la radiación de la línea de transmisión pueda afectar considerablemente al diagrama de radiación total de la antena.

En la figura 2.13 se muestra una antena de tipo parche con sus distintos parámetros. La estructura azul es la parte radiante, normalmente suele ser de cobre, con una longitud L , anchura W y grosor t . La estructura gris es el sustrato. Se pueden utilizar distintos materiales, pero el parámetro principal es su grosor h . Normalmente t mucho más pequeño que h . Debajo del sustrato se encuentra el plano de tierra del mismo material y grosor que el parche. El material utilizado para el sustrato, como el tamaño del plano de tierra, son factores determinantes en el funcionamiento de la antena.

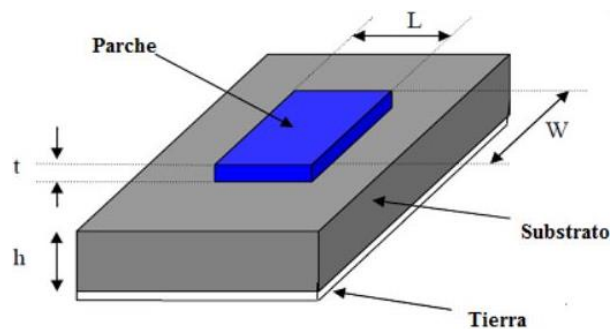


Figura 2.13. Patch Antenna Fuente [30]

En la figura 2.14 se detalla la forma de alimentación por acoplo electromagnético. Este tipo de alimentación necesita dos capas de sustrato, la capa superior contiene el parche radiante y la capa inferior la línea de alimentación. Normalmente las dos capas son del mismo sustrato.

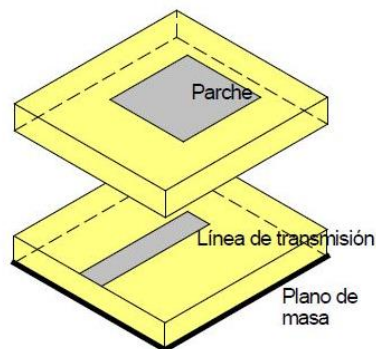


Figura 2.14. Alimentación por acoplo electromagnético. Fuente [31]

Después de haber estudiado las características, ventajas e importancia de las antenas impresas en las comunicaciones móviles, se analizarán tres tipos de antenas planas muy útiles para las comunicaciones 5G. La ILA es conocida por su capacidad de mejorar la directividad y trabajar con múltiples frecuencias simultáneamente. La apertura *Notch* destaca por su capacidad de rechazar interferencias y operar eficientemente en bandas específicas. La antena Vivaldi es conocida por su ancho de banda extremadamente amplio y su alta directividad. Todas estas ventajas han sido determinantes a la hora de decidir cómo abordar el diseño. A continuación, se profundizará en el funcionamiento y ventajas y desventajas de cada una de estas antenas.

2.4.1 ILAs

La antena en L invertida es un tipo de antena monopolo que se utiliza comúnmente en aplicaciones de radio frecuencia. Consiste en un segmento vertical que se conecta con un segmento horizontal, formando una “L” invertida. Esta configuración permite ajustar la longitud de los segmentos para optimizar el rendimiento de la antena en diferentes frecuencias. [32][33]

Ventajas:

- **Diseño compacto.** La ILA ofrece un diseño compacto y relativamente fácil de instala, esto la hace adecuada para aplicaciones donde el espacio es limitado.
- **Buena eficiencia de radiación.** Debido a su estructura, puede proporcionar una buena eficiencia de radiación, especialmente, cuando se ajusta correctamente a la frecuencia de operación, siendo esta $\lambda/4$
- **Versatilidad.** Es una antena muy versátil que puede ser utilizada en diversas aplicaciones, desde sistemas de comunicaciones móviles hasta estaciones de radio amateur.
- **Facilidad de ajuste.** La longitud de los segmentos se puede ajustar para optimizar el rendimiento en una amplia gama de frecuencias, lo que permite una mayor flexibilidad de uso

Desventajas:

- **Interferencias.** Las ILAs pueden ser muy sensibles a las interferencias, especialmente en entornos urbanos donde hay muchas fuentes de señales electromagnéticas.
- **Requiere plano a tierra.** Para un rendimiento óptimo, la ILA necesita una toma a tierra, lo que puede complicar la instalación en algunas ubicaciones
- **Patrón de radiación limitado.** El patrón de radiación de una ILA puede ser más limitado en comparación con otras antenas, afectando a su eficiencia en ciertas direcciones.
- **Eficiencia variable.** La eficiencia de la antena puede variar significativamente dependiendo de la configuración y las condiciones del entorno, lo que requiere de ajustes y optimizaciones frecuentes.

En la figura 2.15 se muestra cómo se pasa de un monopolo a una ILA “doblado” el monopolo. Esto permite ahorrar espacio en altura. La distancia entre la toma a tierra, un cortocircuito, y el final de la antena, un circuito abierto, debe mantenerse en $\lambda/4$ cuartos.

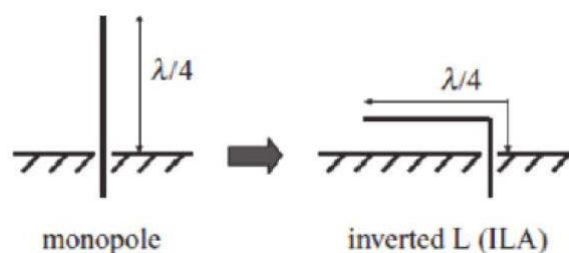


Figura 2.15. Evolución de un monopolo a una ILA. Fuente: Presentación Antenas 4G, 5G y WiFi, Tipos de antenas más habituales. ITEAM

2.4.2 Antena Notch

Las antenas tipo *Notch*, también conocidas como antenas de ranura o slot antenas, son un tipo de antena que consiste en una ranura o hendidura estrecha en una superficie conductora, típicamente en un plano de tierra. Estas antenas se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones debido a su diseño simple y capacidad para operar en las bandas de frecuencias específicas.

El principio de funcionamiento de una antena *Notch* se basa en la resonancia de la ranura que actúa como un dipolo, donde la longitud de la ranura determina la frecuencia de resonancia. Para el caso del dipolo, la longitud debe de ser $\lambda/2$ de la frecuencia de resonancia mientras que para la ranura esta longitud se reduce a $\lambda/4$. Cuando una corriente de radiofrecuencia se aplica al plano de tierra, la ranura permite que las ondas se radien de manera eficiente. Las propiedades de radiación de la antena se pueden ajustar cambiando la forma y tamaño de la ranura. [34]

Ventajas:

- **Diseño simple.** Las antenas *Notch* tienen una estructura sencilla y son fáciles de fabricar, lo que las hace adecuadas para aplicaciones donde la simplicidad y el costo son importantes.
- **Compatibilidad.** Estas antenas pueden ser integradas fácilmente en superficies planas, lo que las hace ideales para aplicaciones en dispositivos portátiles.
- **Banda estrecha.** Pueden ser diseñadas para operar en bandas de frecuencias muy específicas, lo cual es útil para aplicaciones que requieren filtrado de frecuencia selectivo.
- **Polarización controlable.** La polarización de la antena puede ser controlada y ajustada mediante el diseño de la ranura, permitiendo una mayor flexibilidad en el uso de la antena

Desventajas:

- **Ganancia limitada.** Las antenas *Notch* suelen tener ganancia menor en comparación con otros tipos de antenas, lo que puede limitar su efectividad en aplicaciones de larga distancia.
- **Ancho de banda estrecho.** Aunque su capacidad para operar en bandas estrechas es una ventaja en algunas aplicaciones, también puede ser una limitación para usos que requieren un ancho de banda amplio.
- **Sensibilidad al entorno.** El rendimiento de las antenas *Notch* puede verse modificado por el entorno, incluyendo la proximidad a otros objetos conductores.
- **Dificultad en el diseño para radiofrecuencias altas.** El diseño y fabricación de antenas *Notch* para frecuencias muy altas pueden ser complejas y requerir técnicas de precisión.

En la figura 2.16 se muestra como es la estructura de la apertura *Notch*.

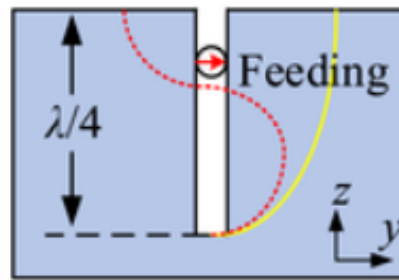


Figura 2.16. Apertura Notch. Fuente. [35]

2.4.3 Antena Vivaldi

Las antenas Vivaldi son un tipo de antenas de banda ancha conocidas por su estructura de ranura cónica. Estas antenas zona adecuadas para aplicaciones que requieren alta directividad y amplio rango de frecuencias. La estructura de la antena se asemeja a una forma de cuerno que se ensancha exponencialmente desde una zona de alimentación.

Las antenas Vivaldi funcionan mediante la radiación de ondas electromagnéticas a través de la ranura que se ensancha progresivamente. Este diseño permite que la antena mantenga una impedancia constante a lo largo de su longitud, facilitando la propagación de señales en una amplia gama de frecuencias. La transición gradual de la ranura minimiza las reflexiones y las pérdidas, permitiendo una transmisión eficiente de las señales electromagnéticas. [36][37]

Ventajas:

- **Amplio ancho de banda.** Las antenas Vivaldi son capaces de operar en una amplia gama de frecuencias, lo que las hace ideales para aplicaciones de banda ancha, como radares y comunicaciones por microondas.
- **Alta directividad.** Estas antenas ofrecen un patrón de radiación altamente direccional, mejorando la precisión y el alcance de la señal. Esto es beneficioso en aplicaciones que requieren un enfoque preciso.
- **Diseño simple y reproducible.** Las antenas Vivaldi son relativamente fáciles de fabricar usando técnicas de fotolitografía y otros métodos estándares de la fabricación de PCB, lo que permite una producción en masa eficiente.
- **Eficiencia de radiación.** Debido a su diseño de ranura cónica, las antenas Vivaldi tienen una eficiencia de radiación alta, lo que maximiza la potencia transmitida y recibida.

Desventajas:

- **Tamaño físico.** Aunque la estructura es simple, el tamaño puede ser considerable, especialmente a frecuencias más bajas, lo que limita su uso en aquellas aplicaciones donde el espacio sea una restricción.
- **Complejidad en el diseño de alimentación.** El diseño de la alimentación para estas antenas puede ser complejo, ya que debe mantener una transición suave de la impedancia para evitar reflexiones y pérdidas.

- **Sensibilidad a las condiciones del entorno.** El rendimiento de las Vivaldi puede reducirse por las condiciones de contorno, incluyendo la proximidad a otros metales y la variación en los materiales cercanos.

En la figura 2.17 se muestran las partes de la antena Vivaldi

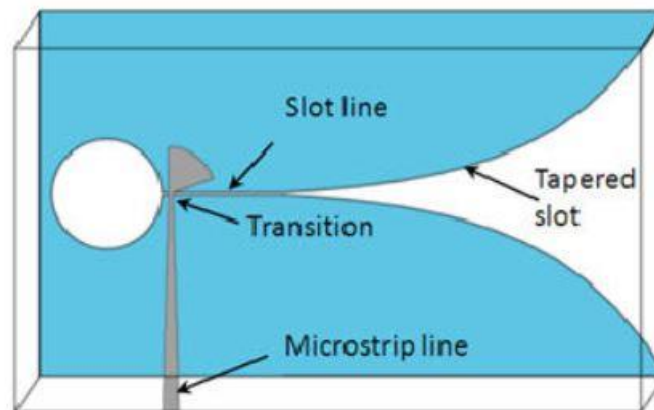


Figura 2.17. Antena Vivaldi. [38]

Las antenas planas, con su capacidad multibanda y su diseño compacto, son esenciales para cumplir con las altas demandas de cobertura y capacidad en entornos poblados. Este capítulo ha demostrado como la integración de estas tecnologías en estaciones base 5G es fundamental para optimizar y garantizar una conectividad más rápida y fiable para los usuarios.

Después de haber explorado las características, ventajas y desventajas de las antenas impresas en las comunicaciones modernas, nos enfocamos en los elementos base optimizados propuestos para la celda unidad. Estos elementos se desarrollan con el objetivo de maximizar el rendimiento y eficiencia de las antenas, integrando avances tecnológicos que permiten una mejor funcionalidad y adaptabilidad en diversas aplicaciones. A continuación, se detallan los diseños y optimizaciones implementadas en estos elementos.

Capítulo 3. Elementos base optimizados propuestos para celda unidad

En este capítulo se mostrará el proceso que se ha seguido hasta llegar a la celda base. Desde un primer prototipo básico hasta el diseño final optimizado, dando importancia a ciertos parámetros que han sido determinante, y explicando los motivos de las decisiones tomadas durante el diseño.

Para diseñar los distintos modelos se ha utilizado el software CST Studio Suite, un programa profesional utilizado por diversas empresas tecnológicas dedicadas al diseño, análisis y optimización de componentes y sistemas electromagnéticos. Para el diseño se ha analizado el parámetro S_{11} de la antena y el parámetro Z_{11} para observar que parámetros modificar. El parámetro Z_{11} nos muestra la impedancia que ve el puerto. El objetivo es una impedancia de parte real de 50Ω . En este gráfico se observa las frecuencias de resonancia de la estructura, en el cambio entre el comportamiento capacitivo e inductivo de la antena, es decir, la parte imaginaria pasa de ser negativa a positiva. La frecuencia en la que la parte imaginaria es nula es la frecuencia de resonancia. Para una completa adaptación, se busca un valor de impedancia de 50Ω en las frecuencias de resonancias. También se ha utilizado el CST para observar las corrientes y poder localizar y entender las zonas resonantes. Por último, se ha utilizado para visualizar la eficiencia de radiación, la eficiencia total, y el diagrama de radiación de la antena en ambos planos. Adicionalmente se han usado diversas funciones que se comentarán durante la explicación del diseño.

Antes de comenzar el diseño, hay que analizar las condiciones de las antenas dedicadas a estaciones base. Estas condiciones son el tamaño físico, la ganancia mínima necesaria, los materiales utilizados, las técnicas de fabricación y la forma de implementación.

Al tratarse de una antena destinada a estaciones base 5G, el tamaño de la antena no es importante ya que se localizan en zonas elevadas. Para el caso de la banda media de comunicaciones móviles 5G, no hay ganancia mínima requerida en las antenas. Es evidente que, cuanto mayor sea esta ganancia, mejor. Sin embargo, si el diseño estuviese destinado a la banda de milimétricas, se necesita una ganancia capaz de compensar las pérdidas de propagación de las frecuencias utilizadas. Existen cientos de materiales distintos que afectan de una manera u otra al diseño. Para el diseño se han utilizado los materiales más comunes, un sustrato de FR-4 de grosor de 1.5 mm, con un valor de permitividad relativa de 4.4, recubierto por ambos lados de una capa de cobre de 0.036 mm. Se han elegido estos materiales por su precio económico y por la facilidad de fabricación. Por último, hay que tener en cuenta que en el centro de la antena deberá estar colocado la parte electrónica que implemente la técnica de *beamswitching*.

En las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran las estructuras radiantes utilizadas en antenas dedicadas a estaciones base 5G.

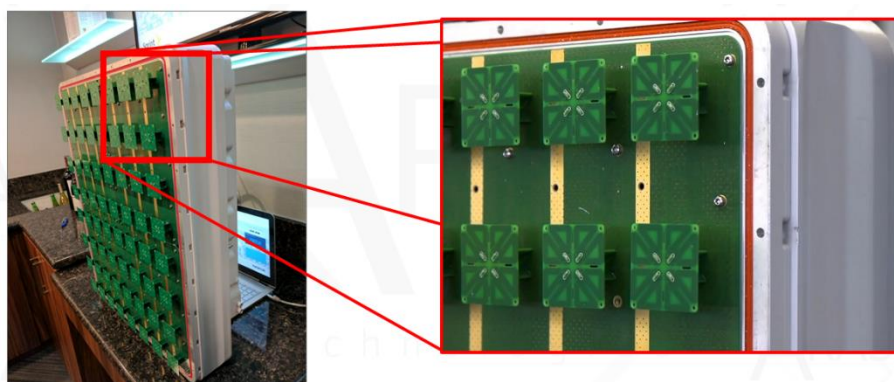


Figura 3.1. Parches radiantes en antenas Huawei AAU 64T64R. Fuente [39]



Figura 3.2. Parches radiantes en antenas Nokia AirScale Massive MIMO. Fuente [40]

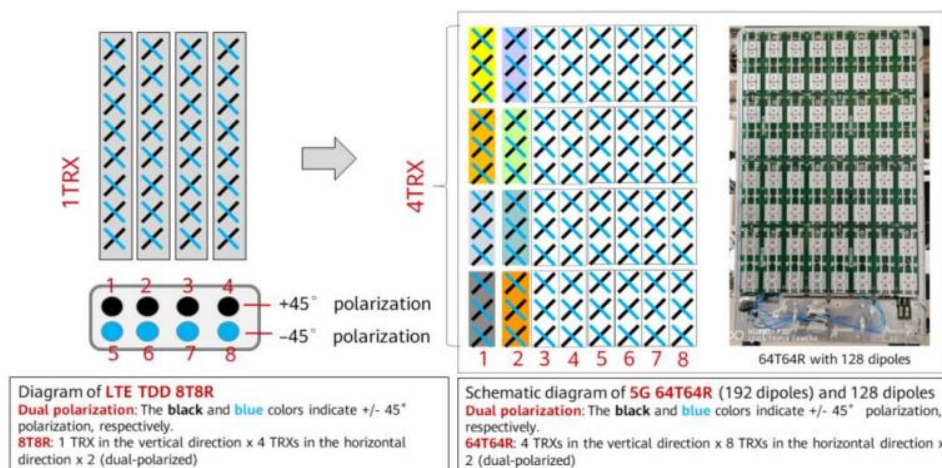


Figura 3.3. Estructura de una antena Huawei AAU Massive MIMO. Fuente [41]

3.1 Primer modelo (ILA y Notch)

El primer diseño surge de la unión de una ILA, por su capacidad de multibanda, con una antena de apertura tipo *Notch*, por su fácil integración.

Durante el desarrollo del trabajo, se referenciará a la capa radiante como capa superior, y a la capa de la línea de alimentación, como capa inferior.

Durante el desarrollo del trabajo se han hecho cientos de simulaciones distintas variando todos los parámetros que influyen, de mayor o menor medida, en el comportamiento de la antena. Por simplicidad al lector, se mostrarán únicamente las simulaciones más relevantes.

En la figura 3.4 y 3.5 se muestra el prototipo y en la tabla 3.1 se incluyen todos los parámetros del diseño.

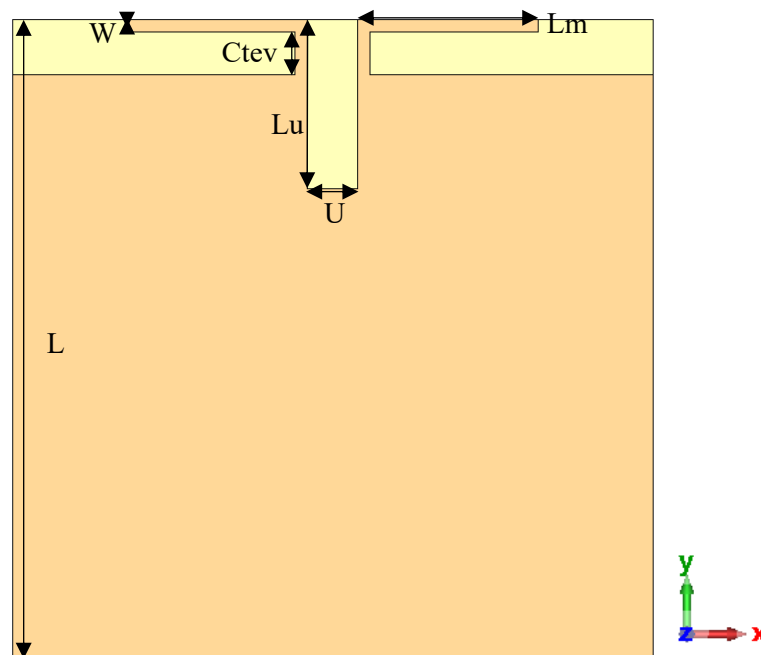


Figura 3.4. Primer prototipo

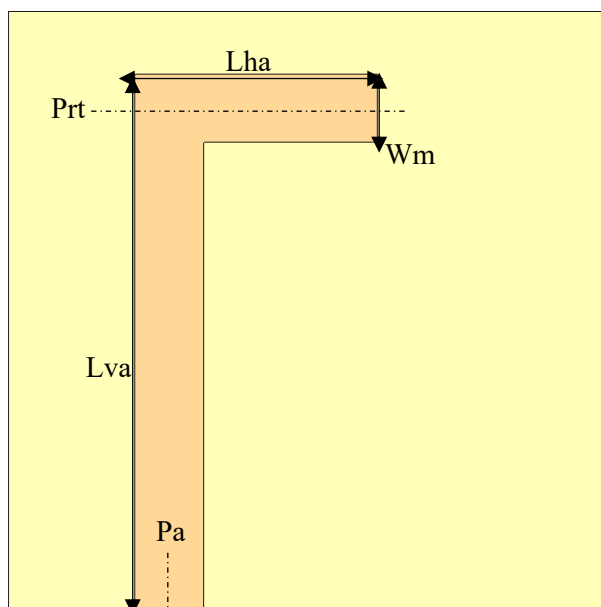


Figura 3.5. Primer prototipo por ambas caras

Parámetro	Valor (mm)	Significado
L	25.7	Longitud total de la antena
Lu	6.8	Longitud de la apertura <i>Notch</i>
Lm	7.25	Longitud horizontal del monopolo
Ctev	1.7	Separación entre el monopolo y el plano
U	2	Anchura de la apertura <i>Notch</i>
W	0.5	Anchura de los monopolos
Wm	2.94	Anchura de la línea de alimentación
Lha	7.8	Longitud horizontal de la línea de alimentación
Lva	10.22	Longitud vertical de la línea de alimentación
Pa	6	Posición central del segmento vertical de la línea de alimentación con respecto al centro de la estructura.

Tabla 3.1. Parámetros de diseño del primer prototipo

El primer paso fue hacer el diseño teórico de ambas antenas. Para ello se calcularon sus frecuencias de resonancia.

Al tratarse de antenas sencillas, los únicos cálculos previos necesarios son la longitud de onda de resonancia. Para el monopolo y la apertura *Notch*, la longitud física debe ser una cuarta parte de la longitud de onda de resonancia.

Los monopolos se diseñaron para la frecuencia final de la banda media, a 6 GHz. Para calcular la longitud de onda hay que tener en cuenta los materiales de la antena. En la ecuación 3.1 se calcula la longitud de onda.

$$\lambda_g = \frac{c_0}{f\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \quad (3.1)$$

En este caso, la permitividad relativa vale 4.3 mientras que la permeabilidad relativa tiene un valor muy cercano a 1.

Se obtiene un valor teórico de 24.1 mm, y la longitud del monopolo es de 6.02 mm. Esta longitud es la longitud total de la antena, incluyendo ambas partes, la vertical y la horizontal. Como primer diseño, consideramos una longitud vertical, ctev, de 2 mm y una longitud horizontal de 4 mm

Esta longitud de onda de ha utilizado como longitud total del parche, formando un parche cuadrado, una forma básica y sencilla de modificar para su posterior incorporación en la antena conmutada.

Para la apertura *Notch*, el cálculo es similar. Se decidió diseñarla para una frecuencia de trabajo más baja, a 4 GHz. La longitud de onda calculada para la antena *Notch* es de 36.14 mm, haciendo que el tamaño físico de la apertura sea de 9.04 mm.

Para saber en qué punto de la apertura *Notch* hay que alimentar, primero se utilizó la alimentación *discrete port*. Esta alimentación consiste en un cable conductor perfecto entre dos puntos. Para definir este puerto discreto es necesario elegir dos puntos de la antena. Una vez seleccionados los puntos, se selecciona el puerto discreto.

Al utilizarse este tipo de alimentación no es necesario la línea de transmisión en la capa inferior de la antena, por lo que se elimina esta capa.

En la figura 3.6 se muestra la pestaña de configuración del puerto discreto. Se observa como permite variar los resultados entre parámetros S, el voltaje o la corriente. También permite poner el valor de la impedancia de referencia del puerto y modificar las coordenadas de los puntos del puerto. Para el diseño, las coordenadas Y1 e Y2, han sido determinantes. Se han realizado varias simulaciones para encontrar las coordenadas óptimas.

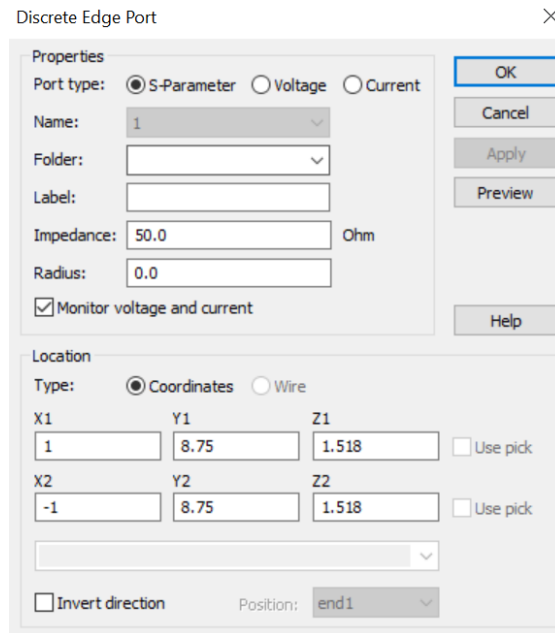


Figura 3.6. Herramienta Discrete Edge Port.

L_m y $ctev$ han sido determinantes en el funcionamiento de la antena. Con los valores teóricos, no se obtiene la respuesta esperada. Analizando el valor Z_{11} de la antena, se considera modificar estos parámetros. Para ello, se utiliza una herramienta de CST, *Sweep parameter*, que permite hacer una secuencia de parámetros variando y simulando sus valores. De la figura 3.7 hasta la 3.10 se muestran las distintas simulaciones realizadas hasta llegar al valor óptimo

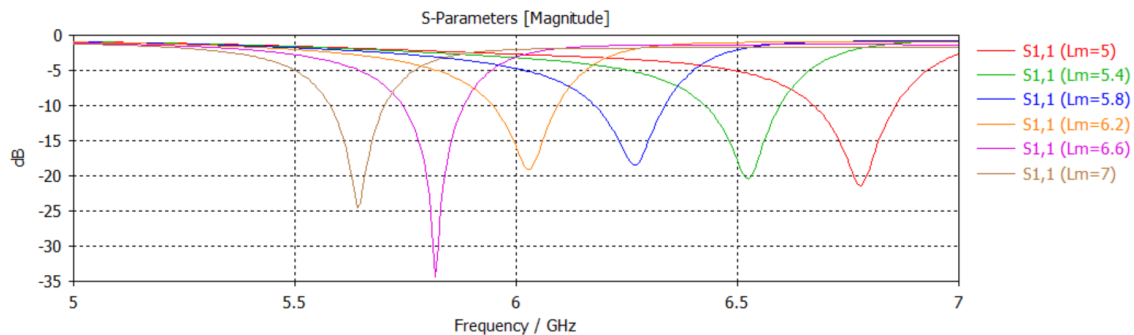


Figura 3.7. S_{11} de la antena variando L_m con $ctev$ 2 mm y U 2 mm

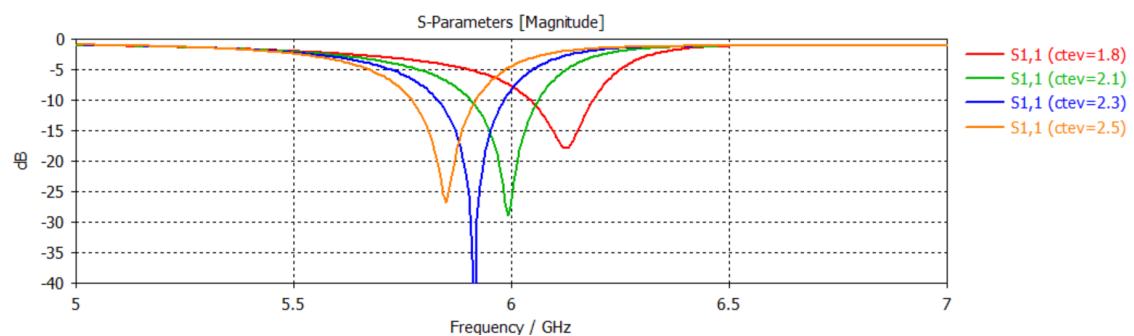


Figura 3.8. S_{11} de la antena variando $ctev$ con L_m 6.2 mm y U 2 mm

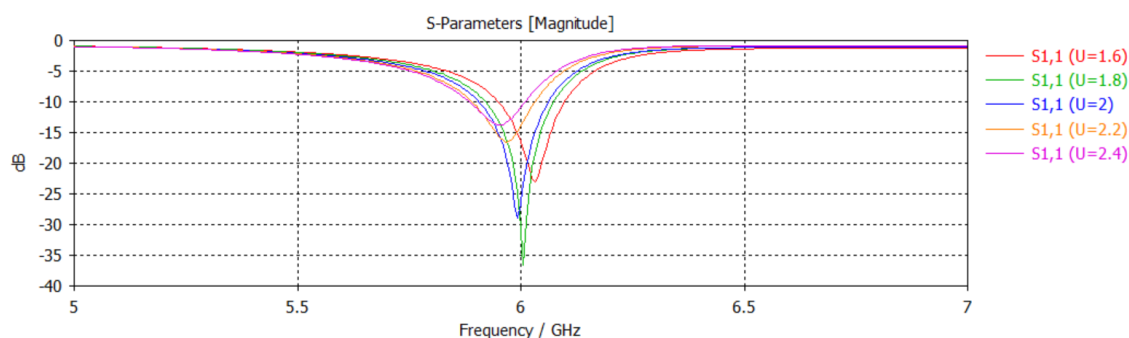


Figura 3.9. S_{11} de la antena variando U con L_m 6.2 y cte_v 2.1

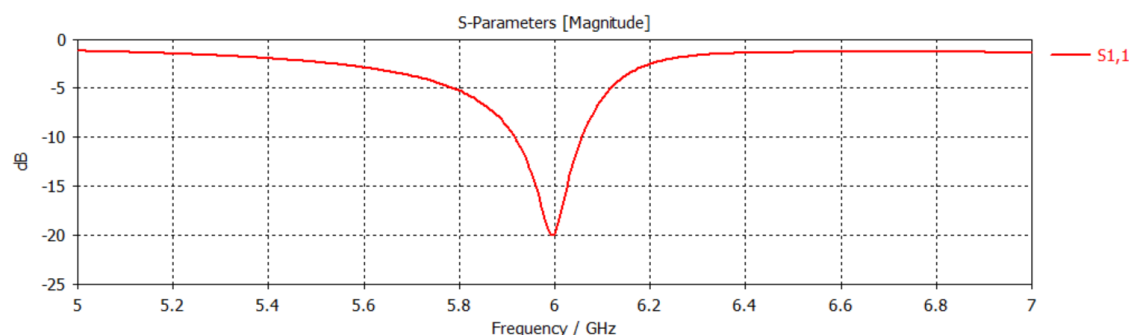


Figura 3.10. S_{11} de la antena optimizando los valores anteriores. L_m 6.25mm, cte_v 1.7mm y U 2mm

La longitud física de la apertura *Notch* debe tener en cuenta los segmentos verticales de las ILAs, que prolongan la longitud de la apertura.

La zona de alimentación de la ranura *Notch* afecta en la parte imaginaria de la impedancia de la antena. Debido a su estructura, al alimentar la ranura *Notch*, entre el cortocircuito y la zona de alimentación se “genera” un comportamiento inductivo, provocando que la parte imaginaria de la antena aumente su valor.

Tras encontrar el punto óptimo de alimentación de la apertura *Notch*, se añade en la capa inferior la línea de alimentación.

Las coordenadas sirven de referencia para saber por dónde debe ir la línea *microstrip* que alimentará la antena. Se han utilizado estos puntos como la parte central de la línea. La línea de transmisión también debe tener una impedancia característica de 50Ω . Existe una herramienta en CST que permite calcular la impedancia de una línea dados sus parámetros físicos.

En la figura 3.11 se muestra la herramienta para calcular la impedancia de distintos tipos de líneas de transmisión. Con cálculos teóricos se obtiene un valor aproximado al grosor de la línea y después se ajusta el valor con esta herramienta. Para un valor de 2.94 mm de grosor de la línea se obtiene una impedancia de línea de 50.01Ω .

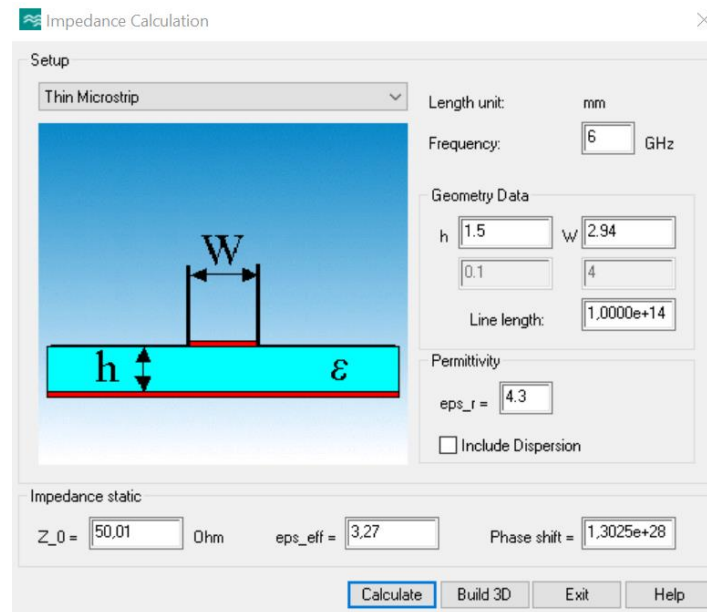


Figura 3.11. Herramienta Impedance Calculator

Para mantener la simetría del diseño, y evitar que haya acoplo entre una de las ILAs y la línea *microstrip*, se decidió hacer la alimentación en forma de “L”. La línea no se puede alimentar con un puerto discreto, se debe alimentar con *Waveguide Port*. Este tipo de puerto simula una guía de onda infinitamente larga conectada a la estructura que se va a alimentar. Aunque la línea *microstrip* sea una de las líneas de alimentación más comunes, hay que tener en cuenta algunas consideraciones a la hora de definir el puerto. El tamaño del puerto es muy importante. Debe ser lo suficientemente grande como para propagar el modo quasi-TEM, pero no debe ser innecesariamente grande, ya que puede hacer que se propaguen modos de orden superior. El tamaño del puerto viene determinado por el grosor del sustrato y un propio parámetro del software, k . Este valor se calcula con una herramienta del CST, *calculate port extensión coefficient*.

En la figura 3.12 se muestra como esta herramienta permite variar entre *microstrip* y *stripline*. También permite introducir los valores manualmente o seleccionando la línea de alimentación.

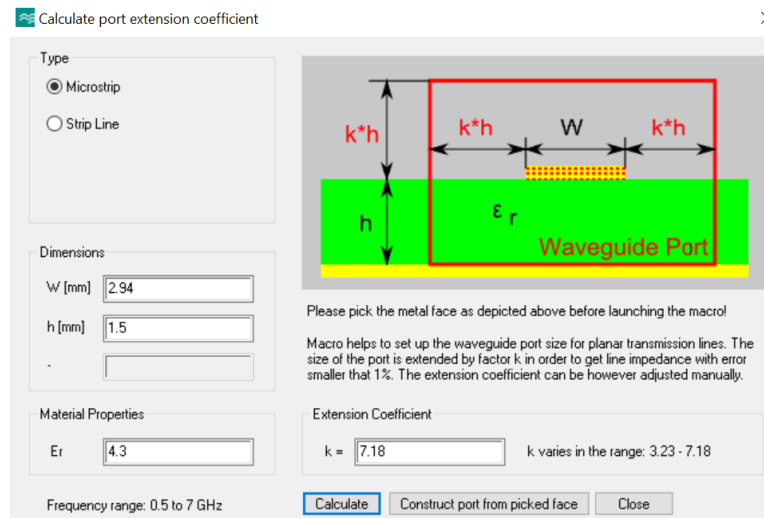


Figura 3.12. Herramienta calculate port extension coefficient.

En la figura 3.13 aparece la configuración del puerto de guía de onda.

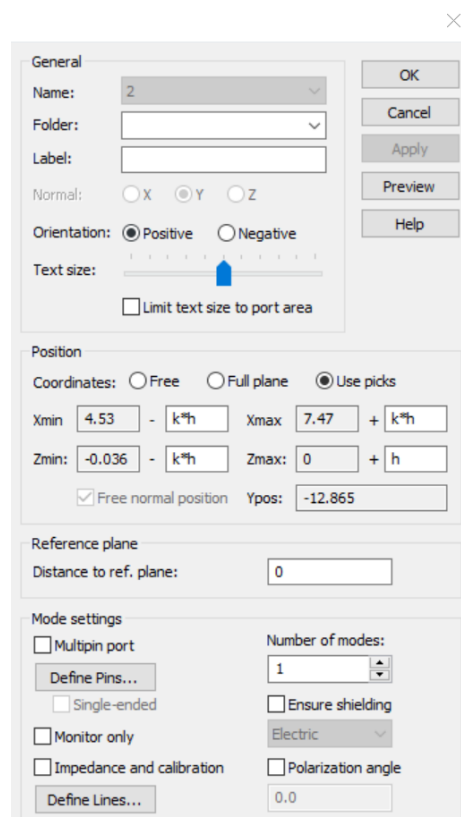


Figura 3.13. Alimentación Waveguide Port

En la figura 3.14 se muestra el campo eléctrico que alimenta la línea de transmisión para corroborar que únicamente se propaga el modo quasi-TEM.

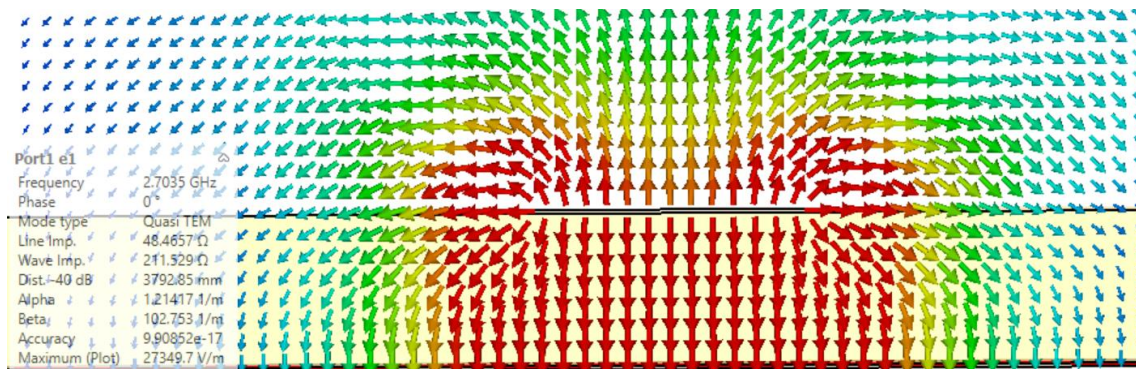


Figura 3.14. Campo eléctrico en la línea de alimentación.

Al incluir la línea microstrip, aparecen nuevos parámetros importantes en el diseño. Hay que la longitud del segmento que alimenta la antena, L_{ha} , y la posición del segmento vertical de la L , Pa .

En las figuras 3.15 y 3.16 se muestran distintas simulaciones variando estos parámetros.

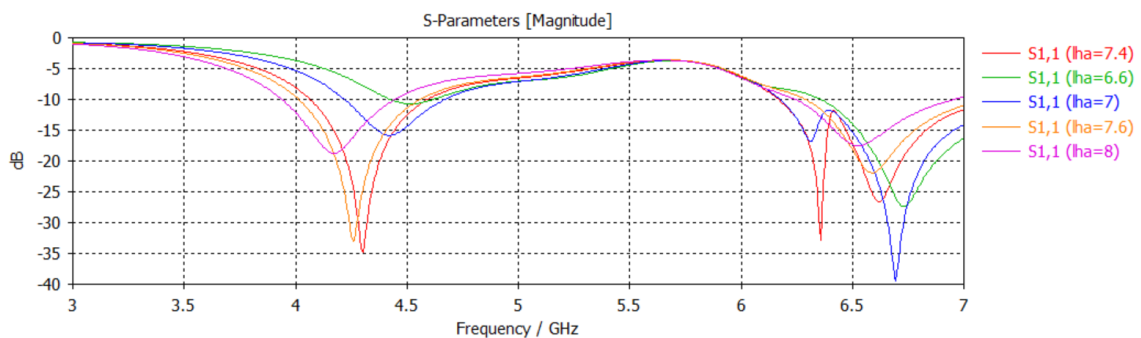


Figura 3.15. S_{11} de la antena variando L_{ha}

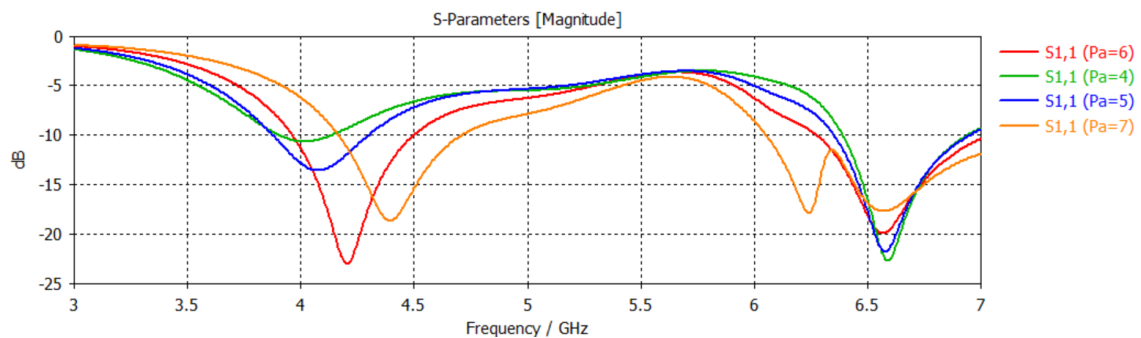


Figura 3.16. S_{11} de la antena variando Pa

Al añadir la línea de alimentación, los valores optimizados para el puerto discreto no trabajan de la misma manera que con la línea de alimentación, fue necesario volver a optimizar los valores de las primeras ILAs. En las siguientes figuras, de la 3.17 hasta la 3.24 se muestran el parámetro S_{11} de la antena presentada al inicio del capítulo con los valores indicados en la tabla, la matriz Z_{11} para observar la impedancia de la antena y analizar las resonancias, las eficiencias de radiación y total, las corrientes de la antena en las resonancias y los diagramas de radiación en la banda de trabajo de la antena.

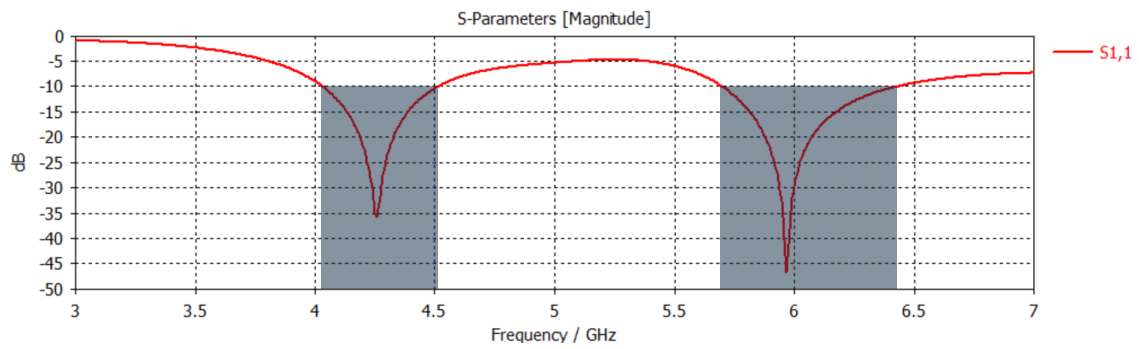


Figura 3.17. S_{11} del primer prototipo

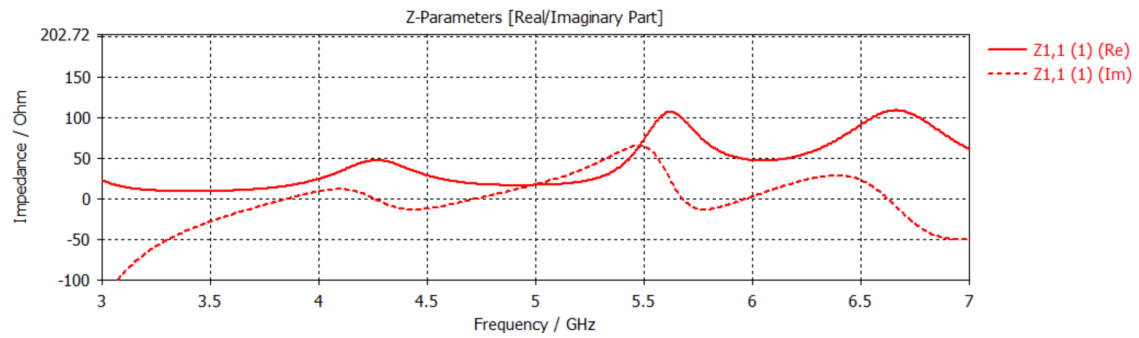


Figura 3.18. Z_{11} del primer prototipo

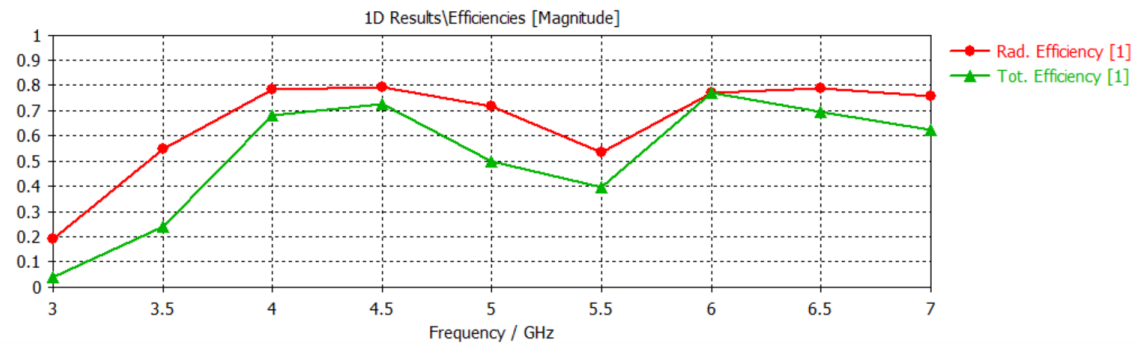


Figura 3.19. Eficiencia de radiación y total

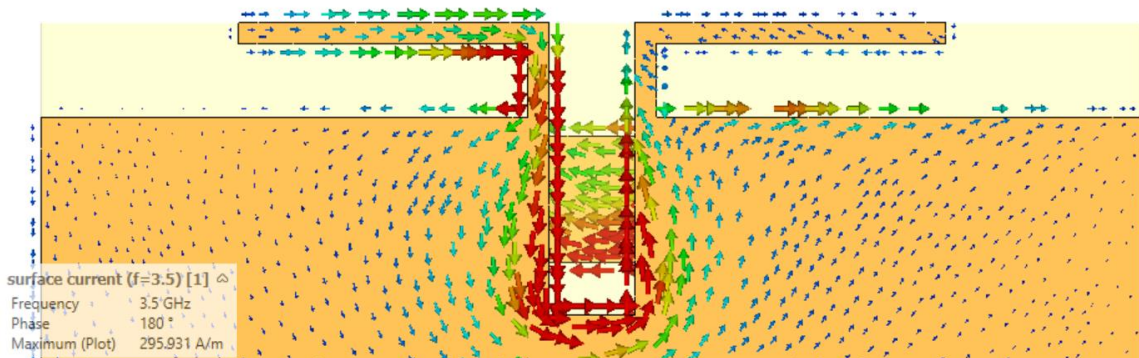


Figura 3.20. Corrientes de la antena para una frecuencia de 3.5 GHz

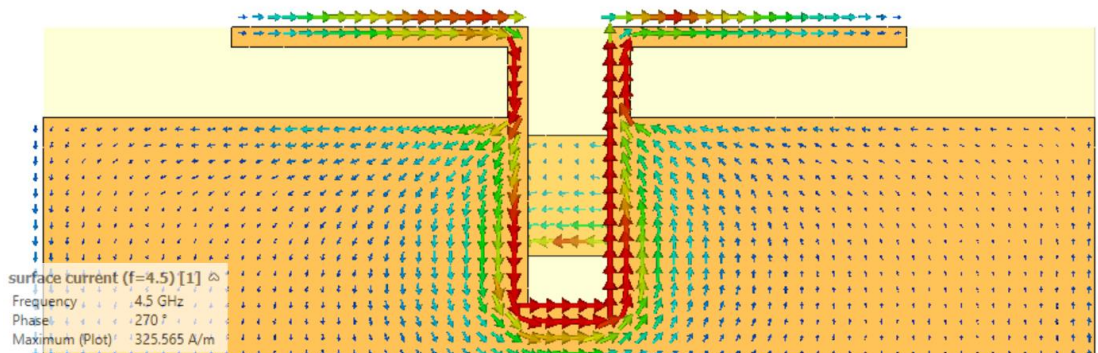


Figura 3.21. Corrientes de la antena para una frecuencia de 4.5 GHz

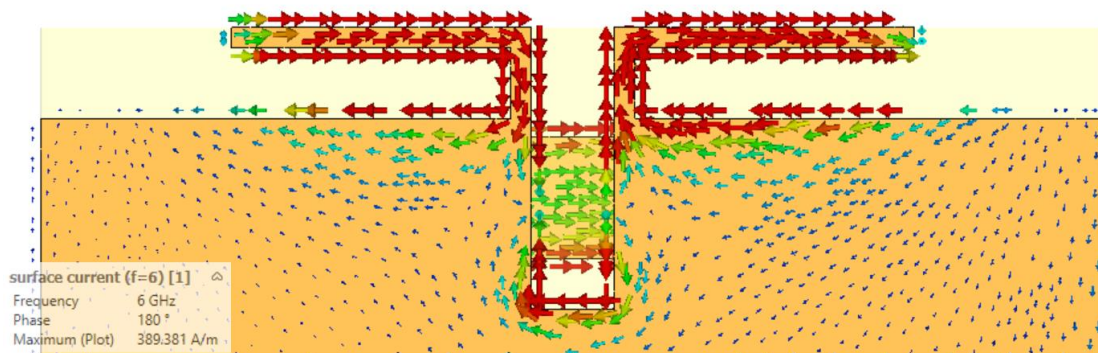


Figura 3.22. Corrientes de la antena para una frecuencia de 6 GHz

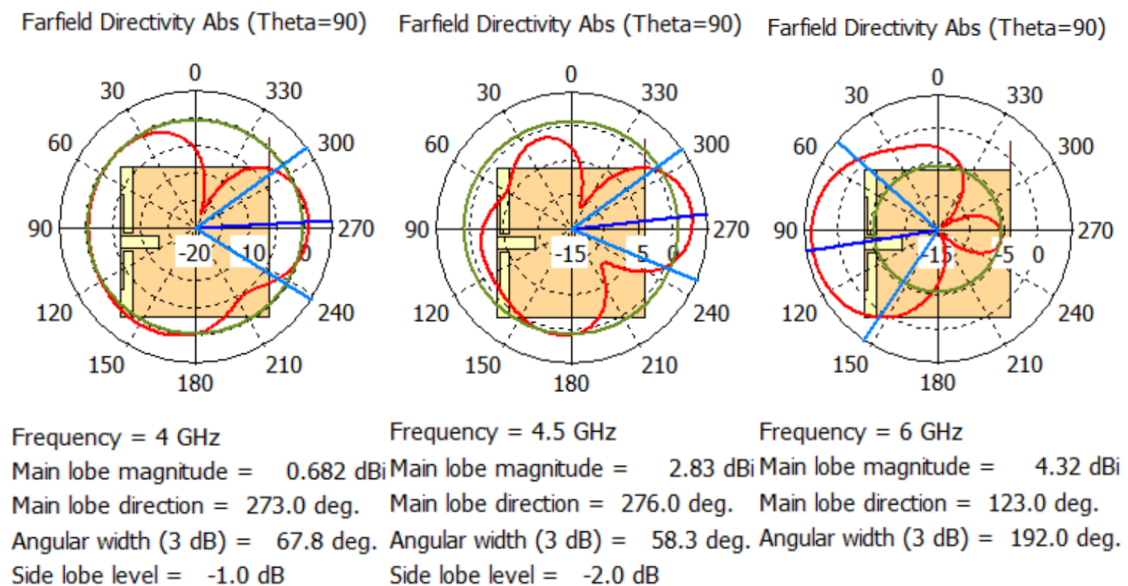


Figura 3.23. Diagramas de radiación de la antena para Theta = 90°

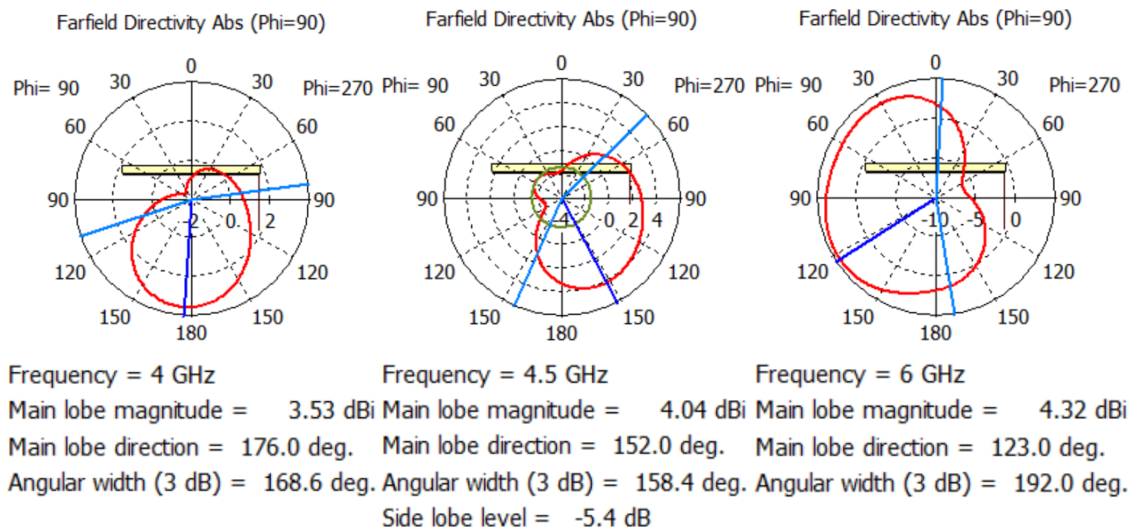


Figura 3.24. Diagramas de radiación de la antena para $\Phi = 90^\circ$

Se consigue una buena respuesta en frecuencia, pero la máxima radiación del diagrama no apunta donde debería.

3.2 Segundo modelo (2 ILAS y Notch)

Con el propósito de aumentar el ancho de banda de la antena, se añadieron otras dos ILAs pasivas en los extremos de las primeras. La desviación en altura del diagrama de radiación se espera corregir modificando la alimentación de la antena.

Esos segundos “brazos” se alimentan mediante acoplo electromagnético.

En la figura 3.25 y 3.26 se muestra el prototipo y la tabla 3.2 incluye todos los parámetros del diseño⁴

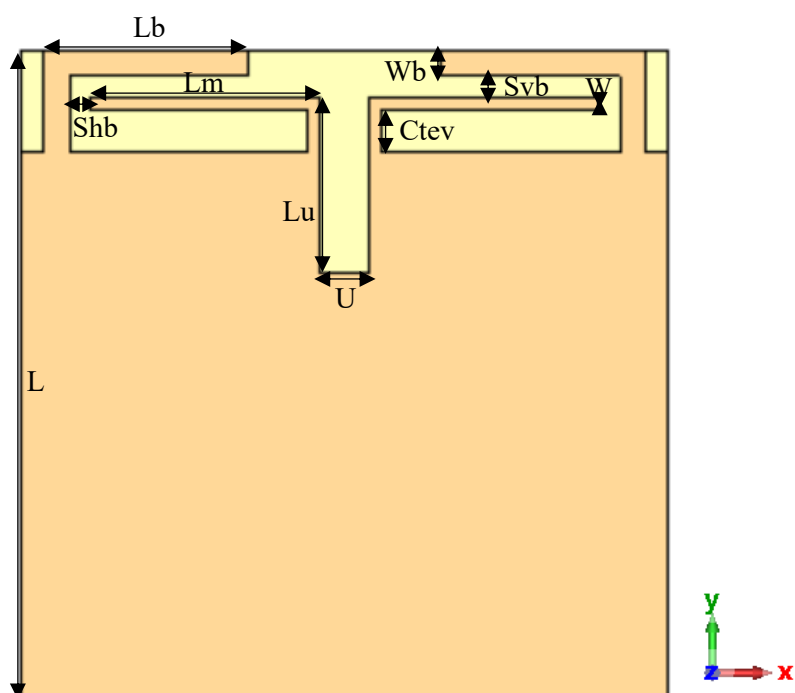


Figura 3.25. Segundo prototipo por la cara superior

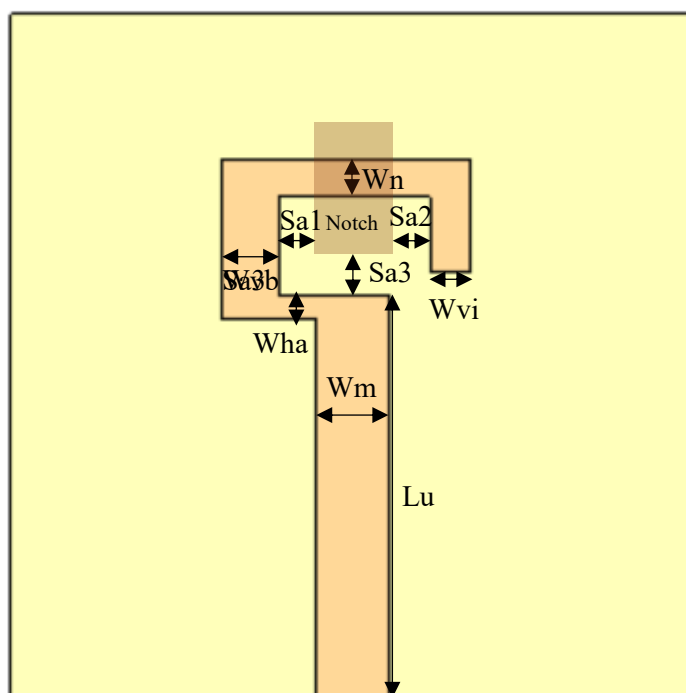


Figura 3.26. Segundo prototipo por la cara inferior

Parámetro	Valor (mm)	Significado
L	25.73	Longitud total de la antena
Lu	2.8	Longitud de la apertura Notch



Lm	9.15	Longitud horizontal del monopolo
U	2	Anchura de la apertura Notch
W	0.5	Anchura de los monopolos
Lb	7.125	Longitud de los brazos secundarios
Wb	1	Grosor de los brazos secundarios
Shb	0.8	Separación horizontal entre brazos
Svb	0.8	Separación vertical entre brazos
Wm	2.8	Grosor de la línea de alimentación
Sa1	1.8	Separación entre la línea de alimentación y la apertura Notch
Sa2	1.8	Separación entre la línea de alimentación y la apertura Notch
Sa3	1.9	Separación entre la línea de alimentación y la apertura Notch
Wn	1.4	Grosor del segmento que alimenta la ranura Notch
Wha	0.8	Grosor del segmento horizontal de la línea de alimentación
Wvd	2.1	Grosor del segmento vertical derecho de la línea de alimentación
Wvi	1.5	Grosor del segmento vertical izquierdo de la línea de alimentación

Tabla 3.2. Parámetros de diseño del segundo prototipo

Para calcular la longitud de estos elementos pasivos se siguió la fórmula comentada en el apartado anterior. La frecuencia de trabajo deseada de las segundas ILAs es de 3 GHz. Sustituyendo en la

fórmula se obtiene una longitud de onda de 48,19 mm, haciendo que la longitud física de estos elementos sea de 12,05 mm.

Además de las longitudes de las ILAS, hay que considerar la separación, tanto vertical, S_{va} , como horizontal, S_{ha} , entre los dos elementos radiantes.

Durante el diseño del segundo prototipo surgió un problema con la alimentación de la línea. Explorando la bibliografía disponible sobre el diseño de antenas en CST, se encontró que, el valor k que determina el tamaño del puerto, es un valor “aleatorio”. Cierta número de ingenieros utilizan el valor calculado por el programa, y otro grupo utiliza siempre el mismo valor de k , que varía entre 3 y 4. También se consultó los diseños del software Antenna Magus, y para estos diseños el valor de k varía de forma discreta entre 7 y 12.

Para asegurar que las simulaciones se asemejen lo máximo posible al comportamiento real del dispositivo, es necesario considerar como se va a alimentar la antena en la realidad. Para alimentar antenas impresas, el conector más común es un SMA macho de 50 o 75 Ω . En este diseño se utiliza un SMA de 50 Ω . En una página web de venta de componentes electrónicos, (<https://www.mouser.es/>), se encuentran varios modelos SMA con sus respectivos archivos 3D. Se cogió un modelo al azar, compatible con el tamaño físico de la antena. El modelo se divide en 3 sub-modelos. La parte exterior, el dieléctrico, y el pin conector. Tanto el exterior como el pin son del mismo material, latón, mientras que el dieléctrico es de teflón.

Para alimentar este conector no hay ninguna duda, la onda plana debe estar contenida entre la parte metálica del conector. Con esta modificación se garantiza que los resultados simulados serán lo más realista posible, ya que también considera la conexión entre el pin del conector y la línea de alimentación.

En la figura 3.27 se muestra el modelo del conector SMA

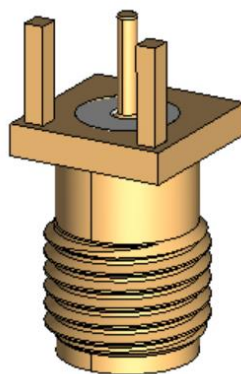


Figura 3.27. Modelo 3D del conector SMA

En la figura 3.28 se muestra el campo eléctrico en el conector SMA.

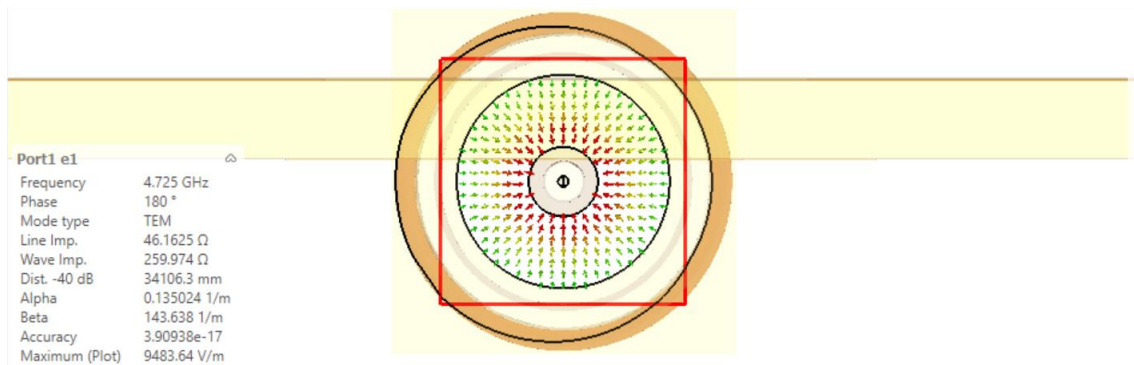


Figura 3.28. Campo eléctrico en el conector SMA

En la figura 3.29 se muestra el factor de reflexión del primer prototipo alimentado a través de un conector SMA. Se observa como el comportamiento de la antena es similar a los resultados mostrados en el primer prototipo. Con el conector SMA la antena tiene un ancho de banda superior.

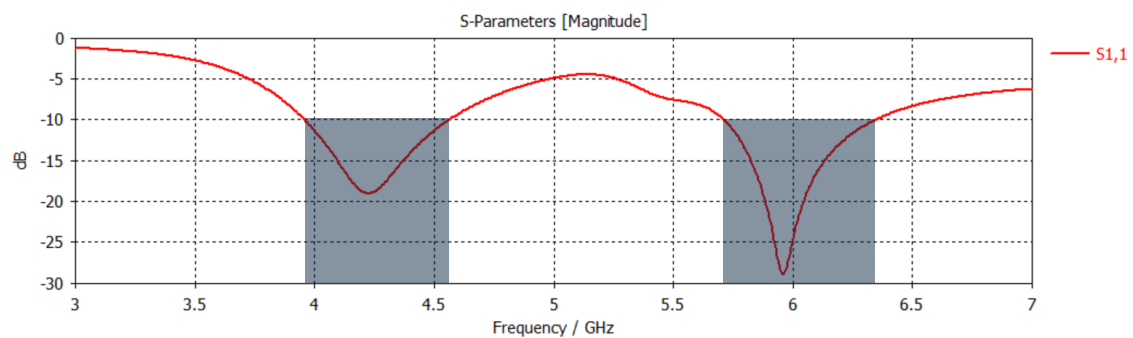


Figura 3.29. S_{11} del primer prototipo con el conector SMA

En la banda de 4 GHz, el ancho de banda es de 550 MHz y en la banda de 6 GHz, el ancho es de 600 MHz

En las figuras 3.30, 3.31, 3.32 y 3.33 se muestran las distintas simulaciones variando los parámetros que más afectan al comportamiento de las ILAs secundarias

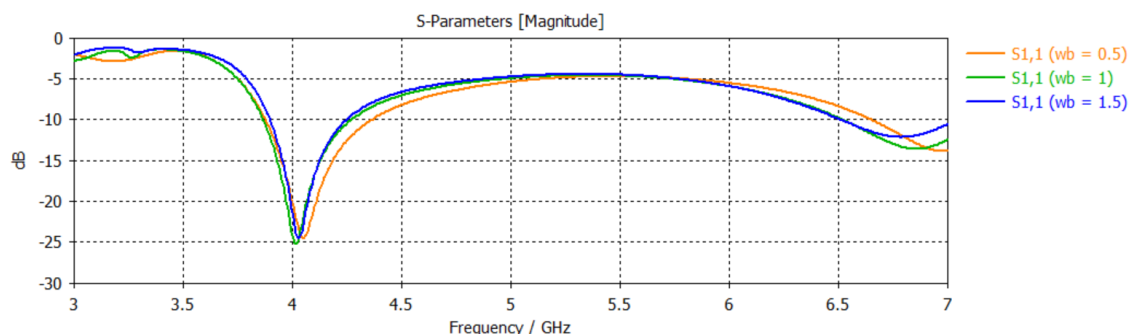


Figura 3.30. S_{11} variando el grosor de los brazos

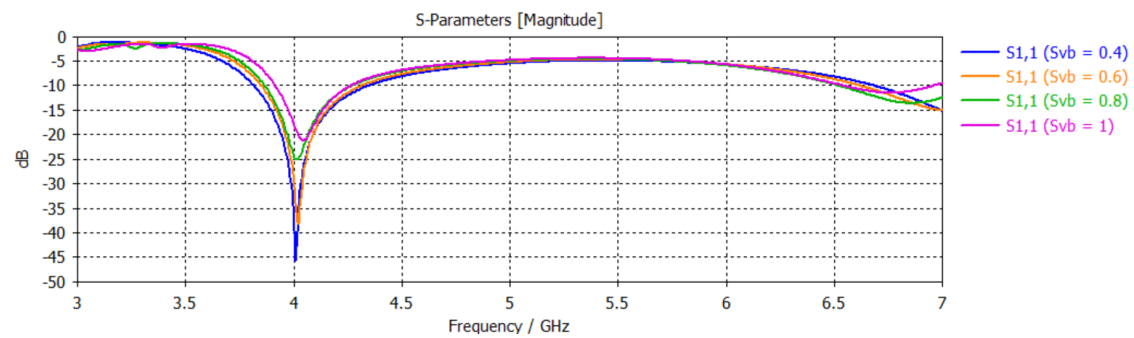


Figura 3.31. S_{11} variando la separación vertical

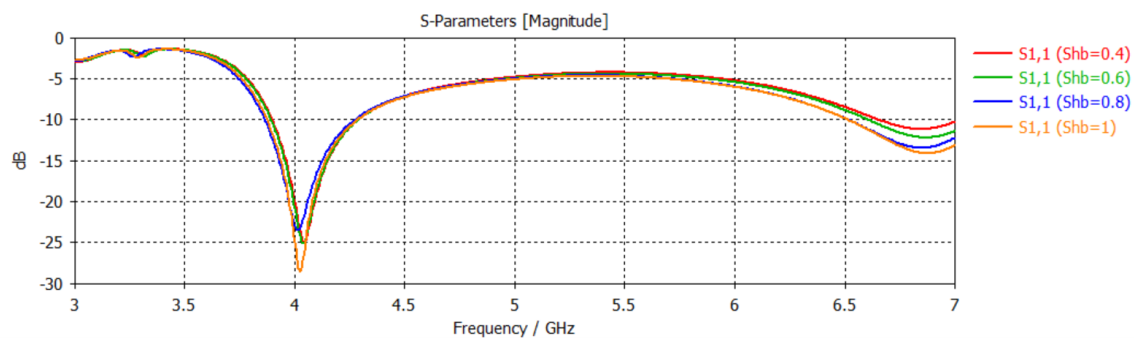


Figura 3.32. S_{11} variando la separación horizontal

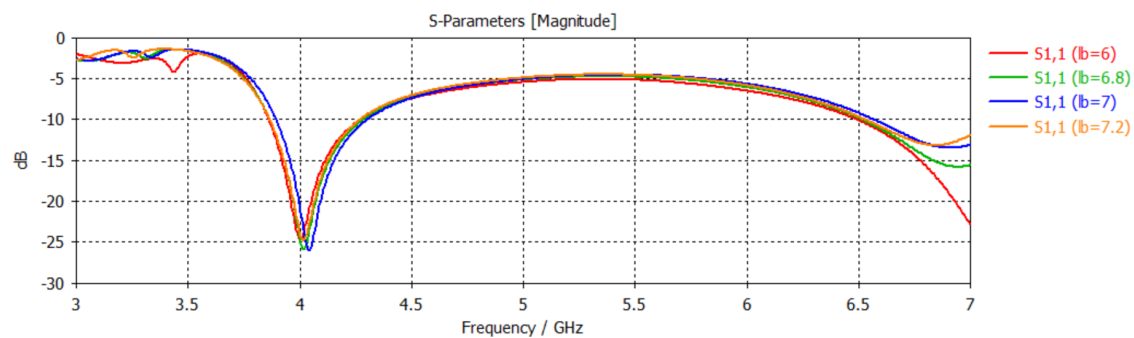


Figura 3.33. S_{11} variando la longitud de los brazos para $w = 1$ y $svb/shb = 0.8$

Como se observa en las figuras, el parámetro S_{11} ha variado bastante en comparación a los resultados obtenidos en el prototipo anterior. Es necesario volver a optimizar los valores de los primeros elementos para mejorar el comportamiento de la antena.

Otro problema que surge durante el diseño es la máxima dirección de radiación de la antena, que no está cercana a los 90° . Para corregir este problema, se consideró modificar la línea de alimentación, dándole una forma de interrogación para mantener la simetría de alimentación en la antena.

Esta modificación incluye varios parámetros determinantes en el diseño. Desde la figura 3.34 hasta la figura 3.37 se muestran las simulaciones variando los parámetros más importantes de la línea de alimentación

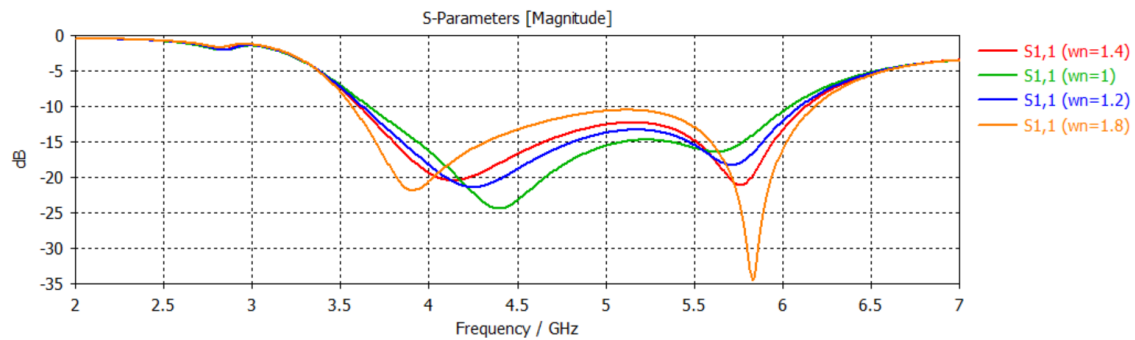


Figura 3.34. S_{11} variando w_n

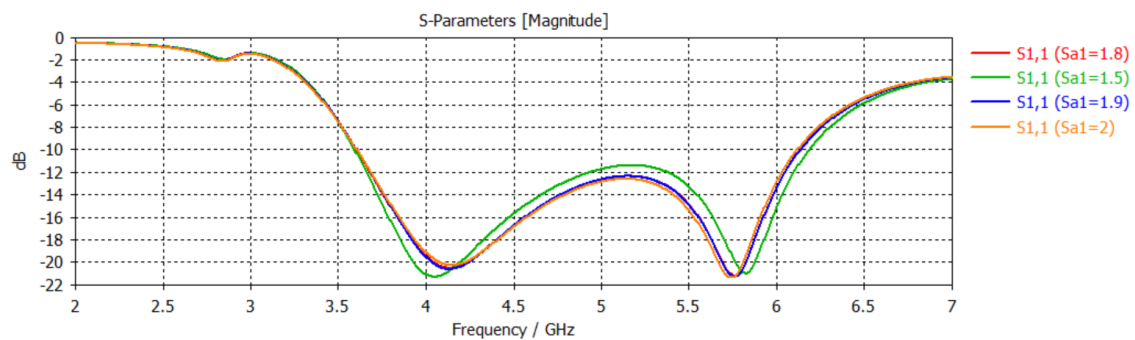


Figura 3.35. S_{11} variando separaciones

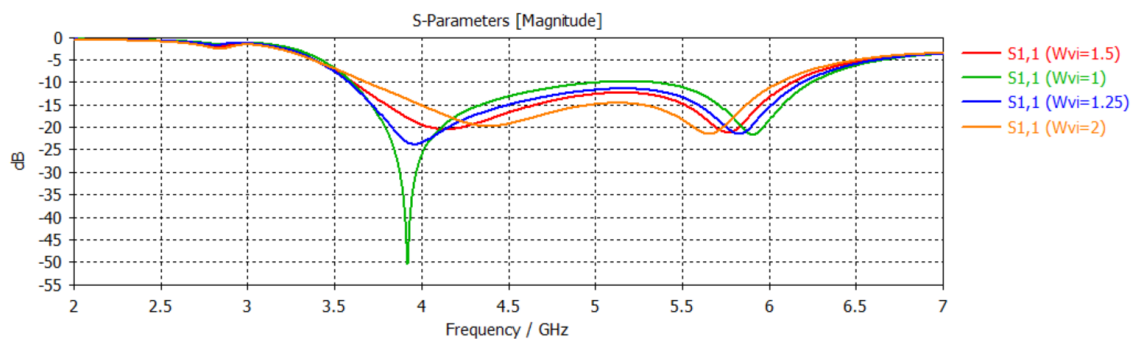


Figura 3.36 S_{11} variando W_{vd}

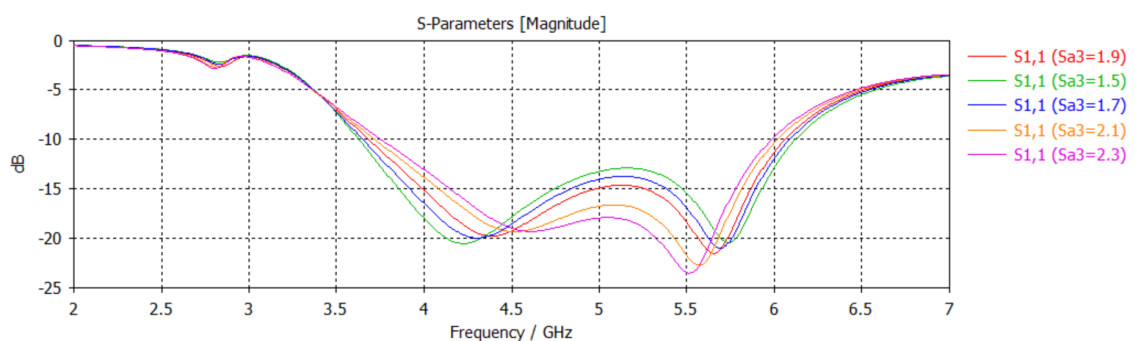


Figura 3.37. S_{11} variando separación

En la figura 3.38 se muestran los parámetros S_{11} del modelo presentado al principio del capítulo. Se observa como el ancho de banda de trabajo es de 2.5 GHz aproximadamente. Sin embargo, esta banda no coje los distintos canales destinados a las comunicaciones 5G.

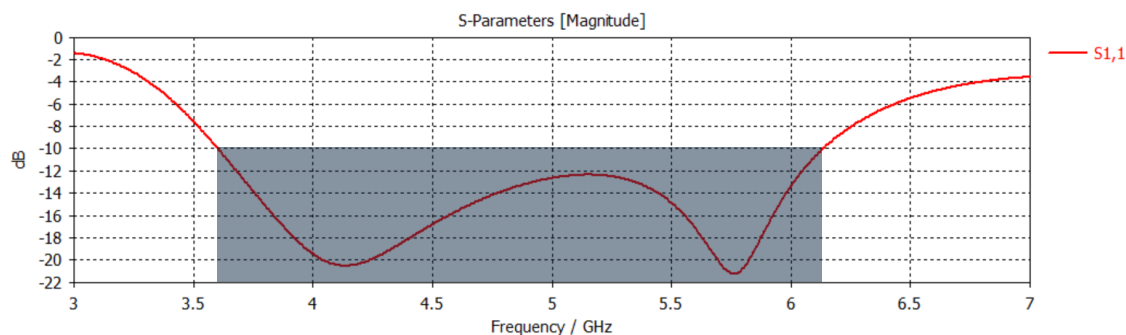


Figura 3.38. S_{11} del segundo prototipo

Tras incluir los elementos pasivos, la banda de trabajo de la antena no era la deseada.

Con el objetivo de entender a la perfección la estructura radiante, se estudiaron cómo los parámetros afectan al comportamiento de la antena. Para cumplir este propósito, se analizó 1 por 1 todos los valores de la antena.

En la tabla 3.3 se resume este análisis. La tabla está formada por los grupos de parámetros que afectan de forma similar al comportamiento y de qué manera lo hacen.

Parámetros	Frecuencia más afectada	Cómo afecta al parámetro S_{11}
L, Lu, Lb1	5.43 GHz	Modifica el valor inductivo total de la antena
Wu, Sbh, Lac, Wah, Wad, Lad, Wai, Lai	6.51 GHz	Modifica la parte de 6 GHz
Prt, Wae, Wan, Lan, Lah, Wai, Lai	4.02 GHz	Modifica la parte de 4 GHz
Lb2, Wb2, Sbv	3.07, 4.02, 5.43, 6.51 GHz	Modifica todo el espectro
Wb1	3.07, 4.02, 5.43 GHz	Modifica todo el espectro menos la parte de 6 GHz
Sbp	3.07, 5.43, 6.51 GHz	Modifica todo el espectro menos la parte de 4 GHz

Tabla 3.3. Análisis paramétrico de la estructura radiante

Se decidió aprovechar una de las grandes ventajas de las antenas impresas, la escalabilidad. Se escaló la antena para conseguir desplazar la banda de trabajo hasta la deseada. Sin embargo, solo se podrían escalar las dimensiones X e Y, ya los materiales utilizados tienen unos grosores fijos determinados. Fue necesario realizar varias simulaciones distintas hasta llegar a la banda deseada, siendo el factor de escalabilidad de 1.2157.

Tras el escalado, la tabla 3.2 se modifica dando lugar a la tabla 3.4

Parámetro	Valor (mm)	Significado
L	31.28	Longitud total de la antena
Lu	8.51	Longitud de la apertura Notch
Lm	11.12	Longitud horizontal del monopolo
U	2.43	Anchura de la apertura Notch
W	0.6	Anchura de los monopolos
Lb	8.66	Longitud de los brazos secundarios
Wb	1.21	Grosor de los brazos secundarios
Shb	0.97	Separación horizontal entre brazos
Svb	0.97	Separación vertical entre brazos
Sa1	2.19	Separación entre la línea de alimentación y la apertura Notch
Sa2	2.19	Separación entre la línea de alimentación y la apertura Notch
Sa3	2.31	Separación entre la línea de alimentación y la apertura Notch
Wn	1.7	Grosor del segmento que alimenta la ranura Notch
Wha	1.1	Grosor del segmento horizontal de la línea de alimentación
Wvd	1.82	Grosor del segmento vertical derecho de la línea de alimentación

Wvi	2.55	Grosor del segmento vertical izquierdo de la línea de alimentación
-----	------	--

Tabla 3.4. Parámetros del prototipo escalado por un factor de $\times 1.2157$

En la figura 3.39 se muestran los resultados del prototipo tras el escalado.

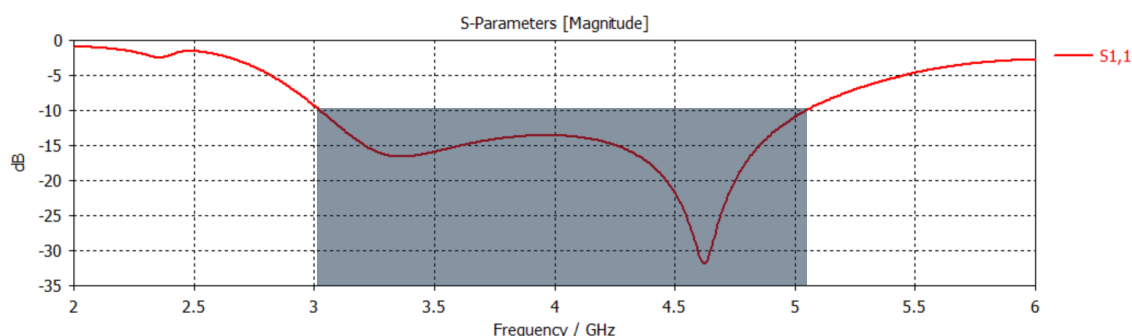


Figura 3.39. S_{11} de la antena tras el escalado

A pesar de tener la banda de trabajo deseada, el diagrama de radiación no es el indicado.

De la figura 3.40 hasta la figura 3.46 se muestran el parámetro Z_{11} , las eficiencias de radiación y total, las corrientes en las frecuencias de resonancia y los diagramas de radiación en la banda de trabajo.

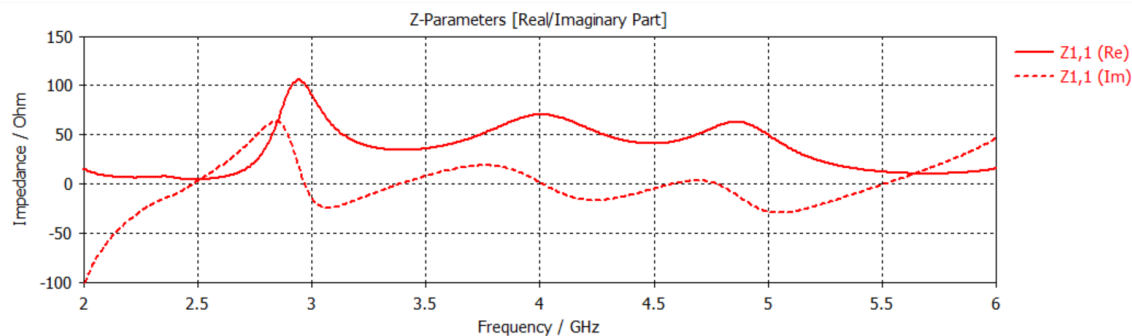


Figura 3.40. Z_{11} de la antena tras el escalado

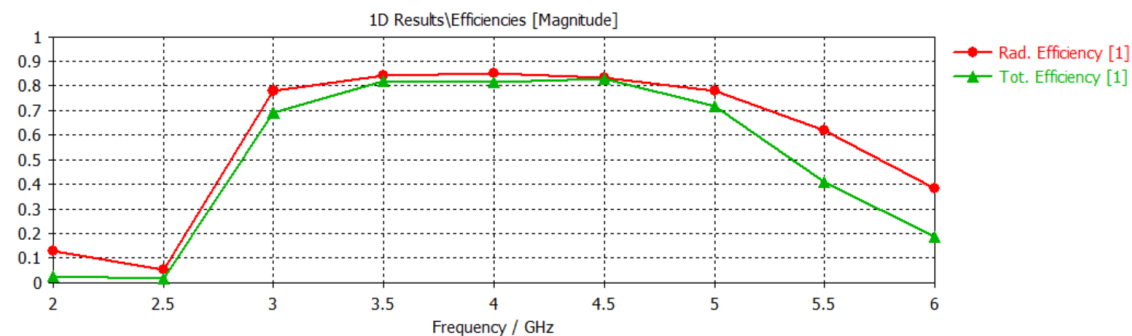


Figura 3.41. Eficiencias de radiación y total

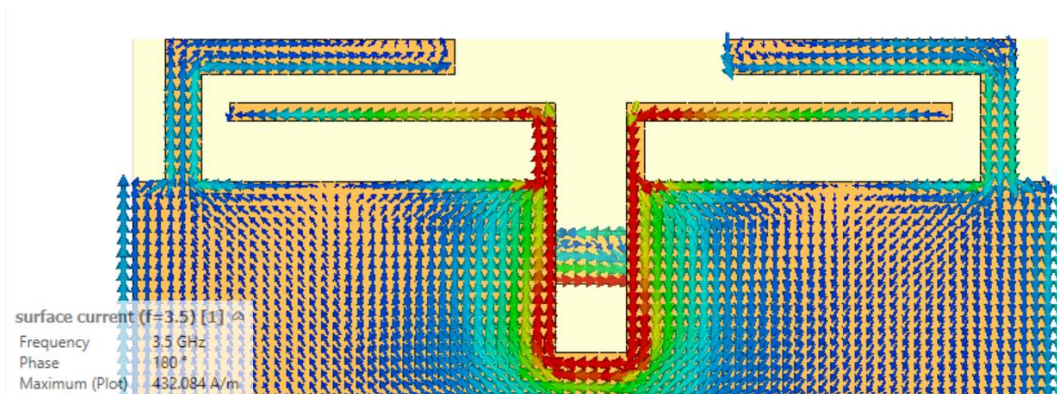


Figura 3.42. Corriente superficial de la antena para una frecuencia de 3,5 GHz

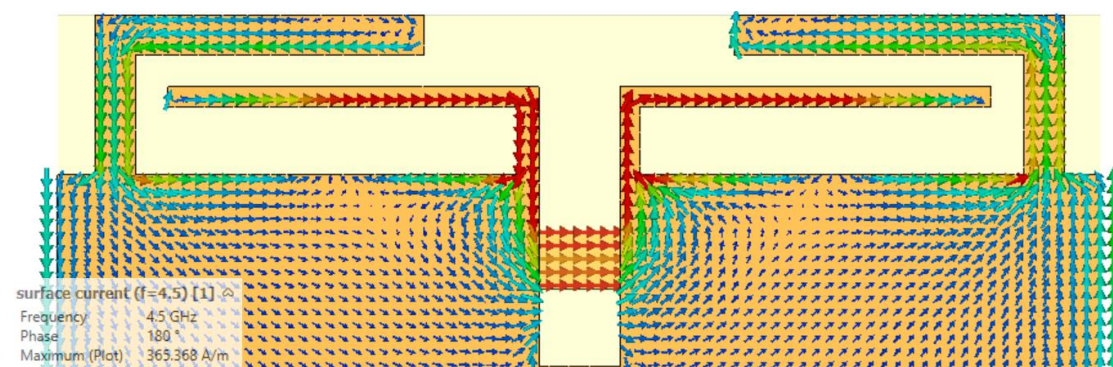


Figura 3.43. Corriente superficial de la antena para una frecuencia de 4,5 GHz

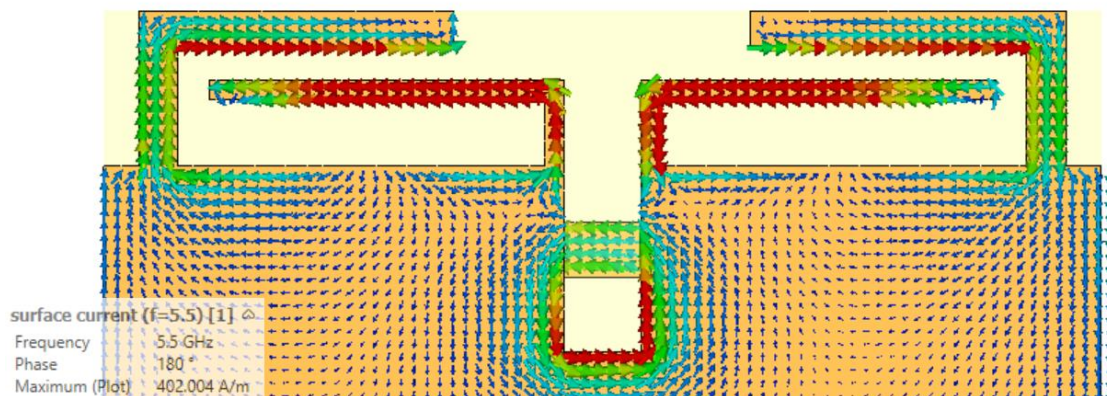


Figura 3.44. Corriente superficial de la antena para una frecuencia de 5,5 GHz

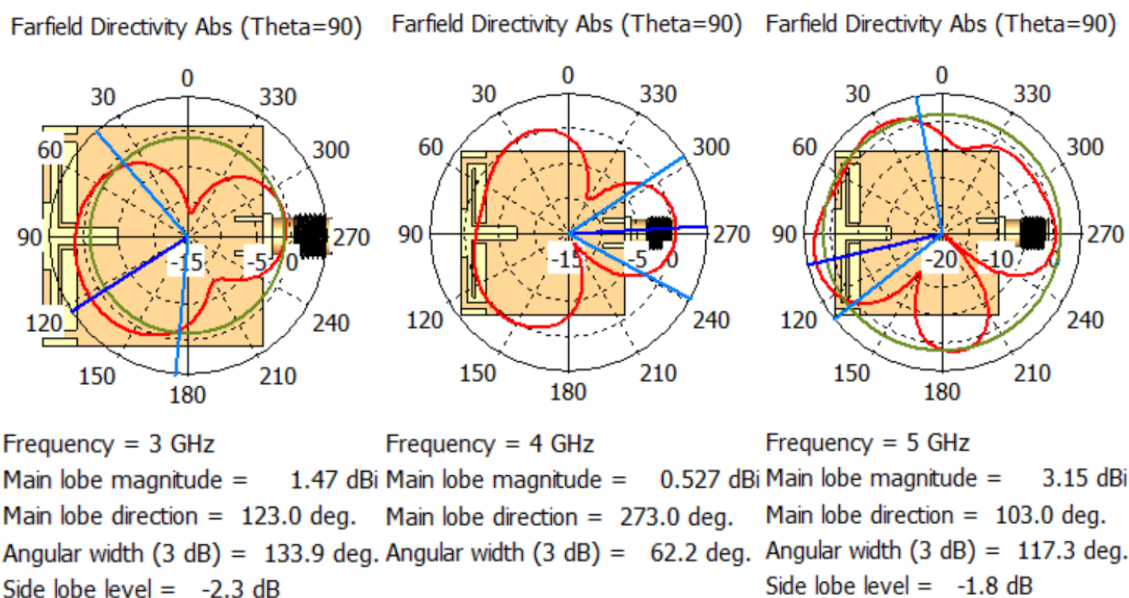


Figura 3.45. Diagramas de radiación de la antena para Theta = 90°

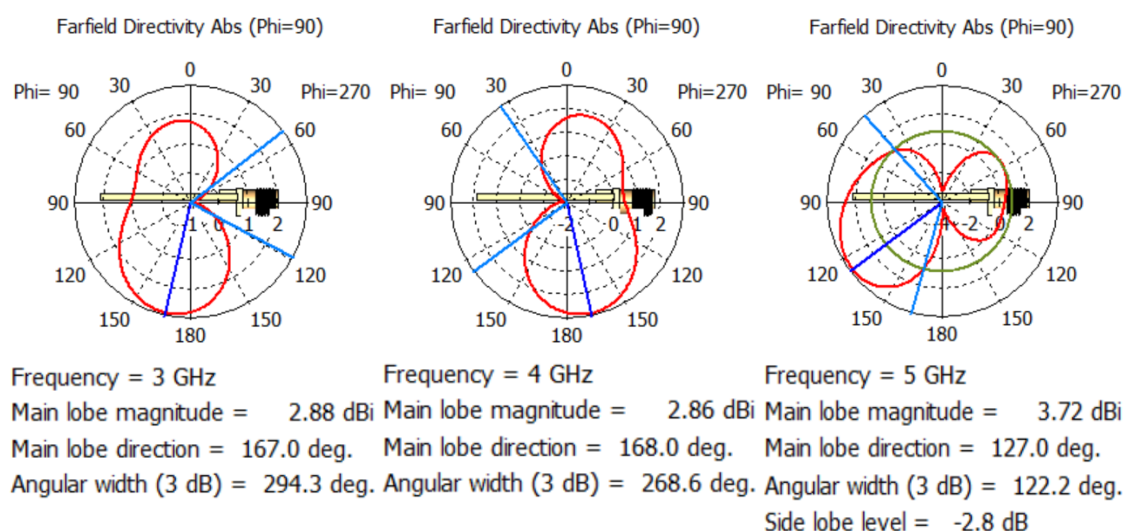


Figura 3.46. Diagramas de radiación de la antena para Phi = 90°

A pesar de conseguir una banda de trabajo bastante buena, el diagrama de radiación de la antena no es el deseado. Por este motivo se decidió replantear el diseño y sustituir la apertura Notch por una apertura Vivaldi.

3.3 Tercer modelo (ILAs y Vivaldi)

La sustitución de la apertura *Notch* por la apertura Vivaldi promete corregir el problema del diagrama de radiación del prototipo anterior. La antena Vivaldi destaca por su alta directividad y por su banda ultra ancha de trabajo.

En las figuras 3.37 y 3.38 se muestran ambas caras del prototipo y en la tabla 3.5 se incluyen todos los parámetros del diseño.

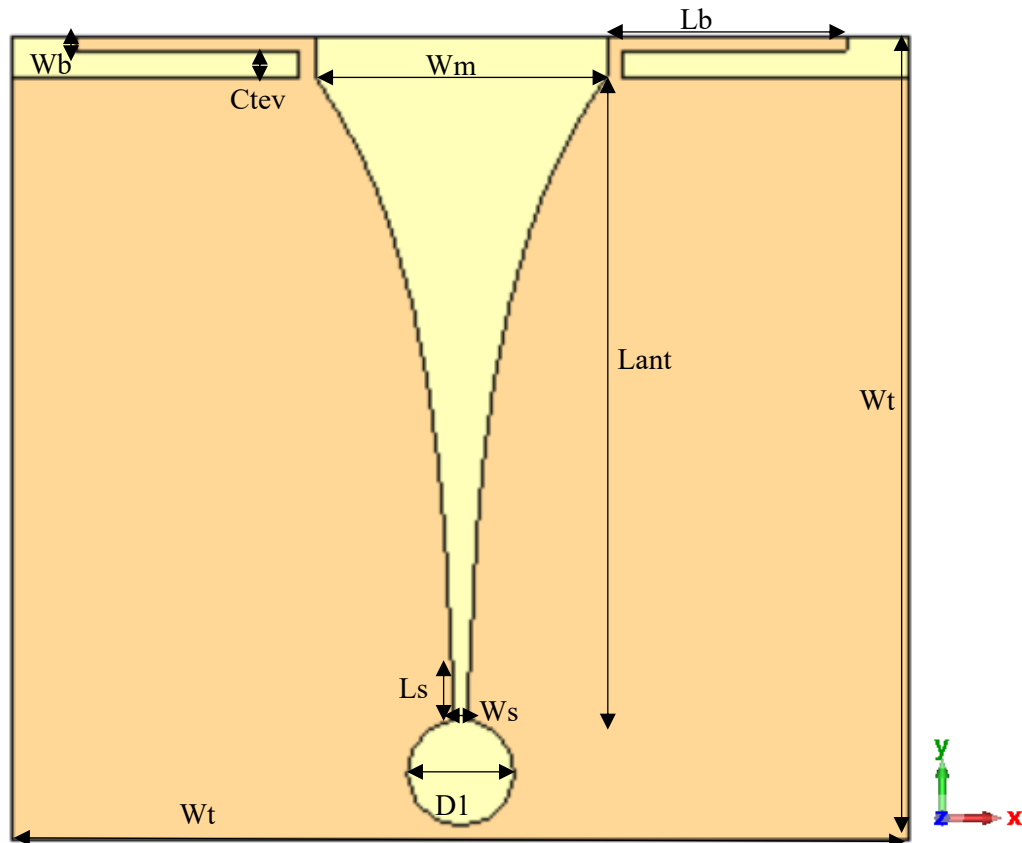


Figura 3.47. Tercer prototipo por la cara superior

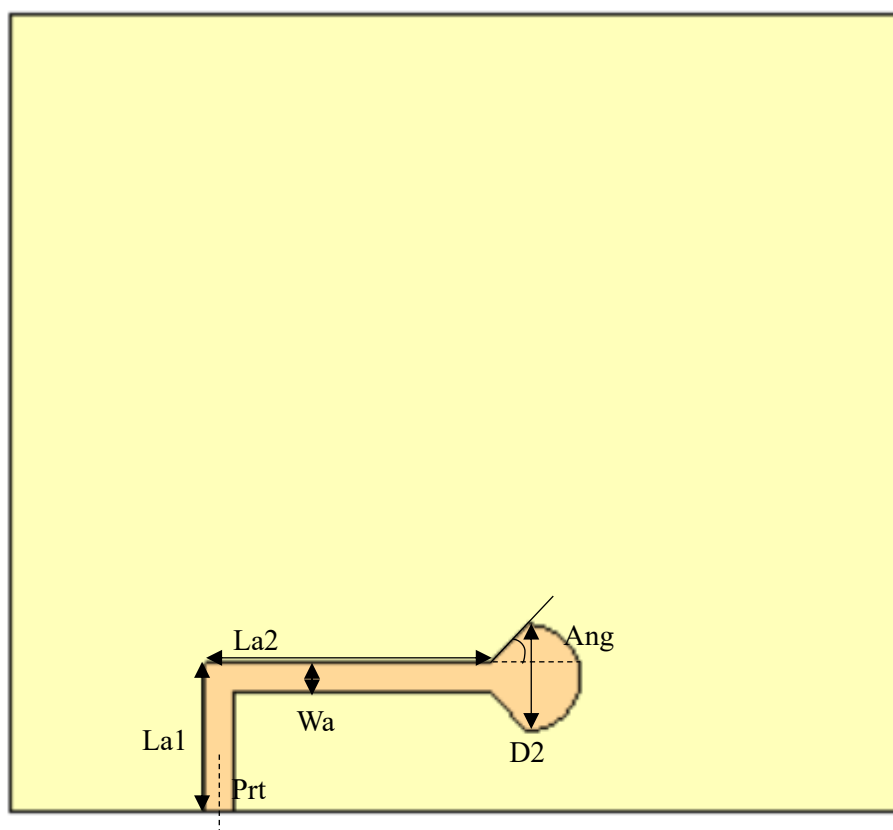


Figura 3.48. Prototipo por la cara inferior

Parámetros	Valor (mm)	Significado
Lt	53.45	Longitud física total
Wt	60	Anchura física total
Lant	41.025	Longitud de la apertura
Want	30.77	Anchura de la apertura
Lb1	6	Longitud de los brazos radiantes
Wb1	0.75	Anchura de los brazos radiantes
Sbp	1.7	Separación entre brazos y plano
Ls	1.9	Longitud del slot de alimentación

Ws	0.5	Anchura del slot de alimentación
D1	7.14	Diámetro de
Prt	16	Posición de la línea de alimentación
La1	9.98	Longitud del segmento vertical de la alimentación
Wa	1.9	Anchura de la línea de alimentación
La2	19.11	Longitud del segmento horizontal de la alimentación
R1	7.175/2	Radio de
Ang	46.22	Ángulo de con respecto a la alimentación

Tabla 3.5. Parámetros de diseño del tercer prototipo

Este cambio replantea el diseño por completo. Una de las grandes desventajas de las aperturas Vivaldi es su enorme tamaño comparado con otras antenas impresas que trabajen a la misma frecuencia. Incluir la apertura Vivaldi en el diseño anterior es una tarea imposible, es necesario comenzar el diseño de nuevo, comenzando por el diseño de la Vivaldi para la banda C.

Las fórmulas necesarias para el cálculo teórico de la antena se encuentran a continuación.

Referenciando a [42], las fórmulas teóricas para el diseño de la Vivaldi son:

$$L_{ant} > \lambda_g \quad (3.2)$$

Siendo λ_g la longitud de onda de la frecuencia central de la antena, en este caso, a 4 GHz

$$W_{max1} < W_{ant} < W_{max2} \quad (3.3)$$

$$W_{max1} \approx \lambda_g \quad (f_c = 4 \text{ GHz}) \quad (3.4)$$

$$W_{max2} \approx \frac{\lambda_{min}}{2} \quad (f_I = 2 \text{ GHz}) \quad (3.5)$$

En la fórmula se calcula el valor de la longitud de la apertura Vivaldi, que corresponde con la frecuencia central de la banda de trabajo

En la fórmula se establece un rango para el grosor de la apertura Vivaldi, donde el margen superior depende de la frecuencia inicial de la banda de trabajo, y donde el límite inferior depende de la frecuencia central.

Debido a la banda de trabajo, se obtienen los mismos valores para el grosor y la longitud de la Vivaldi.

Las longitudes sobrantes, D1 y D2, para un funcionamiento óptimo, deben ser de un valor aproximado a un cuarto de W_{ant}

Para alimentar la antena se utilizó el modelo del conector SMA.

En la figura 3.49 se observa la banda de trabajo de la antena Vivaldi. Como era de esperar, esta antena es capaz de trabajar en toda la banda media de comunicaciones 5G.

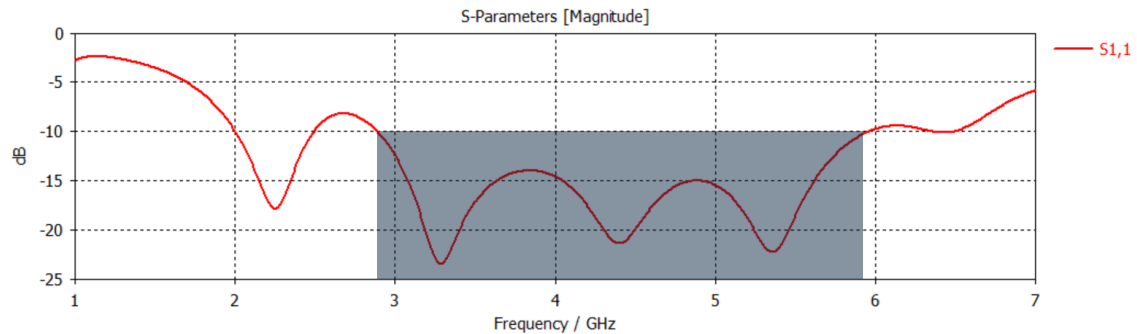


Figura 3.49. Parámetros S_{11} de la antena Vivaldi

Optimización de los parámetros de la antena Vivaldi.

Para poder implementar el diseño en un elemento conmutado, se ha sustituido la alimentación lateral por una alimentación en forma de “L”. En las figuras 3.50 y 3.51 se muestran las simulaciones variando dos parámetros de la línea de transmisión.

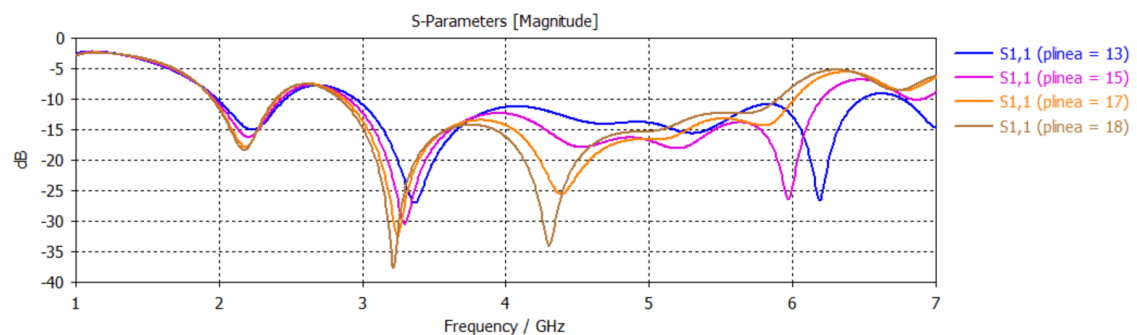


Figura 3.50. S_{11} variando la posición de alimentación.

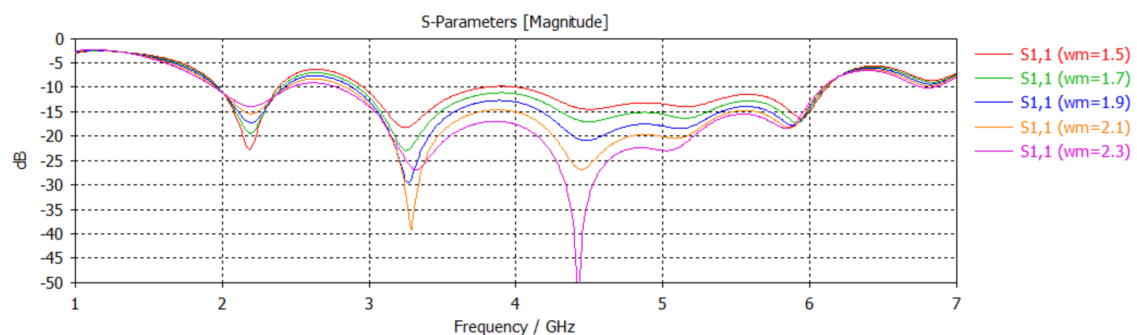


Figura 3.51. S_{11} Variando la anchura de la línea de alimentación y longitud del slot de alimentación

Con el objetivo de conseguir un ancho de banda más plano, se añaden dos ILAs al extremo de la apertura Vivaldi. Estas ILAs se diseñan para trabajar a una frecuencia de 4 GHz,

Tras varias simulaciones cambiando los parámetros de las ILAs, se obtiene un ancho de banda de 3 GHz.

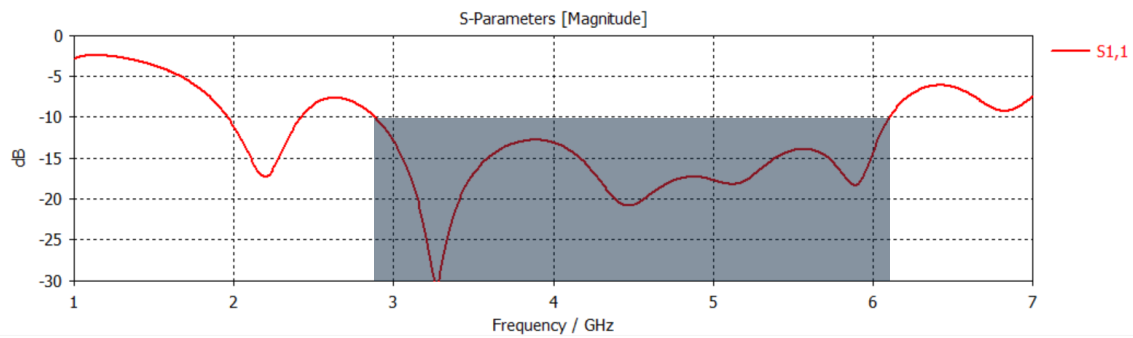


Figura 3.52. S_{11} de la Vivaldi con brazos

Como se han utilizado las estructuras radiantes del primer prototipo, para resumir, no se mostrarán las distintas simulaciones hasta llegar a los valores óptimos.

A pesar de obtener un ancho de banda de más de 3 GHz, la frecuencia inicial de la banda de trabajo es 2.9 GHz. Teniendo en cuenta la tolerancia de fabricación, se decidió escalar la antena para desplazar la banda a frecuencias inferiores asegurando que, tras la fabricación, la banda de trabajo de la antena contendrá los principales canales destinados a la banda media de comunicaciones 5G. De la figura 3.53 a la figura 3.60 se muestran el factor de reflexión, las eficiencias, el valor Z_{11} , las corrientes superficiales de la antena y los diagramas de radiación en la banda de trabajo.

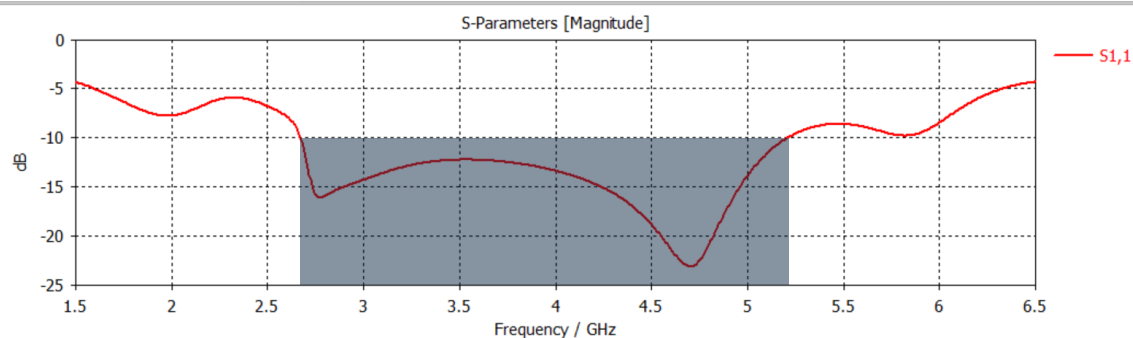


Figura 3.53. S_{11} del tercer prototipo

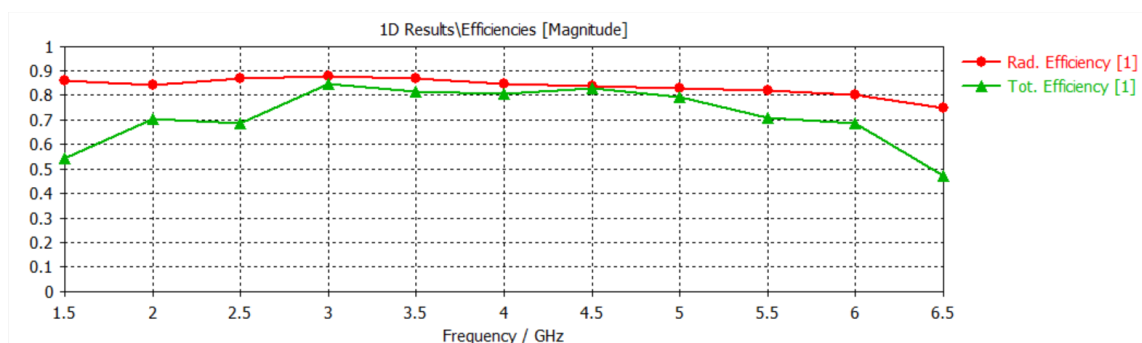


Figura 3.54. Eficiencias de radiación y total

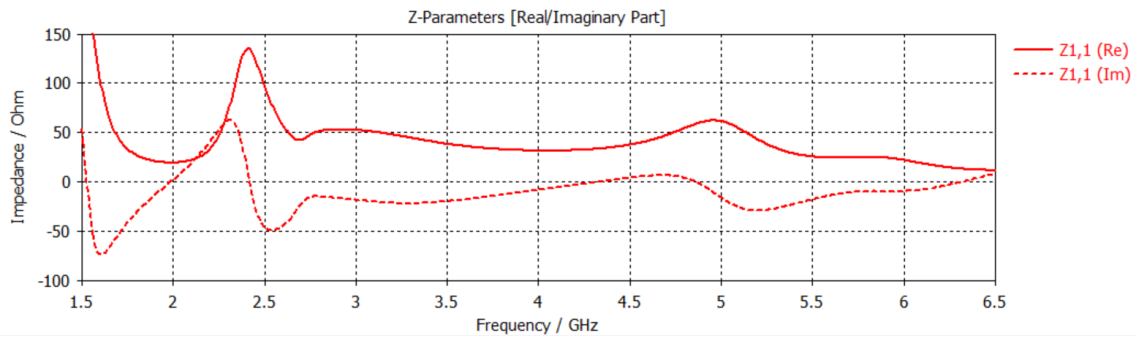


Figura 3.55. Z_{11} del tercer prototipo

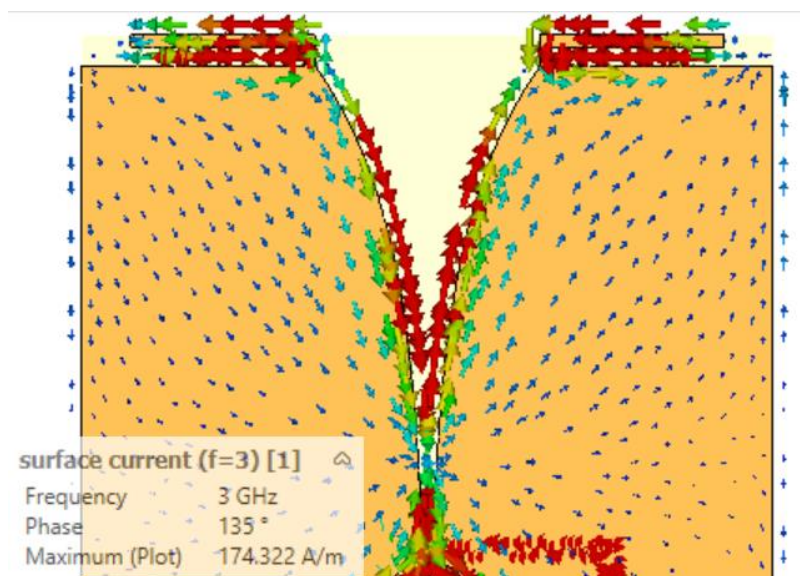


Figura 3.56. Corriente superficial de la antena para una frecuencia de 3 GHz

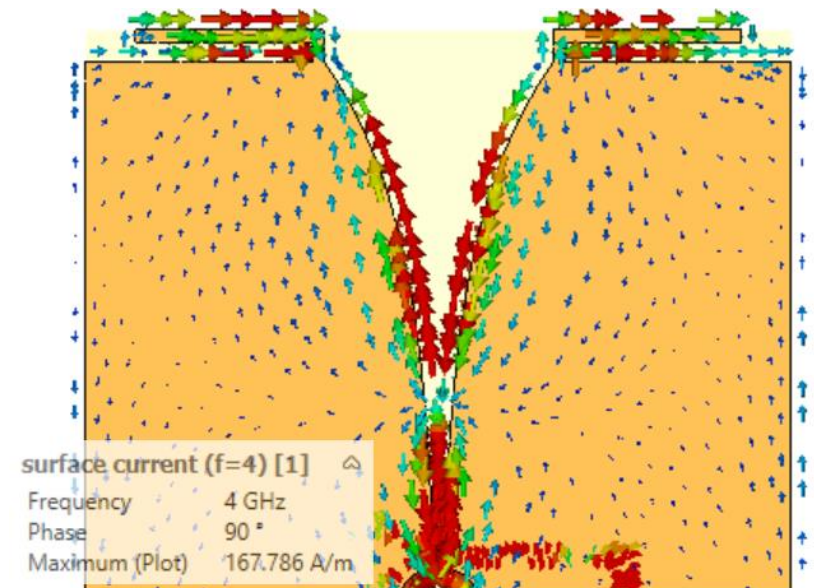


Figura 3.57. Corriente superficial de la antena para una frecuencia de 4 GHz

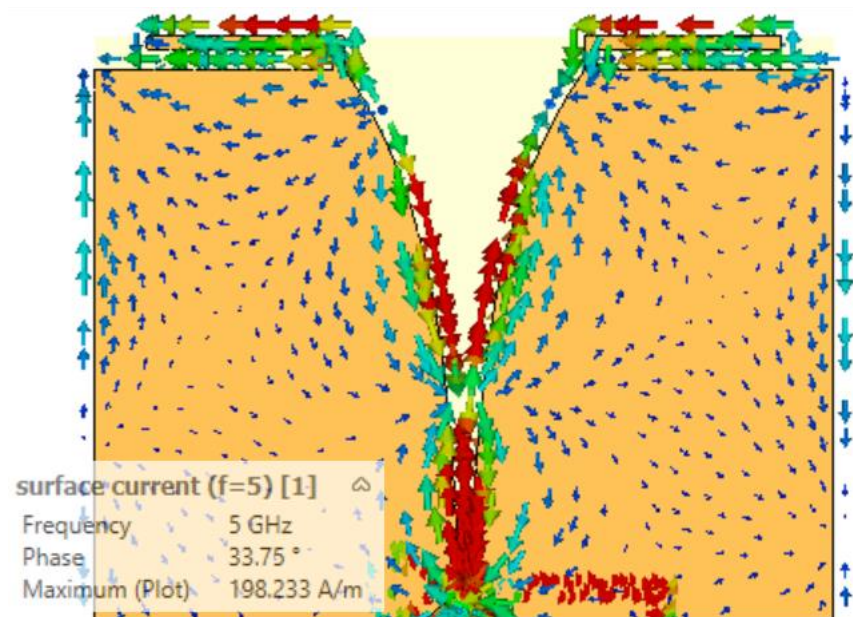


Figura 3.58 Corriente superficial de la antena para una frecuencia de 5 GHz

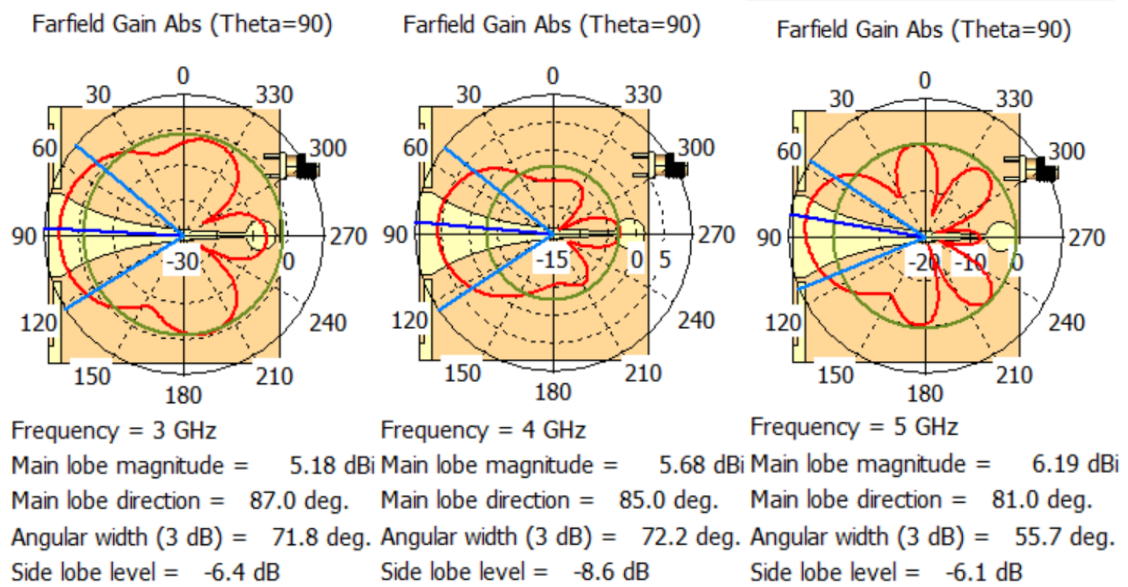
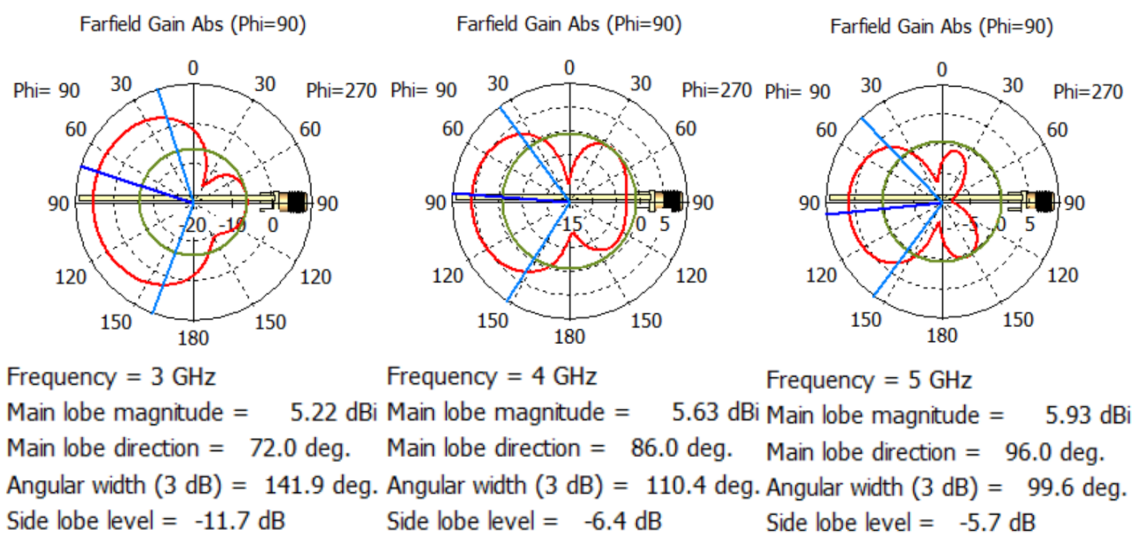


Figura 3.59. Diagramas de radiación para Theta = 90°



Figuras 3.60. Diagramas de radiación para $\Phi = 90^\circ$

Este capítulo concluye en que el diseño de un elemento radiante dedicado a estaciones base 5G es crucial para mejorar la directividad y eficiencia del sistema. La celda unidad diseñada facilita la implementación modular, asegurando un rendimiento óptimo en la distribución de las señales y la gestión de recursos en entornos de alta densidad. Este enfoque permite una integración efectiva en infraestructuras avanzadas, destacando su importancia en la evolución de las comunicaciones móviles.

Hay que destacar la respuesta de la ILA, es un elemento muy versátil con una fácil implementación y optimización, permitiendo trabajar casi en cualquier banda de frecuencia. Este componente ha sido crucial en el prototipo de la antena Vivaldi. Gracias a la ILA, se ha podido conseguir una respuesta más plana que la proporcionada por la Vivaldi, permitiendo ahorrar en componentes electrónicos adicionales.

La antena Vivaldi ha demostrado una gran banda de trabajo y una gran directividad. Como la antena está dedicada a estaciones base, el tamaño de la Vivaldi no ha sido un problema, permitiendo aprovechar su ancho de banda y su directividad. Sin embargo, estas antenas son muy sensibles a los elementos que la rodean, pudiendo ocasionar un problema a la hora de formar el elemento conmutado.

En el siguiente capítulo se muestran las distintas variaciones hechas en los prototipos propuestos para formar una antena conmutada.

Capítulo 4. Formas propuestas para la estructura conmutada

Una vez diseñado el elemento base para la estructura conmutada, se crearon diversos prototipos de la estructura conmutada.

4.1 Estructuras propuestas

A pesar de que el diagrama de radiación del segundo prototipo no era el deseado, si plantearon diversas estructuras conmutadas como propuestas para futuros trabajos.

En la figura 4.1 se encuentra la modificación en el prototipo para incluirla en una estructura conmutada. El ángulo de las diagonales determina el número de elementos que tendrá la estructura conmutada. En la figura, las diagonales tienen un ángulo de 60° , formando una estructura conmutada de seis elementos. Esta estructura se observa en la figura. En la figura 4.2 se muestra el parámetro S_{11} de la antena y en la figura 4.3 se muestra un posible modelo. En la figura 4.4 se recogen otra variación del segundo prototipo, y en la figura 4.5 su S_{11}

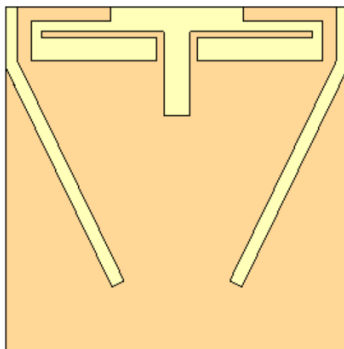


Figura 4.1. Segundo prototipo con diagonales

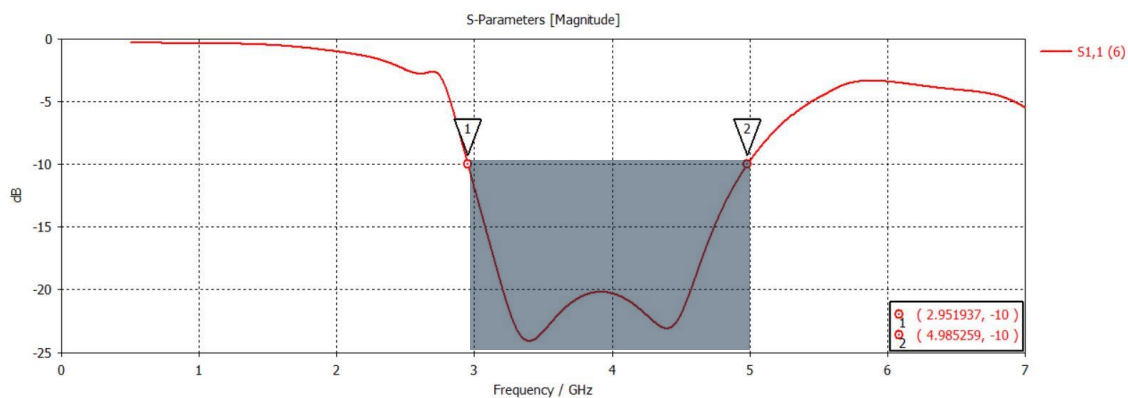


Figura 4.2. S_{11} del segundo prototipo con diagonales

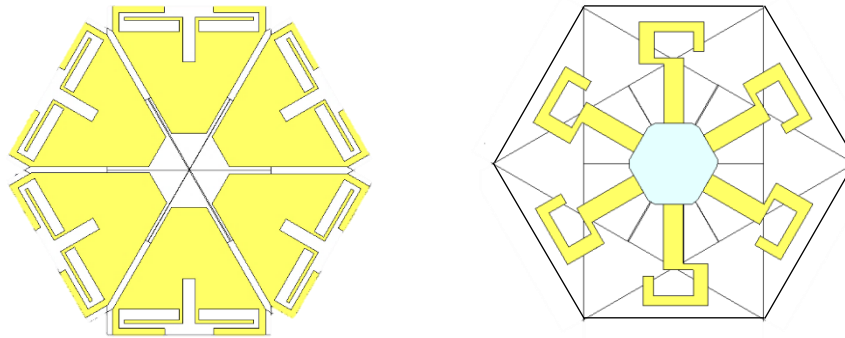


Figura 4.3. Prototipo de modelo conmutado

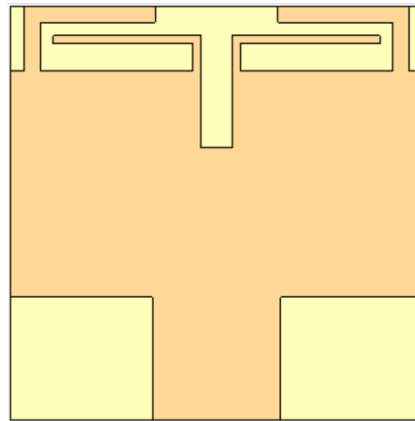


Figura 4.4. Segundo prototipo con cuadrados

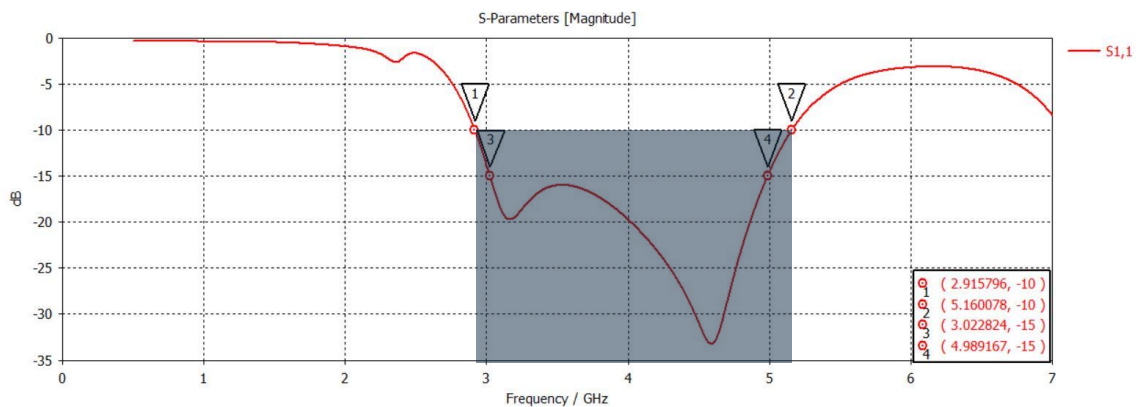


Figura 4.5. S_{11} del segundo prototipo con cuadrados

A pesar de que estos modelos han sido descartados, se presentan distintos modelos como propuestas para futuro trabajo en caso de necesitar algo elemento parecido.

Debido al elevado tiempo de simulación de los elementos conmutados y a su diagrama de radiación no deseado, las antenas conmutadas formadas por el segundo prototipo no se han simulado.

El ancho de haz a -3 dBs de la antena Vivaldi es de 72°, haciendo que la estructura conmutada sea de 5 elementos. La estructura más básica surge de colocar 5 Vivaldis en los lados de un pentágono regular. Esta estructura facilita el análisis de los resultados ya que varios de estos parámetros de la matriz S serán iguales.

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} \end{pmatrix} \rightarrow [S_{11}=S_{22}=S_{33}=S_{44}=S_{55}] \rightarrow \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} \\ S_{21} & S_{11} & S_{23} & S_{24} & S_{25} \\ S_{31} & S_{32} & S_{11} & S_{34} & S_{35} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{11} & S_{45} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{11} \end{pmatrix}$$

Al tratarse de elementos iguales pasivos, permite aplicar reciprocidad entre ellos, esto implica que $S_{ij} = S_{ji}$, permitiendo disminuir el número de elementos que hay que analiza a la mitad.

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} \\ S_{21} & S_{11} & S_{23} & S_{24} & S_{25} \\ S_{31} & S_{32} & S_{11} & S_{34} & S_{35} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{11} & S_{45} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{11} \end{pmatrix} \rightarrow [\text{Reciprocidad}] \rightarrow \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} \\ S_{12} & S_{11} & S_{23} & S_{24} & S_{25} \\ S_{13} & S_{23} & S_{11} & S_{34} & S_{35} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{11} & S_{45} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{11} \end{pmatrix}$$

La forma de la antena permite aplicarle simetría de revolución.

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} \\ S_{12} & S_{11} & S_{23} & S_{24} & S_{25} \\ S_{13} & S_{23} & S_{11} & S_{34} & S_{35} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{11} & S_{45} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{11} \end{pmatrix} \rightarrow [1^{\text{a}} \text{ Simetría}] \rightarrow \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{13} & S_{12} & S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{14} & S_{13} & S_{12} & S_{11} & S_{12} \\ S_{15} & S_{14} & S_{13} & S_{12} & S_{11} \end{pmatrix}$$

Además, si utilizamos la primera antena como eje de simetría, se observa que $S_{12} = S_{14}$ y $S_{13} = S_{15}$.

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{13} & S_{12} & S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{14} & S_{13} & S_{12} & S_{11} & S_{12} \\ S_{15} & S_{14} & S_{13} & S_{12} & S_{11} \end{pmatrix} \rightarrow [2^{\text{a}} \text{ Simetría}] \rightarrow \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{12} \\ S_{13} & S_{12} & S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{12} & S_{13} & S_{12} & S_{11} & S_{12} \\ S_{13} & S_{12} & S_{13} & S_{12} & S_{11} \end{pmatrix}$$

En la figura 4.6 se muestra la estructura con la Vivaldi.

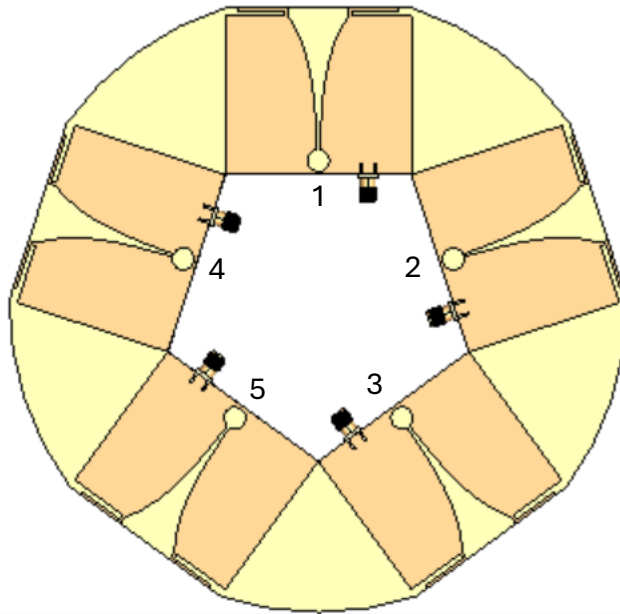


Figura 4.6. Conmutado básico.

Para reducir el tamaño de la antena, se “cortaron” los vértices inferiores para acercar las antenas entre sí y aislar físicamente los elementos entre sí. En las figuras 4.7 y 4.8 se muestran dos prototipos.

Además del factor de reflexión, hay que tener en cuenta el factor de asilamiento entre los distintos elementos de la antena. El valor mínimo que debe tener este factor es de -15 dB para garantizar un buen funcionamiento. El valor más crítico es el aislamiento entre elementos contiguos.

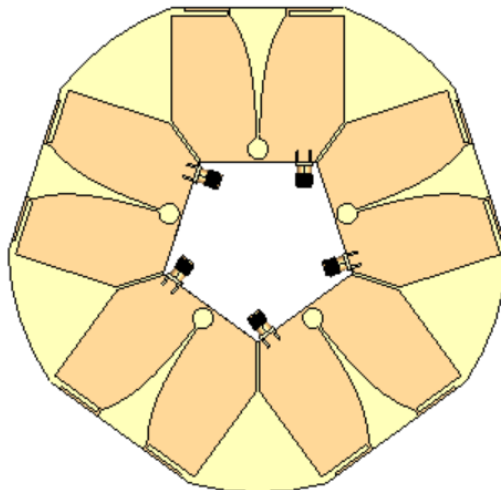


Figura 4.7. Modelo de un prototipo conmutado

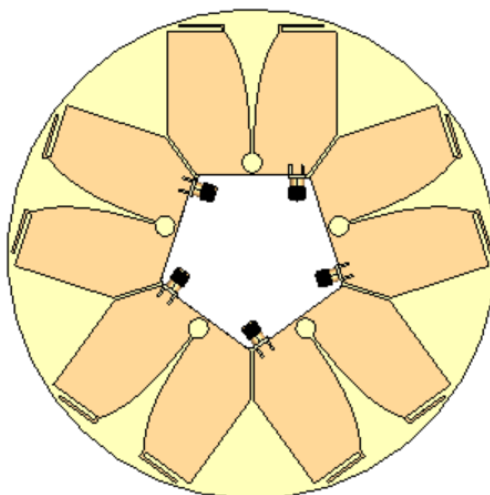


Figura 4.8. Modelo de un prototipo conmutado cambiando forma del dieléctrico

La única variación entre los modelos de las figuras anteriores es la forma del dieléctrico.

La separación entre los elementos es de 2 mm. Durante el diseño de la estructura conmutada, se planteó utilizar las aperturas Vivaldi como una especie de “pétalo” de una flor. Para darle esta forma de pétalo, se redondearon los vértices de las antenas. El tamaño máximo que se puede eliminar de la antena depende de la línea de alimentación y del tamaño de las ILAS.

4.2 Estructura definitiva

Varios modelos son válidos. Para elegir un modelo definitivo se analizaron su factor de reflexión, su diagrama de radiación y su factor de aislamiento. Los modelos de las figuras tienen un comportamiento similar. Sin embargo, se eligió la segunda como estructura definitiva por su mejor ancho de haz a -3dBs y por la estructura física en forma de “flor”.

En las siguientes figuras, de la 4.9 hasta la 4.18, se muestran el prototipo por ambas caras, las eficiencias de radiación y total, el parámetro Z_{11} , las corrientes superficiales de la antena y los diagramas de radiación en ambos planos.

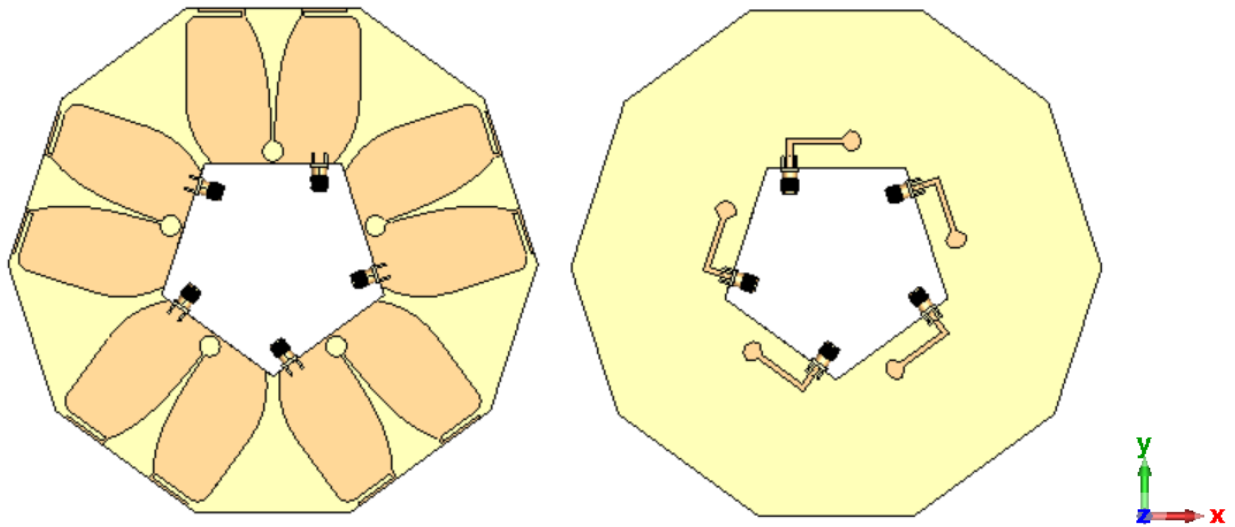


Figura 4.9. Modelo definitivo

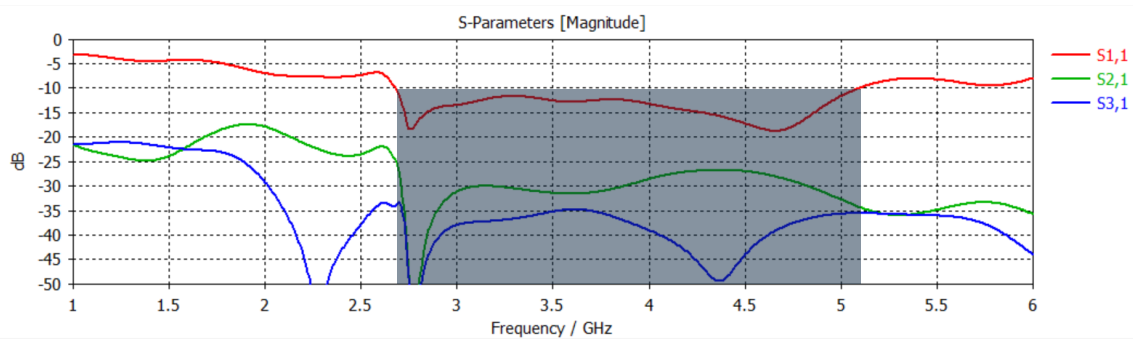


Figura 4.10. Parámetros S

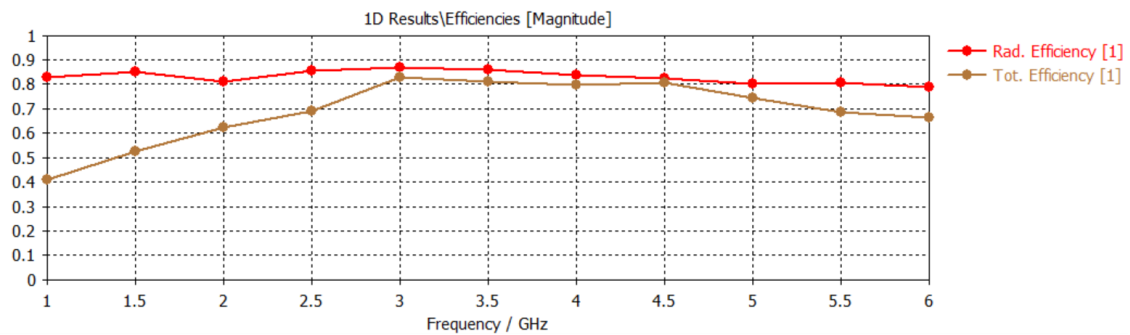


Figura 4.11. Eficiencias de radiación y total

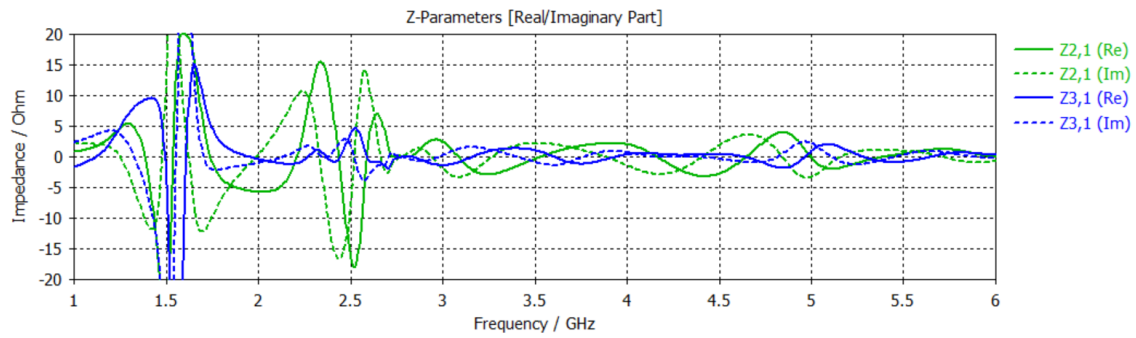


Figura 4.12. Z_{21} y Z_{31} de la antena conmutada

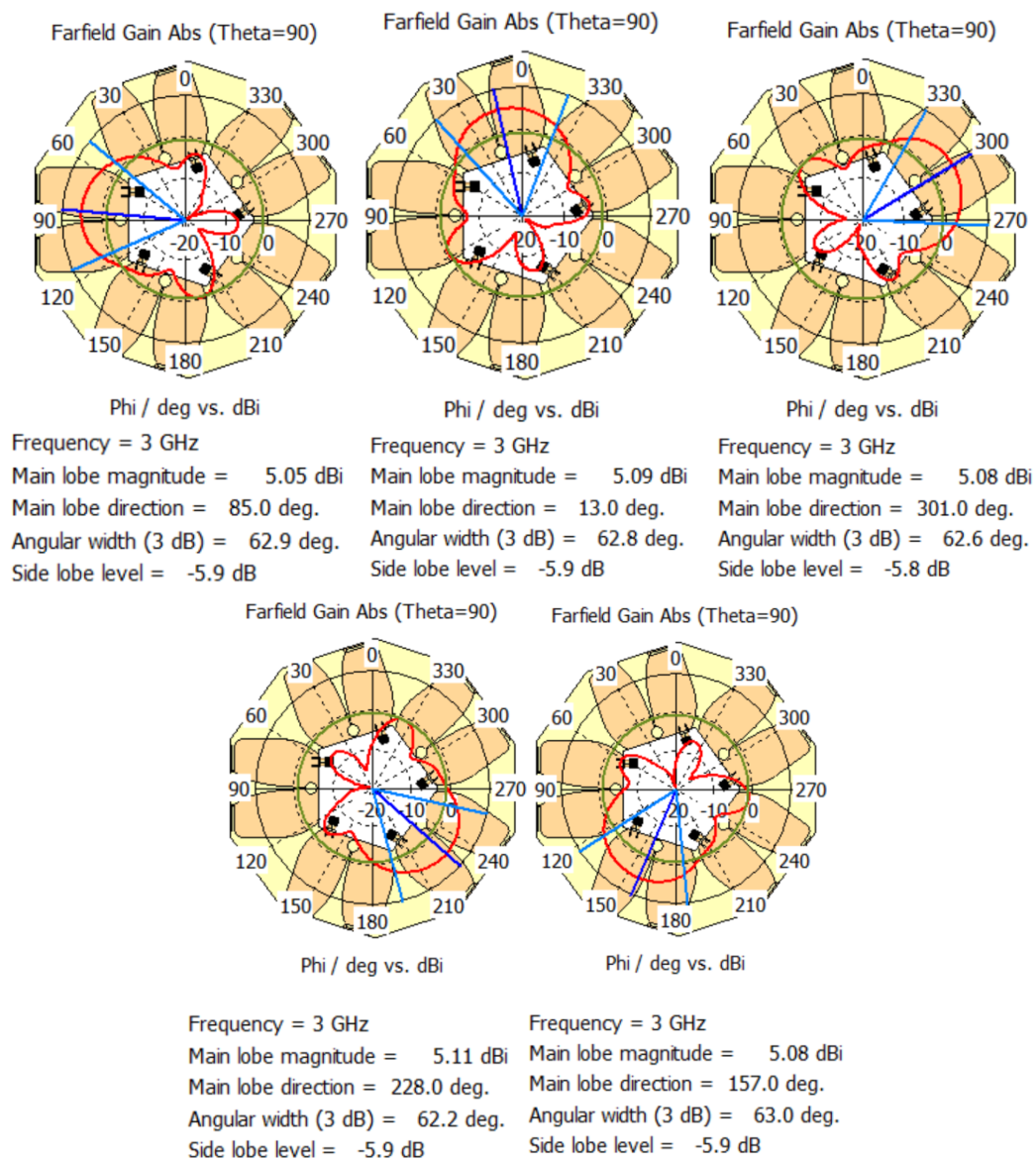


Figura 4.13. Diagramas de radiación del elemento conmutado para $f = 3 \text{ GHz}$ y $\Theta = 90^\circ$

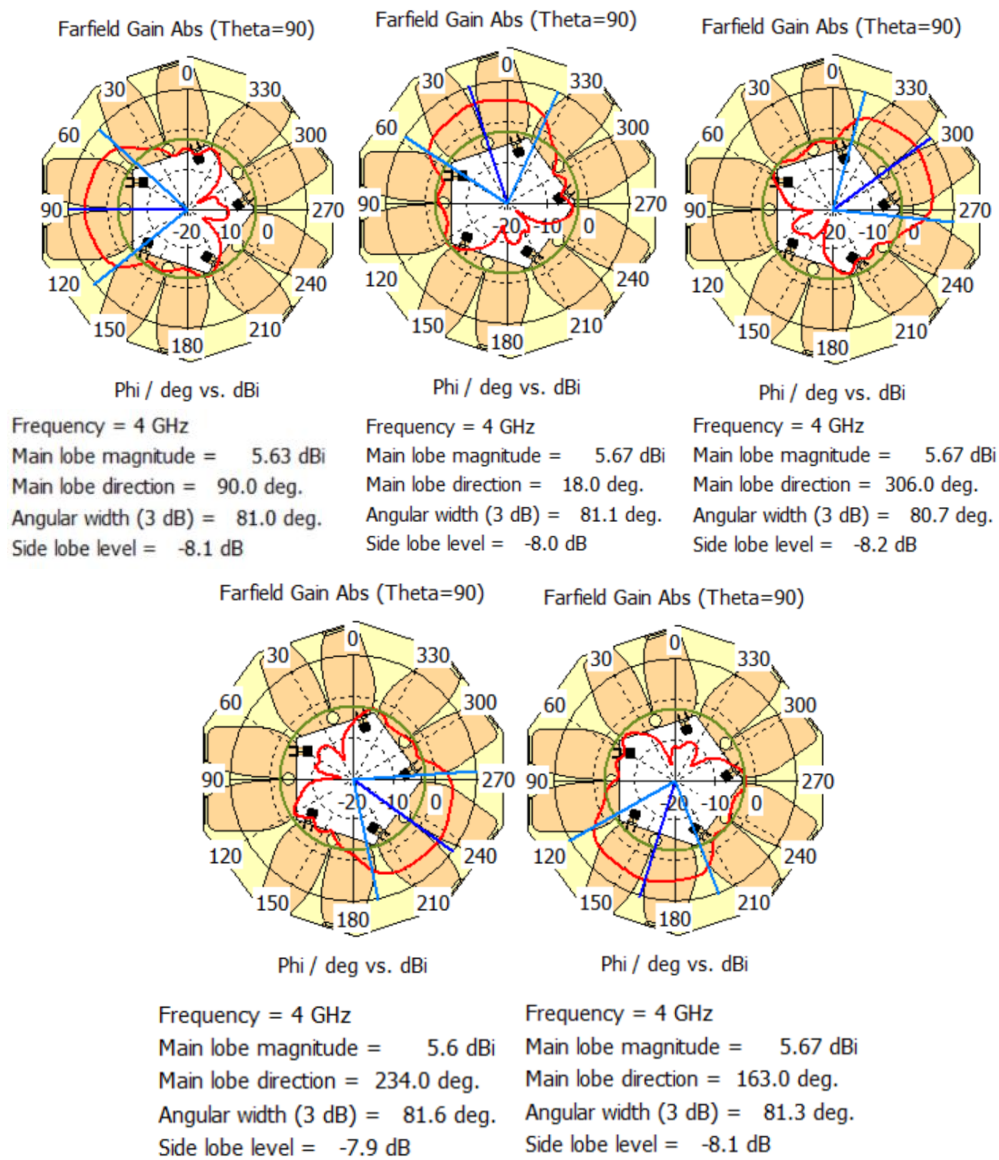


Figura 4.14. Diagramas de radiación del elemento conmutado para $f = 4$ GHz y $\Theta = 90^\circ$

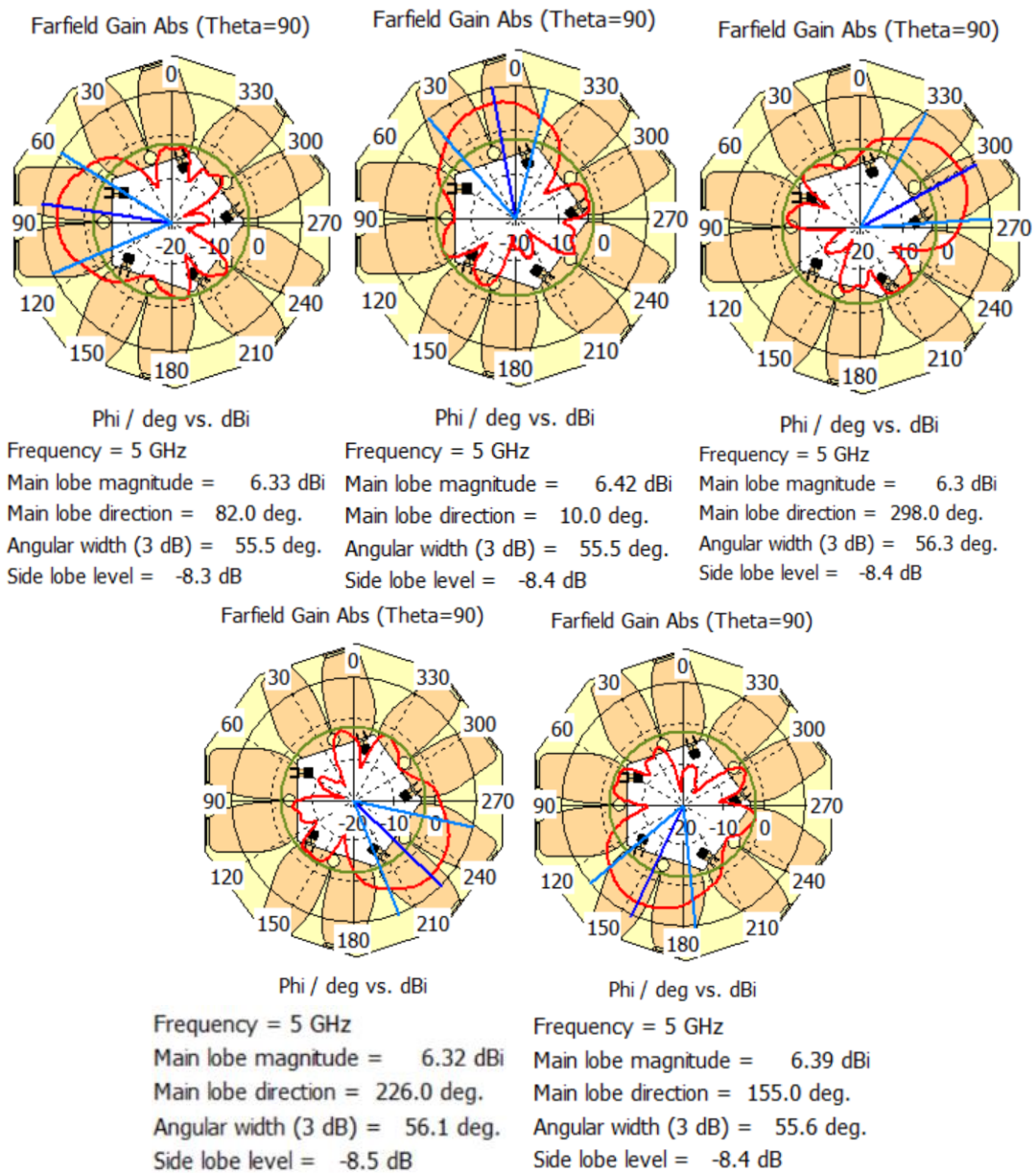


Figura 4.15. Diagramas de radiación del elemento conmutado para $f = 5 \text{ GHz}$ y $\Theta = 90^\circ$

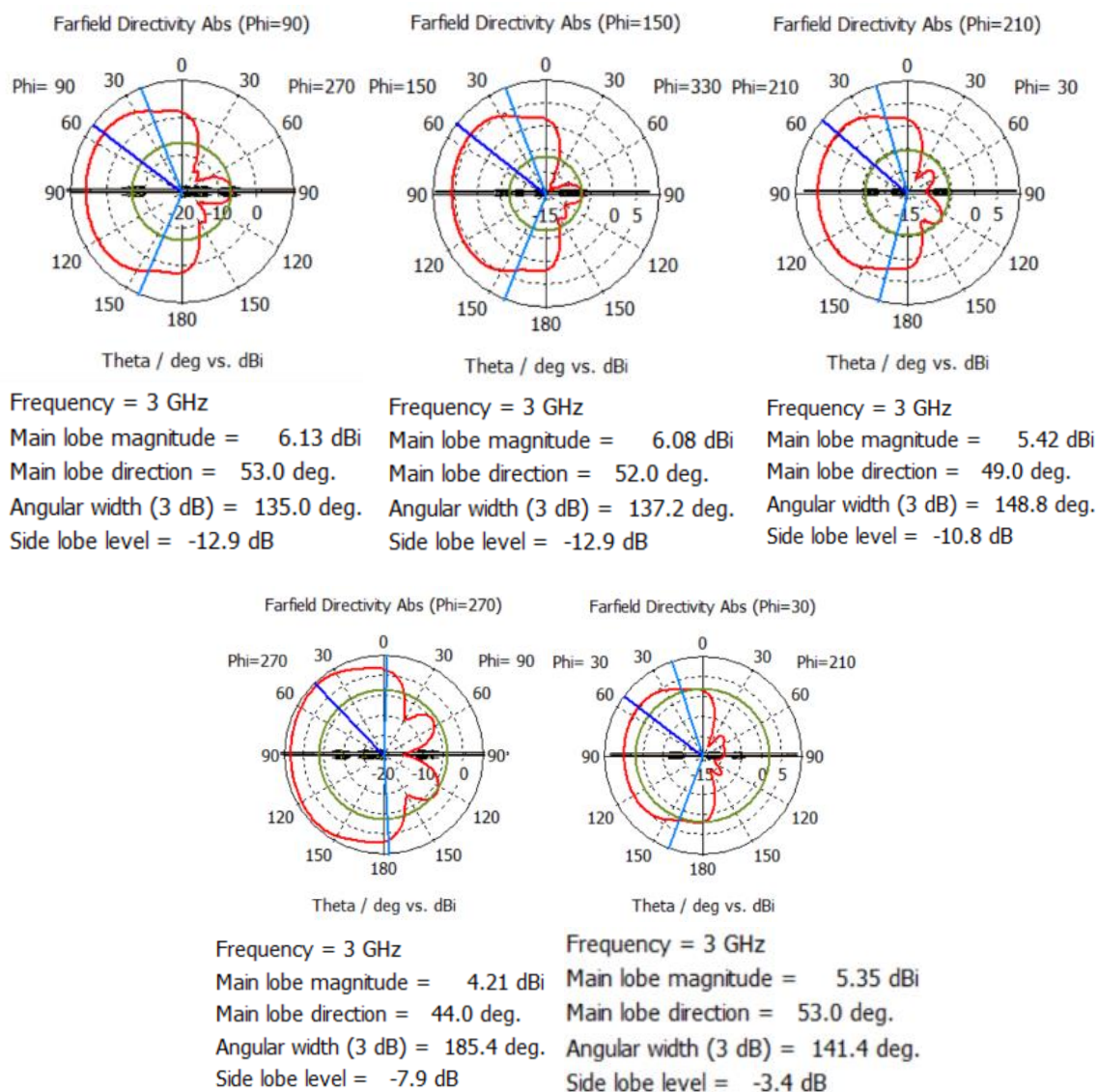


Figura 4.16. Diagramas de radiación del elemento conmutado para $f = 3 \text{ GHz}$ y $\text{Phi} = 90^\circ$

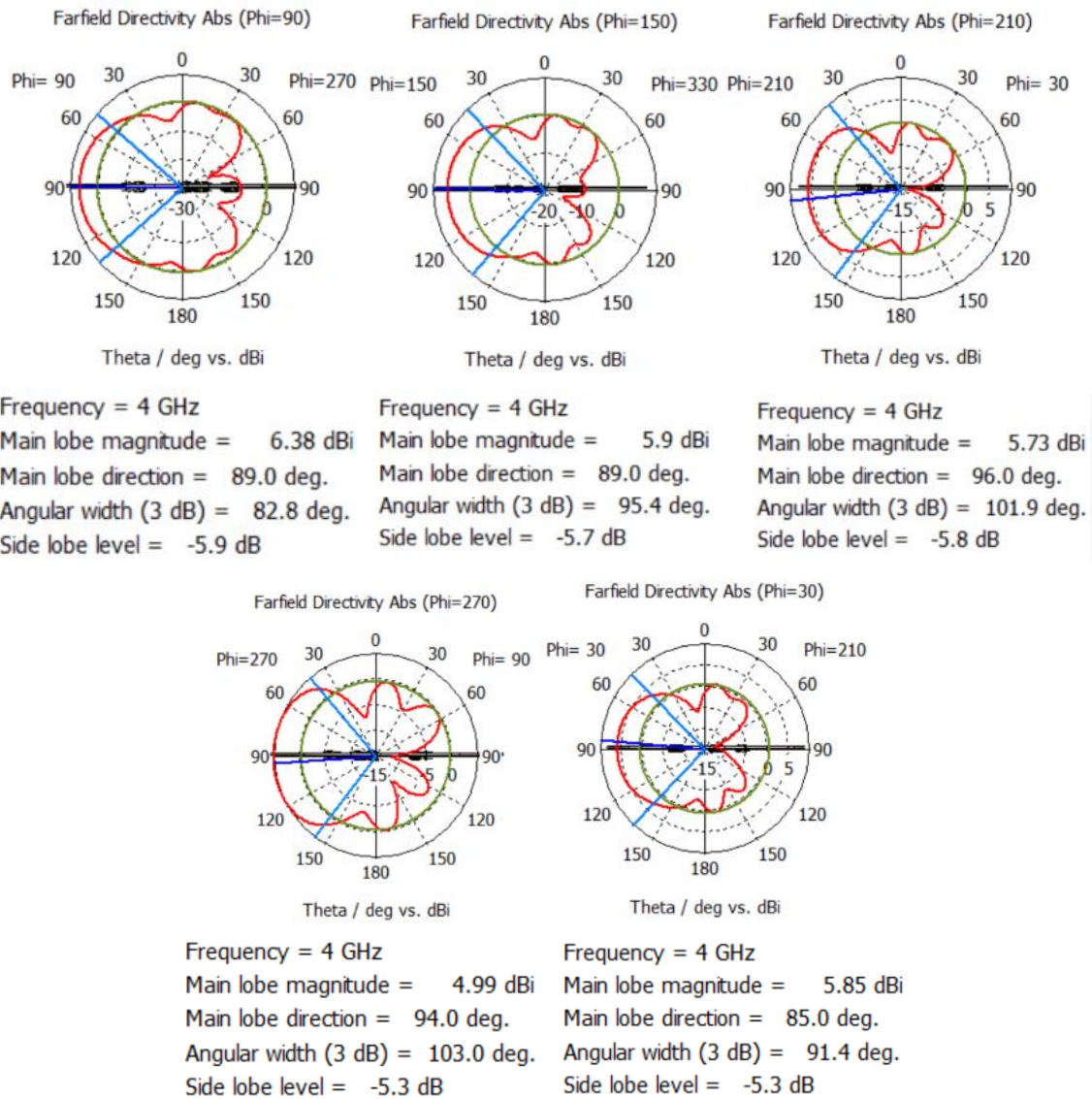


Figura 4.17. Diagramas de radiación del elemento conmutado para $f = 3 \text{ GHz}$ y $\Phi = 90^\circ$

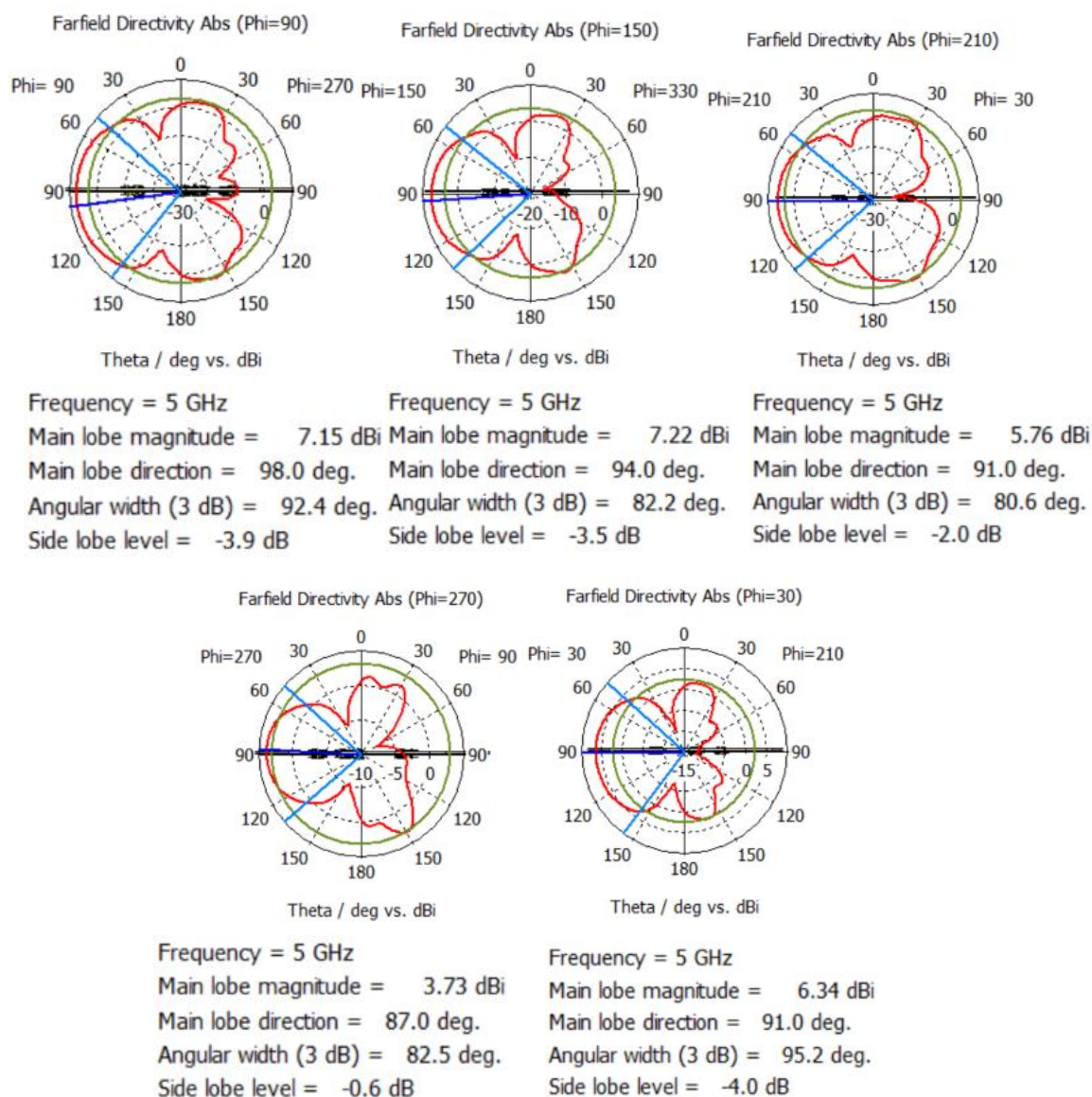


Figura 4.18. Diagramas de radiación del elemento conmutado para $f = 3 \text{ GHz}$ y $\text{Phi} = 90^\circ$

Capítulo 5. Fabricación y medición de la estructura conmutada

La fabricación y medición de la estructura conmutada no habría sido posible sin el laboratorio del APL. Se utilizó una fresadora en 2D para la fabricación de la antena y una cámara anecoica electromagnética para medir el factor de reflexión, el factor de aislamiento y el diagrama de radiación.

Tanto la fresadora como el analizador de espectros tienen compatibilidad con CST Suite Studio, permitiendo visualizar los resultados en el propio software.

La página web [43] se dedica a fabricar prototipos de PCB personalizados, sirviendo como orientación para saber cuál habría sido el coste de fabricación del prototipo de la antena.

En la figura 5.1 se muestra el prototipo fabricado por ambas caras, en la figura 5.2 y 5.3 se muestran los parámetros S y en la figura 5.4 se muestra la cámara anecoica donde se ha medido el modelo.

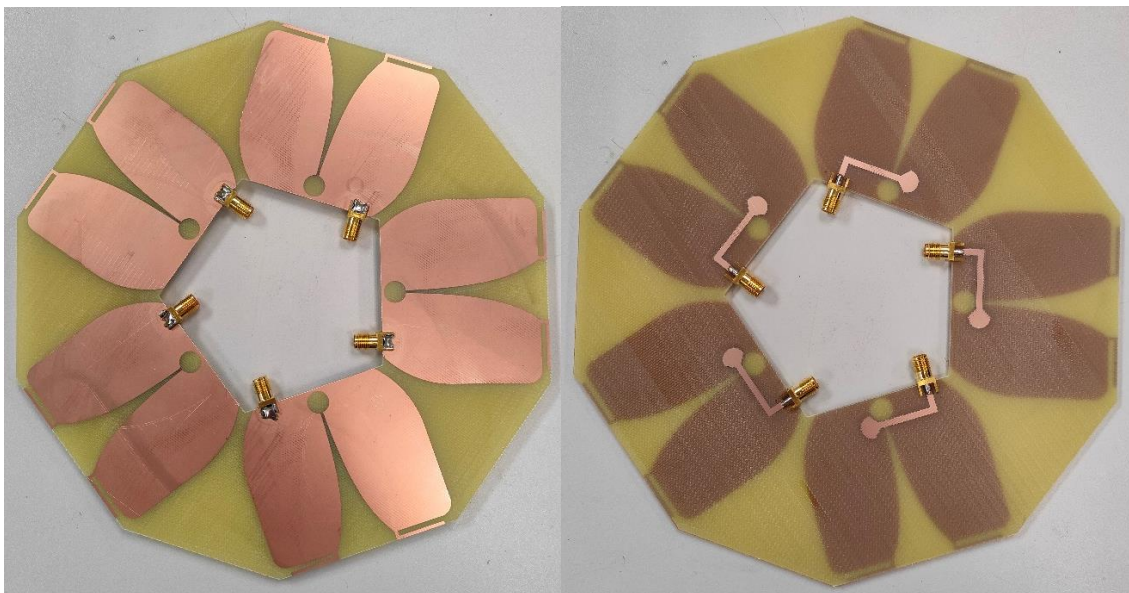


Figura 5.1. Prototipo fabricado por ambas caras

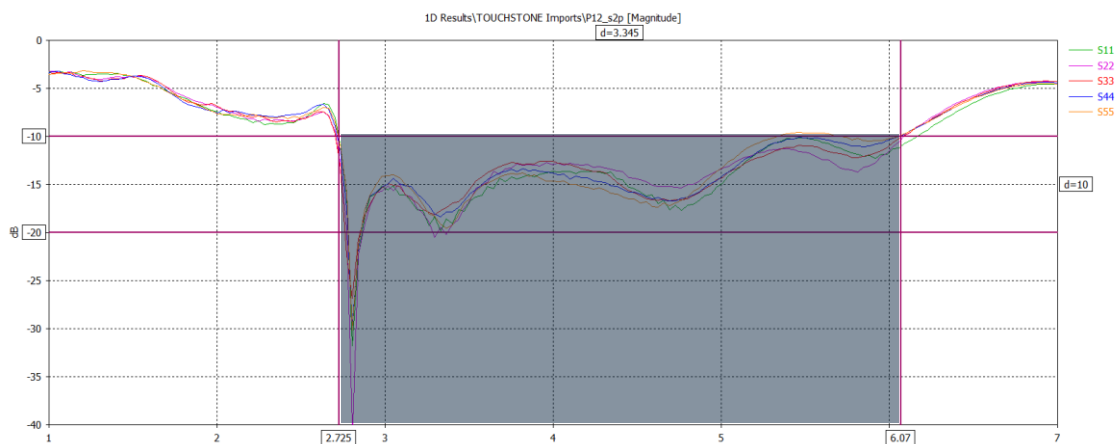


Figura 5.2. Parámetros S_{ii} medidos de la antena

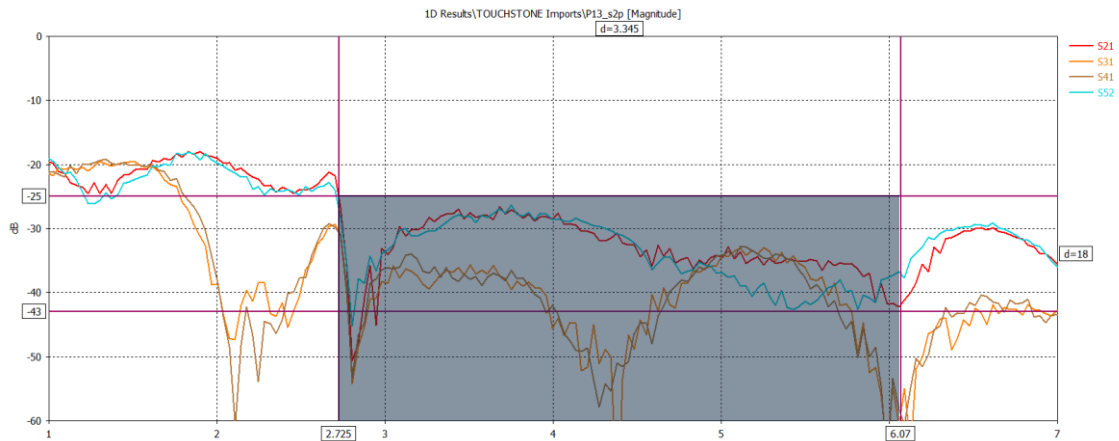


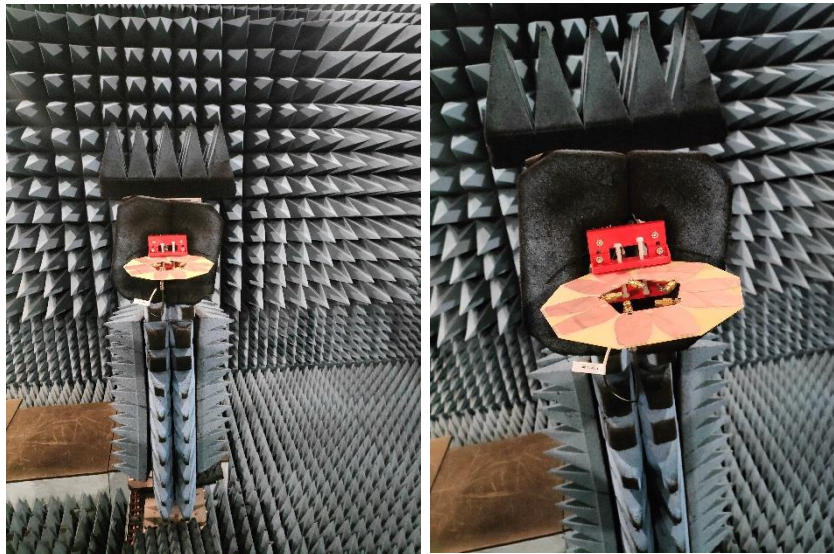
Figura 5.3. Parámetros S_{ij} medidos de la antena



Figura 5.4. Cámara anecoica electromagnética

En las figuras 5.2 y 5.3 se observa como el resultado medido es muy similar al resultado simulado, verificando que el software CST es una buena herramienta para el análisis electromagnético y que las decisiones tomadas durante el diseño han tenido buen resultado.

En las figuras 5.5 y 5.6 se muestran como se colocó el prototipo en el posicionador para medir los parámetros S, la eficiencia de radiación y los diagramas de radiación.



Figuras 5.5 y 5.6. Antena en el posicionador para las medidas.

Desde la figura 5.7 hasta la figura 5.9 se muestra el campo total medido a distintas frecuencias en coordenadas polares en los planos XZ e YZ.

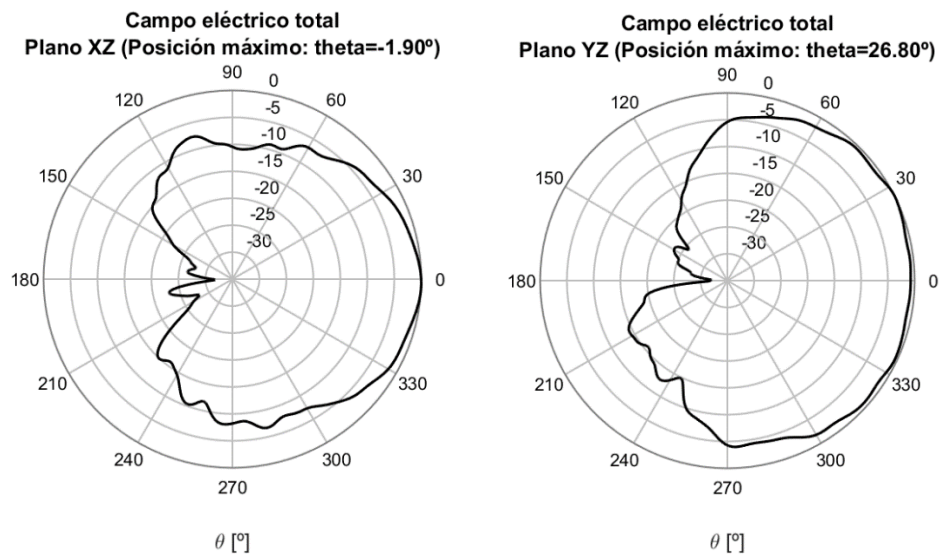


Figura 5.7. Campo eléctrico total en los planos XZ e YZ para $f = 3 \text{ GHz}$

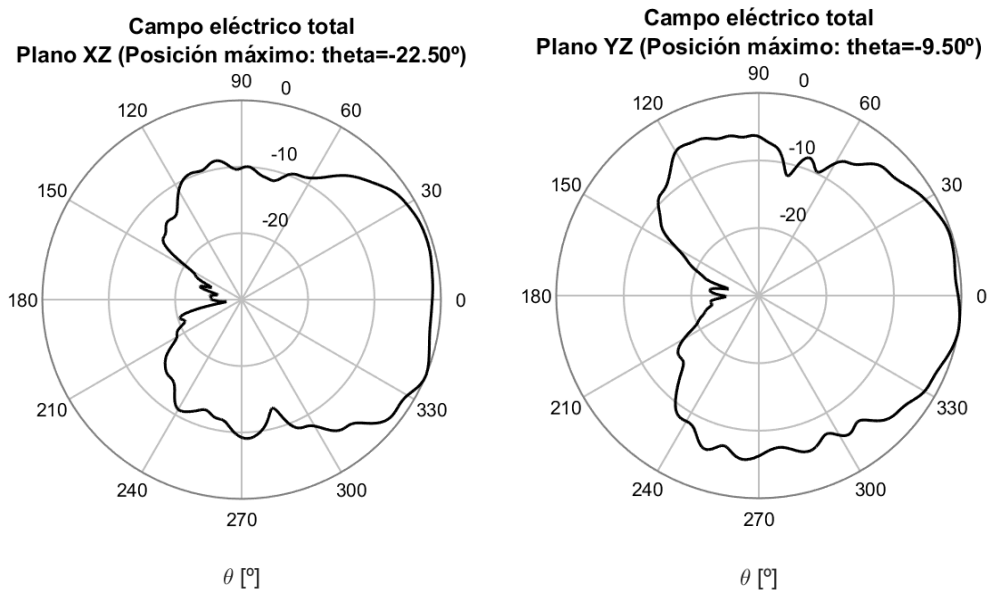


Figura 5.8. Campo eléctrico total en los planos XZ e YZ para $f = 4$ GHz

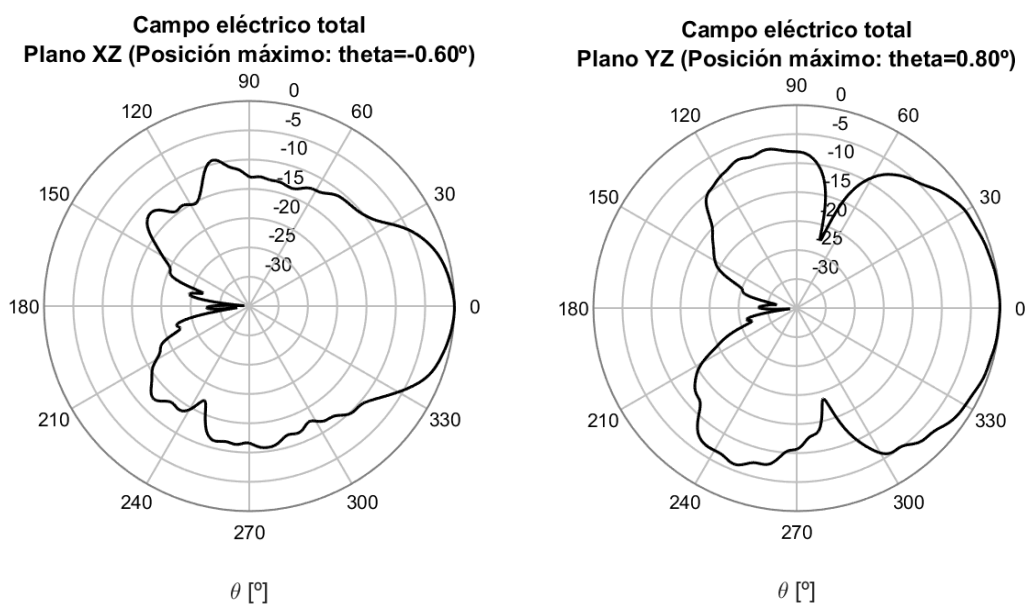


Figura 5.9. Campo eléctrico total en los planos XZ e YZ para $f = 5$ GHz

En la figura 5.10 se muestra el conmutador disponible en el laboratorio. A pesar de no ser de 5 salidas, nos permite comprobar como trabaja la antena con *beam steering*.



Figuras 5.10. Conmutador y placa de evaluación SP4T ADRF5040. Fuente [44]

En la tabla 5.1 se muestran los distintos valores medidos de la antena.

Frecuencia (GHz)	Directividad (dB)	Ganancia (dB)	Eficiencia de radiación (%)	Eficiencia total (%)
2.5	5.68	3.32	80.38	58.02
3	6.49	5.3	80.47	76.04
3.5	6.49	5.39	81.12	77.69
4	6.77	5.9	89.48	81.91
4.5	6.69	5.9	82.65	78.34
5	8.6	7.15	76.44	81.56
5.5	8.37	5.86	68.77	56.15
6	7.02	5.39	80.07	68.69

Tabla 5.1. Directividad, ganancia, eficiencia de radiación y total

Capítulo 6. Conclusiones y propuesta de trabajo futuro

En la evolución de las comunicaciones móviles, las antenas de las estaciones base han sido un factor determinante. A pesar de que cada generación incluye una mejora de software, su despliegue no habría sido posible sin los elementos radiantes capaces de trabajar en las bandas destinadas con los requerimientos técnicos necesarios como la ganancia de la antena o el diagrama de radiación.

Las comunicaciones móviles 5G requieren de antenas inteligentes capaces de soportar técnicas avanzadas de conformado de haces y MIMO, ya que estas técnicas son necesarias para esta generación de comunicaciones móviles. Esta necesidad ha llegado a una investigación masiva por parte de las grandes empresas de telecomunicaciones, con el objetivo de diseñar antenas inteligentes capaces de dar servicio a cientos y miles de usuarios simultáneamente. Sin embargo, estas antenas aún están en fase de desarrollo, dando lugar a un pequeño abanico de antenas inteligentes en venta.

Estas antenas inteligentes no serían viables sin las antenas impresas. Este tipo de antenas permiten diseñar cualquier tipo de estructura radiante, optimizando el espacio físico y formando antenas compuestas por cientos de elementos radiantes, capaces de ofrecer servicio a un elevado número de usuarios. Además de esta ventaja, se consideran estas antenas por su facilidad de fabricación y bajo coste, pudiendo fabricarlas en masa.

Dentro de las antenas planas, hay tres tipos de antenas muy utilizadas en las comunicaciones móviles por sus ventajas. Las ILAs permiten trabajar en cualquier banda de frecuencia, haciéndola ideal para casi todas las aplicaciones. La apertura *Notch* tiene un diseño muy sencillo y es fácilmente escalable, haciendo que sea ideal para muchas aplicaciones. Ambas antenas permiten controlar de manera sencilla la polarización de la antena. La apertura Vivaldi es una antena ideal para altas frecuencias, ya que esta antena es físicamente grande comparadas con otras antenas a la misma frecuencia de trabajo, limitando su uso en aplicaciones donde el espacio sea un problema. Al tratarse de una antena para estaciones base, la apertura Vivaldi es una buena opción para el diseño del elemento base. Tiene un ancho de banda muy grande y una alta directividad. Junto con las ILAs, se consigue diseñar un elemento capaz de trabajar en toda la banda media de 5G con un rendimiento elevado y un diagrama de radiación ideal.

Para diseñar el elemento conmutado hay que considerar como va a ser el prototipo en la vida real. Al necesitar la electrónica para el *beamswitching*, es necesario dejar espacio físico, aumentando el tamaño total de la antena.

Tras varios prototipos distintos, se llega al modelo final, obteniendo unos resultados muy buenos tanto en el factor de reflexión como en el factor de aislamiento. Sin embargo, como la apertura Vivaldi es muy sensible a factores externos, el diagrama de radiación se ha visto modificado. Como propuesta de futuro trabajo, se plantea un estudio completo del elemento diseñado para modificar su comportamiento y que la estructura conmutada tenga el diagrama de radiación esperado.

Una vez diseñado la antena conmutada y verificado su comportamiento a través de simulaciones, se pasa a la fabricación. La fabricación y medición ha sido posible gracias al APL, permitiendo comprobar con resultados empíricos el comportamiento de la antena, y compararlos con los



resultados simulados. Como se ha visto durante el diseño, los resultados simulados son muy similares a los resultados reales.

Los resultados obtenidos muestran la capacidad de esta antena para trabajar eficazmente en la banda media de 5G, optimizando el rendimiento y la directividad y estableciendo una base sólida para futuras innovaciones en el ámbito de las comunicaciones móviles.

Como propuesta para futuro trabajo, se plantea la fabricación del radomo que proteja la antena sin que afecte a su funcionamiento, pruebas reales en entornos urbanos y mediciones con los conmutadores.



Capítulo 7. Bibliografía

- [1] K. Tachikawa, "A perspective on the evolution of mobile communications," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 10, pp. 66-73, Oct. 2003, doi: 10.1109/MCOM.2003.1235597.
- [2] Sharma, Pankaj. "Evolution of mobile wireless communication networks-1G to 5G as well as future prospective of next generation communication network." *International Journal of Computer Science and Mobile Computing* 2.8 (2013): 47-53.
- [3] Naranjo, D., D. Buenaño, and I. Tenecora Mejía. "Evolución de la tecnología móvil. Camino a 5G." *Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales* (2016): 1-13
- [5] <https://es.scribd.com/document/650739342/DATASHEET-ANTENA-AAU5636w>
- [6] <https://www.samsung.com/global/business/networks/products/radio-access/massive-mimo-radio/>
- [7] <https://insiraficha.com/tag/ericsson-air-6449/>
- [8] <https://www.nokia.com/networks/mobile-networks/airscale-radio-access/massive-mimo/>
- [9] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin and R. Zhang, "An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges," in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742-758, Oct. 2014, doi: 10.1109/JSTSP.2014.2317671.
- [10] <https://community.fs.com/es/article/wifi-6-mimo-technology.html>
- [11] E. Castañeda, A. Silva, A. Gameiro and M. Kountouris, "An Overview on Resource Allocation Techniques for Multi-User MIMO Systems," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 239-284, Firstquarter 2017, doi: 10.1109/COMST.2016.2618870.
- [12] Q. H. Spencer, C. B. Peel, A. L. Swindlehurst and M. Haardt, "An introduction to the multi-user MIMO downlink," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 60-67, Oct. 2004, doi: 10.1109/MCOM.2004.1341262.
- [13] G. Miao, "Energy-Efficient Uplink Multi-User MIMO," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 2302-2313, May 2013, doi: 10.1109/TWC.2013.040213.120942.
- [14] <https://www.redeszone.net/2017/10/22/merece-la-pena-comprar-router-tenga-mu-mimo-mayor-rendimiento-wi-fi/>
- [15] T. L. Marzetta, "Massive MIMO: An Introduction," in *Bell Labs Technical Journal*, vol. 20, pp. 11-22, 2015, doi: 10.15325/BLTJ.2015.2407793.
- [16] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin and R. Zhang, "An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges," in *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742-758, Oct. 2014, doi: 10.1109/JSTSP.2014.2317671
- [17] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson and T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, February 2014, doi: 10.1109/MCOM.2014.6736761.



- [18] F. A. Pereira de Figueiredo, "An Overview of Massive MIMO for 5G and 6G", *IEEE LAT AM T*, vol. 20, no. 6, pp. 931–940, Feb. 2022.
- [19] S. Kutty and D. Sen, "Beamforming for Millimeter Wave Communications: An Inclusive Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 949-973, Secondquarter 2016, doi: 10.1109/COMST.2015.2504600.
- [20] H. Hua, J. Xu and T. X. Han, "Optimal Transmit Beamforming for Integrated Sensing and Communication," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 8, pp. 10588-10603, Aug. 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3262513.
- [21] Ning *et al.*, "Beamforming Technologies for Ultra-Massive MIMO in Terahertz Communications," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 4, pp. 614-658, 2023, doi: 10.1109/OJCOMS.2023.3245669.
- [22] <https://info.support.huawei.com/info-finder/encyclopedia/en/Beamforming.html>
- [23] Y. Li *et al.*, "Beamsteering for 5G Mobile Communication Using Programmable Metasurface," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 7, pp. 1542-1546, July 2021, doi: 10.1109/LWC.2021.3073975.
- [24] V. T. Bharambe and J. J. Adams, "Planar 2-D Beam Steering Antenna Using Liquid Metal Parasitics," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 11, pp. 7320-7327, Nov. 2020, doi: 10.1109/TAP.2020.2998219
- [25] https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-the-difference-between-a-Beam-Steering-where-a-control-parameter-such_fig1_372105610
- [26] Shaw, Minakshmi, and Yogesh Kumar Choukiker. "Electronically beam switched conformal microstrip array antenna for 5G applications." *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering* 32.9 (2022): e23270
- [27] K. Trzebiatowski, M. Rzymowski, L. Kulas and K. Nyka, "Simple 60 GHz Switched Beam Antenna for 5G Millimeter-Wave Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 1, pp. 38-42, Jan. 2021, doi: 10.1109/LAWP.2020.3038260.
- [28] B. A. F. Esmail, S. Koziel and S. Szczepanski, "Overview of Planar Antenna Loading Metamaterials for Gain Performance Enhancement: The Two Decades of Progress," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 27381-27403, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3157634.
- [29] Chairunnisa, N. Fadilah, A. D. Prasetyo and A. Munir, "Proximity Coupled Square Patch Array Antenna for L-Band Radar with Sequential Phase Feeding Network," *2021 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob)*, Bandung, Indonesia, 2021, pp. 159-162, doi: 10.1109/APWiMob51111.2021.9435226.
- [30] https://www.researchgate.net/figure/Antena-de-parche-Pasos-para-el-diseno-Calculo-del-ancho-del-parche-W_fig5_304336214
- [31] https://www.researchgate.net/figure/Figura-41-Alimentacion-de-la-antena-microstrip-a-linea-de-transmision-b-coaxial_fig16_33401857



- [32] S. A. Sanghai, M. Ignatenko and D. S. Filipovic, "Low-Profile Two-Arm Inverted-L Antenna Design for Vehicular HF Communications," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 11, pp. 5710-5719, Nov. 2017, doi: 10.1109/TAP.2017.2751669
- [33] Singh, Vivek, et al. "Inverted L-Notch loaded hexa band circular patch antenna for X, ku/K band applications." *Microwave and Optical Technology Letters* 60.8 (2018): 2081-2088
- [34] A. Zhao and F. Ai, "5G mm-Wave Antenna Array Based on T-Slot Antenna for Mobile Terminals," *2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, Auckland, New Zealand, 2018, pp. 476-477, doi: 10.1109/APCAP.2018.8538026.
- [35] Xu, Yanhui & Liu, Neng-Wu. (2020). Wideband microstrip-fed slot antenna with end-fire radiation under dual-resonant modes. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 30. 10.1002/mmce.22458.
- [36] Saleh, Sahar, et al. "Compact UWB Vivaldi tapered slot antenna." *Alexandria Engineering Journal* 61.6 (2022): 4977-4994
- [37] Perdana, M. Y., T. Hariyadi, and Y. Wahyu. "Design of Vivaldi microstrip antenna for ultra-wideband radar applications." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 180. No. 1. IOP Publishing, 2017.
- [38] <https://www.semanticscholar.org/paper/New-tapered-slot-Vivaldi-antenna-for-UWB-Kerarti-Marouf/2d4970e81a554bfd76598f6d3878943176a667a7>
- [39] <https://www.arastechnologies.com/2019/04/eei-alcances-de-massive-mimo-en-5g.html>
- [40] <https://bandaancha.eu/articulos/que-mimo-masivo-5g-como-identificar-10128>
- [41] <https://forum.huawei.com/enterprise/es/%C2%BFqu%C3%A9-es-la-tecnolog%C3%ADa-massive-mimo-conceptos-b%C3%A1sicos-inal%C3%A1mbrico/thread/745226330724777984-667212896691695616>
- [42] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016821006578>
- [43] <https://www.pcbway.es/HighQualityOrderOnline.aspx>
- [44] <https://www.digikey.es/es/product-highlight/a/analog-devices/adrf5040-single-pull-quad-throw-sp4t-radio-frequency-rf-switches>