



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 una agrupación logoperiódica de monopolos con  
comportamiento UWB.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

AUTOR/A: Martínez Ródenas, Domingo

Tutor/a: Cabedo Fabrés, Marta

Cotutor/a: Ferrando Bataller, Miguel

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

*Agradecimientos a mi tutor de empresa Gonzalo Cuélliga y a mis tutores de la Universidad Politécnica de Valencia, Marta Cabedo y Miguel Ferrando, por su inestimable ayuda y apoyo para la realización de este proyecto*

## Abstract

This document presents an alternative design of the traditional log-periodic dipole array antenna (LPDA). This project aims to implement an antenna in a military vehicle and its integration with other antennas, forming a complex system for electronic warfare purposes. This integration requires space limitations imposed by the vehicle's roof and a study of electromagnetic compatibility to avoid interference between antennas. Besides, this antenna must submit to an Ultra Wide Band behavior, working in a frequency range from 20 MHz to 200 MHz. The design must fulfill restrictions in gain and adaptation terms.

To meet these requirements, a conventional design of an LPDA is not possible due to its large dimensions and the use of dipoles. This project proposes reduced-size dimensions of the antenna and the use of monopoles. With this baseline, many modifications in the number of monopoles, forms, and sizes have been needed. In addition, all this modifications have been followed by an optimization process in order to achieve the minimum requirements of gain and adaptation. All this work provides a probe of the project's complexity, which has required months of development and simulations.

This project has been performed in CST Studio, an electromagnetic and multiphysics simulation software that allows modeling 3D antennas and their simulation in order to obtain their electromagnetic behavior such as gain, adaptation, or radiation patterns.

# Índice

<b>1. Introducción: Motivación y Objetivos</b>	<b>4</b>
<b>2. Conceptos Teóricos Antena LPDA</b>	<b>5</b>
<b>3. CST Studio</b>	<b>10</b>
<b>4. Propuesta de diseño</b>	<b>11</b>
<b>5. Desarrollo</b>	<b>14</b>
5.1. Primera iteración . . . . .	14
5.2. Transformación a monopolos . . . . .	17
5.3. Introducción segundo boom . . . . .	19
5.4. Aumento densidad monopolos . . . . .	21
5.5. Introducción stubs horizontales . . . . .	23
5.6. Agregación componente vertical a los stubs horizontales . . . . .	25
5.7. Mejora banda alta . . . . .	26
5.8. Diseño de un meandro . . . . .	27
<b>6. Diseños finales</b>	<b>29</b>
6.1. Versión final: introducción segundo meandro . . . . .	29
6.2. Implementación en el vehículo . . . . .	33
6.3. Compatibilidad electromagnética . . . . .	37
<b>7. Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>39</b>
<b>8. Referencias</b>	<b>43</b>

# 1. Introducción: Motivación y Objetivos

El inicio del uso del espectro radioeléctrico como medio para el envío de señales radio marcó el comienzo de la lucha por dicho recurso limitado. En el plano comercial, las principales compañías telefónicas puján en las subastas públicas por los canales de frecuencia necesarios para el despliegue de sus servicios.

Sin embargo, existe otro plano en el que el resultado de esta lucha, la lucha por el control de las comunicaciones se vuelve crucial: la guerra. La interceptación de las comunicaciones enemigas con el objetivo de su escucha o sabotaje supone una ventaja estratégica mucho mayor a la que puede otorgar cualquier arma de fuego. Este tipo de estrategias pueden ser utilizadas tanto para el ataque al enemigo como para la defensa de áreas y población.

De esta manera se define la Guerra Electrónica como todas aquellas acciones que supongan la interceptación, manipulación o supresión del uso del espectro radioeléctrico por el enemigo o la protección frente a dichas acciones ejecutadas por éste [1]. El objetivo principal de este trabajo será el diseño de un sistema dedicado a la defensa frente este tipo de ataques, pudiendo proteger así zonas vitales como hospitales o aeropuertos.

El primer caso documentado de guerra electrónica tuvo lugar al comienzo del siglo XX, más concretamente en enero de 1904 durante la guerra Ruso-Japonesa. El crucero japonés HMS Diana interceptó las comunicaciones rusas, permitiendo conocer así las movilizaciones de la flota rusa, lo que jugó un papel crucial en la victoria del ejército japonés [2].

Estas técnicas de Guerra Electrónica se han desarrollado a lo largo de los años posteriores debido al surgimiento de grandes conflictos como la segunda Guerra Mundial, la Guerra Fría, conflictos en territorio asiático... o el surgimiento de tecnologías como el radar o los drones.

Según los últimos datos [3], el gasto en defensa a nivel mundial ha supuesto más de 2,000 billones de dólares. De esa cantidad, 22.5 billones están destinados a la Guerra Electrónica. Además, se estima un crecimiento del sector en un 5% en los próximos 5 años [4].

En España, el gobierno ha aprobado este año una cuantía de 17 millones de euros destinados a la Guerra Electrónica para el 2023 [5]. Algunas de las empresas más importantes dedicadas a este sector en España son:

- DAS Photonics, gracias a la cuál este trabajo final de máster ha podido llevarse a cabo. Esta empresa dirigida por Javier Martí nace en 2005 como la primera spin-off de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Indra: fundada en 1992 como consultora, se trata de una de las empresas con mayor peso en el sector de defensa del continente, participando en proyectos de gran envergadura como el proyecto de defensa europeo FCAS [6].

Por último, las condiciones geopolíticas actuales han puesto de manifiesto la necesidad del desarrollo de tecnología en el ámbito de la defensa. En estos últimos años las intervenciones bélicas han destacado por el uso de drones de combate, sistemas electrónicos que requieren del uso del espectro electromagnético para su control y comunicación [7]. Por lo tanto, una defensa pacífica mediante la inutilización de estos dispositivos gracias al control de dicho espectro es esencial. Estos drones, equipados con tecnología para evitar este tipo de ataques a sus comunicaciones, utilizan técnicas de salto de frecuencia (frequency hopping) en banda ancha. Esto requiere del uso de antenas que permitan un gran ancho de banda y sean capaces de emitir gran potencia para poder interceptarlas.

Bajo este contexto de necesidad del desarrollo de la tecnología para la defensa, se plantea el presente trabajo en el que se diseña una antena basada en una agrupación logoperiódica de monopolos para su implementación en un sistema creado para la inutilización de sistemas peligrosos y la protección de zonas vitales.

## 2. Conceptos Teóricos Antena LPDA

El diseño de partida escogido para la realización de este trabajo ha sido la antena logoperódica. Esto se debe al gran ancho de banda que estas antenas son capaces de alcanzar y su buen funcionamiento en la banda VHF. Por lo tanto, es necesaria una introducción de los principales conceptos en los que se basa el diseño de las antenas logoperiódicas.

Este tipo de antenas son capaces de alcanzar un gran ancho de banda debido que se tratan de antenas independientes de la frecuencia. La mayoría de antenas basan su funcionamiento en términos de  $\lambda$ , por lo que una variación de las dimensiones provoca un desplazamiento en frecuencia. Sin embargo, las antenas independientes de la frecuencia son aquellas cuya geometría puede ser descrita únicamente en función de ángulos [8]. Por lo tanto, un escalado de las dimensiones no provocaría dicha modificación de la frecuencia. Para alcanzar esta independencia de la frecuencia, sería necesario que la antena fuera infinita. Esto se puede simular en la práctica provocando una disminución en la corriente debido a pérdidas de radiación, lo que da lugar a que en el extremo opuesto de alimentación las corrientes sean casi cero. Sin embargo, esta simulación de línea no es perfecta, ya que la alimentación de la antena acaba fijando la frecuencia máxima de trabajo (al aumentar la frecuencia el tamaño de la alimentación será comparable a  $\lambda$  y dejará de ser despreciable) y la dimensión de la antena, la frecuencia mínima (ya que  $\lambda$  se aproximará al tamaño de la antena). Debido a esto no se consigue la independencia total de la frecuencia, pero sí un ancho de banda considerable.

Otra característica relacionada con las antenas logoperiódicas es el concepto de antena autoescalable. Esto quiere decir que si se realiza un escalado de las dimensiones de la antena, la geometría de esta sigue siendo la misma, excepto por una pequeña rotación [8]. Esto se puede describir de forma matemática, siendo  $k$  una constante y expresado de forma polar:

$$kF(\phi) = F(\phi + \Delta\phi_0)$$

Continuando con el concepto de antenas independientes de la frecuencia se presenta la siguiente estructura:

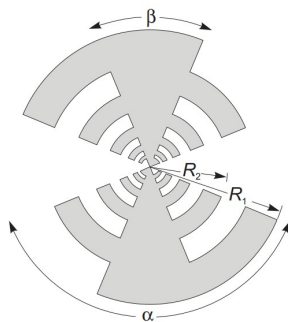


Figura 1: Estructura con discontinuidades. Imagen de Cardama Áznar, A., Jofre Roca, L., Rius Casals, J.M., Romeu Robert, J., Blanch Boris, S., Ferrando Bataller, M., Antenas, UPC, 2002

Como se ha comentado, para la simulación de una línea infinita es necesario la introducción de elementos radiantes que provoquen el decaimiento de la corriente, objetivo que se consigue con la introducción de las discontinuidades mostradas en la figura. Sin embargo, esta antena no es autoescalable. Para ello, es necesario que los radios de las discontinuidades tengan una relación constante denominada  $\tau$  [8] que cumpla:

$$\tau = \frac{R_{n+1}}{R_n} < 1$$

$$k = t^m; \quad m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$$

$$f_m = t^m f_0$$

Aplicando logaritmos a esta última expresión:

$$\log f_m = m \log \tau + \log f_0$$

De esta relación proviene el término antena logarítmica, ya que en la representación de cualquier parámetro de la antena en función del logaritmo de la frecuencia, el comportamiento es periódico con periodo  $\log \tau$ .

Existen varias configuraciones de antenas logoperiódicas. Algunos ejemplos se muestran en la Figura 2:

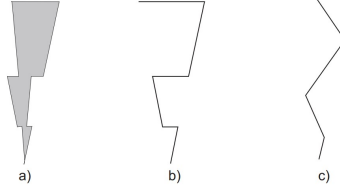


Figura 2: Ejemplo de configuraciones de la antena logoperiódica. Imagen de Cardama Áznar, A., Jofre Roca, L., Rius Casals, J.M., Romeu Robert, J., Blanch Boris, S., Ferrando Bataller, M., Antenas, UPC, 2002

La más extendida es la agrupación logoperiódica de dipolos ('Log Periodic Dipole Array' o 'LPDA' en inglés), la cual es la base de nuestro diseño. En dicha clasificación, las discontinuidades radiantes son implementadas mediante dipolos. Por lo tanto, tenemos una agrupación de dipolos, cuyas dimensiones se escalan mediante el factor  $\tau$ . La frecuencia mínima de trabajo vendrá determinada por el dipolo de mayor longitud, mientras que la frecuencia máxima estará establecida por el dipolo de menor longitud. Los diferentes dipolos de la agrupación radiarán a su frecuencia de resonancia, mientras que los dipolos de mayor longitud actuarán como reflectores y los de menor longitud como directores, por lo que el máximo del diagrama de radiación se encontrará en el vértice de esta [8]. Al usar dipolos como elemento radiante, la polarización será lineal.

Para el diseño de estas antenas, los parámetros de diseño son las longitudes de onda superior  $\lambda_{sup}$  e inferior  $\lambda_{inf}$  y  $\tau$ :

$$\begin{aligned} L_{min} &= k_1 \lambda_{sup} \\ L_{max} &= k_2 \lambda_{inf} \\ \frac{L_{max}}{L_{min}} &= \frac{k_2 \lambda_{inf}}{k_1 \lambda_{sup}} = \tau^{-(N-1)} = k \frac{f_{sup}}{f_{inf}} = kB \end{aligned}$$

Donde  $B$  es el ancho de banda relativo de la agrupación;  $\alpha$  el ángulo de apertura de la antena;  $N$  es el número de elementos y  $k$  una constante asociada a la zona activa (zona radiante) de la antena, que pueden calcularse de la siguiente forma:

$$N = -\frac{\log(kB)}{\log(\tau)} + 1$$

$$k \approx 1,1 + 7,7(1 - \tau)^2 \cot \alpha$$

Junto a  $\tau$ , el otro parámetro de diseño importante de este tipo de antenas es el espaciado relativo  $\sigma$ , definido como:

$$\sigma = \frac{d_n}{2L_n} = \frac{1 - \tau}{4 \tan \alpha}$$

Ambos parámetros,  $\tau$  y  $\sigma$  determinan la directividad de la antena LPDA. Según la directividad deseada, se pueden fijar  $\sigma$  y  $\tau$  según la Figura 3:

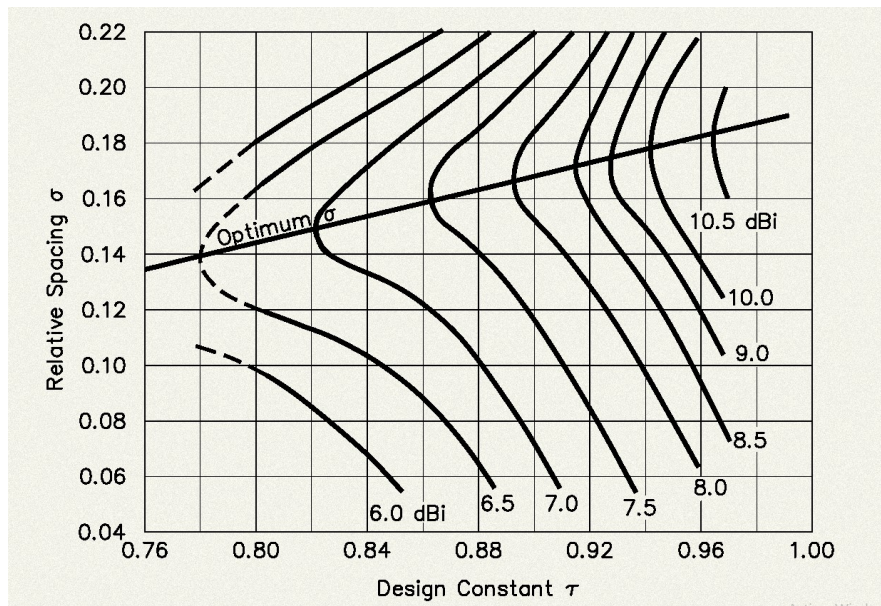


Figura 3: Directividad de una antena LPDA en función de  $\tau$  y  $\sigma$ . Imagen de HAMWAVES, publicada en R. Carrel, The design of log-periodic dipole antennas, IRE Int. Conv. Rec., 1961 IEEE

Finalmente, la longitud máxima de la antena será:

$$L = \frac{1}{2tg\alpha}(L_{max} - L_{min})$$

Es necesario que la alimentación de la antena sea balanceada, es decir, tiene que haber un desfase de  $\pi$  en la alimentación entre dipolos. Para ello, la forma más habitual de alimentar la LPDA es mediante un cable coaxial en el extremo donde se encuentran los dipolos de mayor frecuencia. Al recorrer la línea, se va produciendo este desfase de las corrientes produciendo el balanceo deseado.

La estructura de una LPDA se compone de dos tiras metálicas alargadas dispuestas de forma paralela a la que se adhieren de forma perpendicular los distintos dipolos. Entre el dipolo de mayor longitud y el extremo contiguo de la antena continua una zona del boom que denominaremos en este trabajo 'stub trasero', utilizado para regular la impedancia de la antena aumentando o disminuyendo su longitud. En este trabajo esta parte no asumirá un rol relevante ya que será suprimida para conseguir reducir la longitud de la antena.

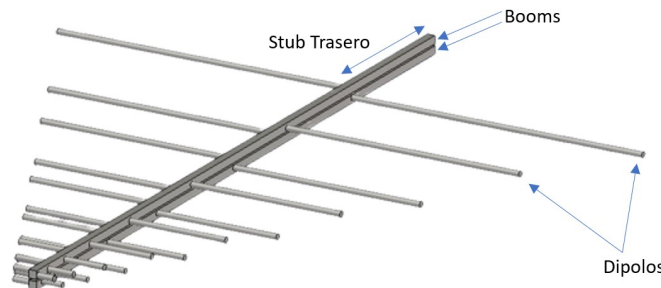


Figura 4: Estructura antena LPDA



Aunque este diseño es el estandarizado, en la bibliografía disponemos de numerosas variaciones. Por ejemplo, en [9] encontramos la antena "batwing", cuyo nombre proviene de la semejanza de su forma con las alas de murciélago. Esta antena, diseñada para la recepción de señales de televisión en furgones, utiliza únicamente un lateral de la LPDA convencional y une el extremo de los dipolos. Además, dobla los dipolos para mantener la longitud efectiva reduciendo las dimensiones.

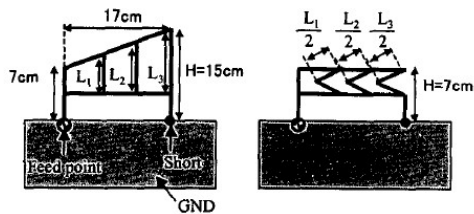


Figura 5: Antena Batwing. Imagen de Matsuzawa, S., Sato, K., Nishikawa K., Radiation Characteristics of On-Glass Mobile Antennas for Digital Terrestrial Television

Otro diseño [10], el cuál ha servido de inspiración para este trabajo, rompe con la logoperiodicidad para realizar un espaciado en longitud y altura uniforme, además de sustituir los dipolos característicos por monopolos encabezados por un "sombbrero" que aumentan su longitud. Aunque esta antena ha sido diseñada para el rango de 2 GHz - 6 GHz, para el presente trabajo se han reutilizado los conceptos de espaciado uniforme, uso de monopolos y el aumento de la longitud de los monopolos en ciertas ocasiones para mejorar las prestaciones de la antena. En la siguiente figura se muestra una imagen de este diseño:

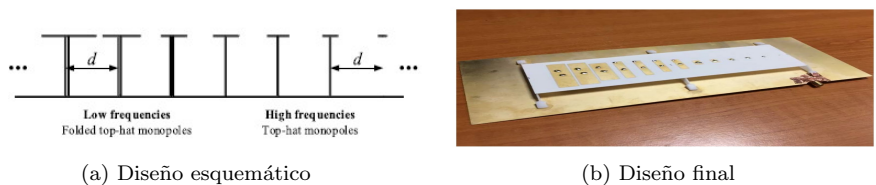


Figura 6: LPMA con espaciado uniforme. Imagen de Qinghua, S., Shen, Z., Lu, J., Log-Periodic Monopole Array With Uniform Spacing and Uniform Height, IEEE Transactions on Antennas and propagation, Vol. 66, No. 9, September 2018

En [11], el objetivo de reducir el tamaño de la antena lleva al uso de dipolos trapezoidales:

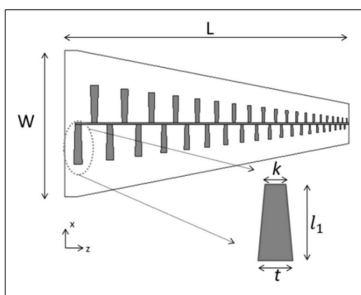


Figura 7: Antena con dipolos trapezoidales. Imagen de Zengin, F., The Effects of the Trapezoidal Dipole Array Elements on Planar Log Periodic Antenna, IEEE

Por último, el diseño propuesto por [12] basado en la implementación de stubs horizontales a la antena LPDA. De esta forma, mediante la introducción de líneas de transmisión extra, se obtiene una mejor eficiencia en la radiación en las zonas bajas de la banda. Esta mejora es utilizada en el diseño como se podrá ver más adelante.

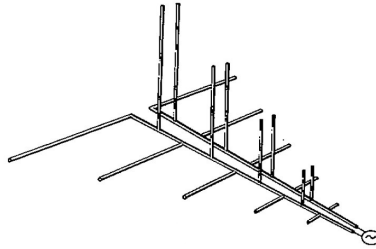


Figura 8: Antena con dipolos horizontales. Imagen de Berry, D.G., Ore, F.R., Log Periodic Monopole Array, IEEE

### 3. CST Studio

Para poder realizar el modelado y las simulaciones necesarias para conocer las características de la antena se ha hecho uso de un software de análisis de EM conocido como CST Studio Suite. Este software es utilizado por muchas empresas de tecnología e ingeniería debido a que permite diseñar, analizar y optimizar cualquier tipo de componente y sistema electromagnético.

Este software dispone de distintos tipos de solvers de campo electromagnético, los cuales se pueden acoplar dentro de una misma simulación, dando lugar a análisis híbridos permitiendo obtener información de sistemas completos de una forma mucho más eficiente. Estos solvers utilizan métodos para simulaciones de alta frecuencia tales como el método de elementos finitos (Finite Element Method FEM), la técnica de integración finita (Finite Integration Technique FIT) o el método de la matriz de línea de transmisión (Transmission Line Matrix Method TLM).

Entre los objetos más comunes del análisis se incluyen el rendimiento y la eficiencia de antenas y filtros; la compatibilidad electromagnética y las interferencias (EMC/EMI); la exposición del cuerpo humano a campos de EM; los efectos electromecánicos en motores y generadores y los efectos térmicos en dispositivos de alta potencia. Debido a que este proyecto se centra en el diseño y análisis de una antena, junto con el estudio de la compatibilidad electromagnética e interferencias en un sistema formado por otras antenas y un coche, CST Studio es una de las mejores opciones a escoger para la realización de este trabajo.

El diseño de la antena mediante el software CST Studio se ha realizado de la siguiente manera:

- La antena ha sido diseñada con un material conductor perfecto (PEC), a excepción de la separación con el plano metálico, donde se ha hecho uso de teflón (PTFE).
- El puerto se ha modelado mediante un 'Discrete Face Port' de impedancia  $50 \Omega$  para el estudio de los parámetros  $S$ .
- Se ha utilizado un solver en el dominio del tiempo (Time Domain Solver), que permite obtener información del comportamiento de la antena en los puntos de frecuencia deseados.
- El mallado utilizado ha sido el óptimo en todo momento: este era reducido en las ocasiones en las que se realizaban simulaciones de barrido de valores de un parámetro con el objetivo de optimizar, minimizando el tiempo de simulación, y se aumentaba todo lo posible cuando se alcanzaba un modelo nuevo para estudiar de la forma más exacta posible su comportamiento.
- De todos los resultados proporcionados por CST, aquellos de los que se han hecho uso y han servido como criterio a seguir han sido:
  - Ganancia máxima.
  - Adaptación (parámetro  $S_{11}$ ).
  - Diagramas de radiación.
  - Corrientes superficiales.

Aunque CST Studio permite la optimización automática de estos parámetros, por falta de tiempo y capacidad de procesado se prefirió realizar las optimizaciones de forma "manual". Esto suponía analizar los puntos a mejorar mediante los diagramas de corriente y radiación producidos en la antena y un barrido de valores en un rango preestablecido. Esto se explicará de forma detallada más adelante.

## 4. Propuesta de diseño

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el diseño está basado en una agrupación logoperiódica de dipolos, conocida como LPDA, debido a su buen funcionamiento en las bandas VHF y su capacidad para altas potencias. El desafío planteado en este proyecto es la integración en un vehículo de dimensiones fijas con unos requisitos mínimos en su comportamiento electromagnético.

Las restricciones de espacio establecidas por este vehículo son 2.8 metros de ancho y 5.0 metros de largo. No hay limitaciones en altura. Tampoco se plantean restricciones de peso ni material. Por temas de confidencialidad, no se puede mostrar el vehículo en que se realizará la implementación de la antena. En su lugar, se visualiza en las siguientes figuras una estructura similar diseñada en CST Studio y que fue utilizada para realizar las simulaciones:

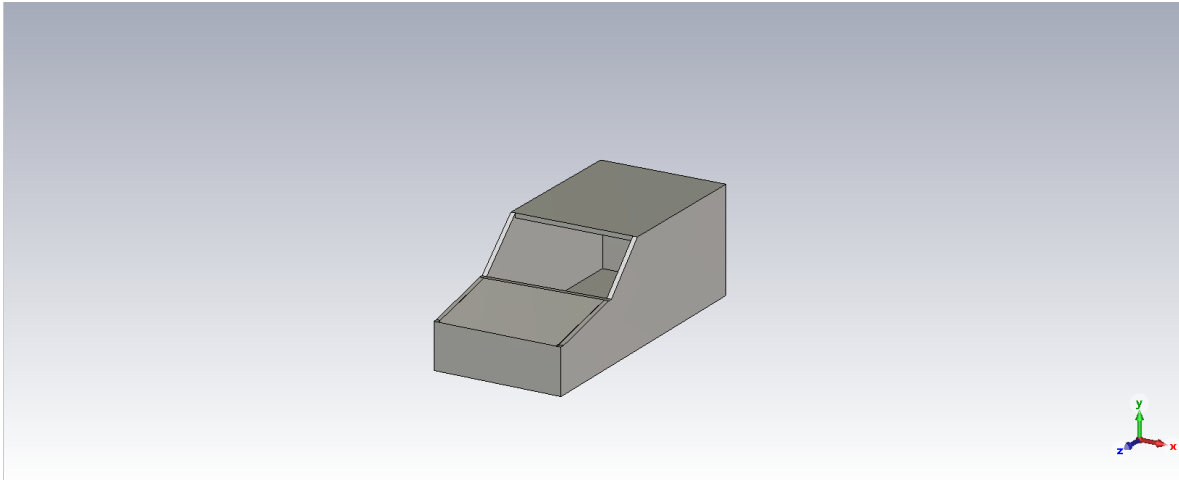


Figura 9: Vehículo usado para la implementación de la antena

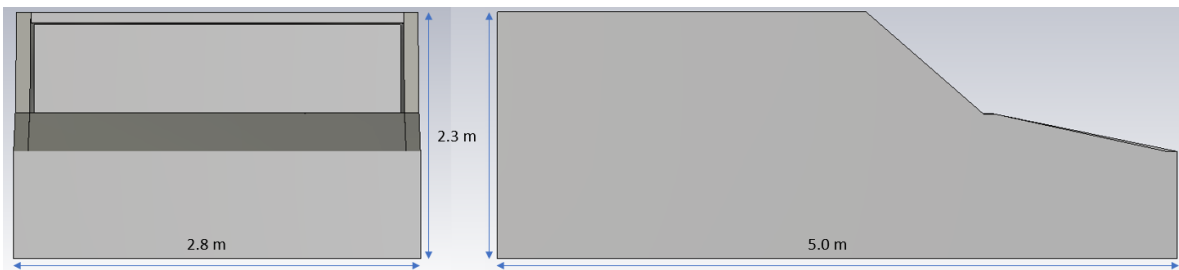


Figura 10: Dimensiones del vehículo

Dimensión	Longitud [m]
Largo	5.0
Ancho	2.8
Alto	Sin restricción

Tabla 1: Restricciones de dimensionamiento

En cuanto a su comportamiento electromagnético, la banda de trabajo se establece desde los 20 MHz hasta los 200 MHz. Debe presentar una adaptación por debajo de los -5 dB en el  $S_{11}$  en casi la totalidad de la banda, situándose por debajo de los -10 dB en la zona media - alta de la banda. En cuanto a la ganancia, debe tener un comportamiento creciente, cumpliendo unos mínimos de ganancia acordes a la siguiente tabla:

Frecuencia [MHz]	Ganancia Mín. [dB]
$f \geq 20$	2
$f \geq 40$	3
$f \geq 80$	5
$f \geq 120$	6

Tabla 2: Restricciones de ganancia

Estos niveles de ganancia se especifican para el ángulo  $\theta$ , acorde al sistema de referencia mostrado en la Figura 11. Esto se debe a que, como veremos más adelante, CST Studio muestra por defecto una ganancia total que es resultado de la suma de la ganancia en la componente  $\theta$  y en la componente  $\phi$ . El ángulo  $\theta$  estará relacionado con la componente vertical del campo y el ángulo  $\phi$  con la componente horizontal. Esto no será un problema en las primeras iteraciones, ya que únicamente se radiará de forma vertical. Sin embargo, como más adelante se mostrará, introduciremos una componente horizontal, por lo que es importante realizar esta distinción.

Además, la ganancia mostrada es la máxima para cada frecuencia, independientemente del apuntamiento. Por lo tanto, en los diseños finales habrá que realizar un estudio de los diagramas de radiación para asegurarnos de que este máximo se encuentre dentro de los márgenes permitidos. La ganancia representada será la ganancia recorriendo  $\theta$  con  $\phi = 0$ . Es decir, el plano de trabajo será el plano YZ.

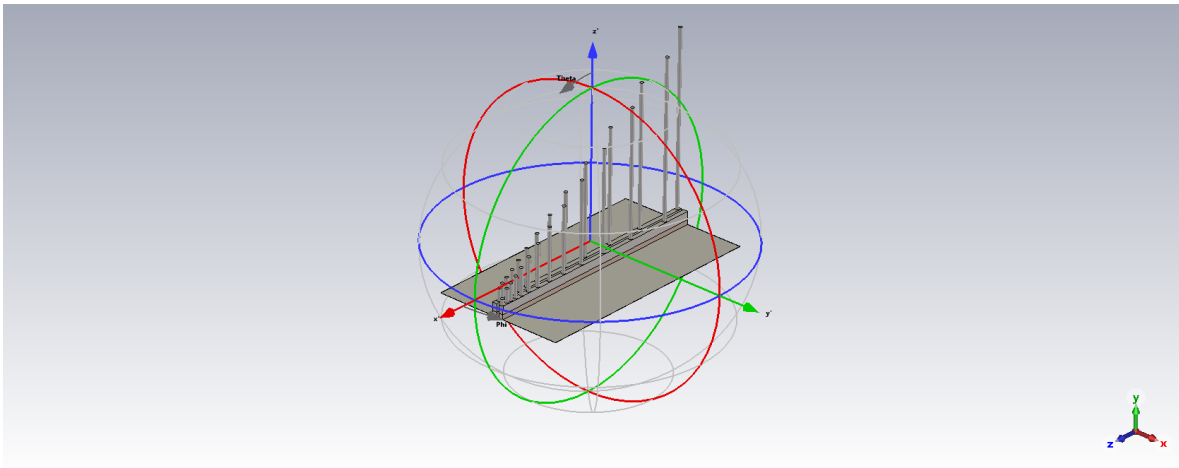


Figura 11: Ejes de referencia

Para llevar a cabo este desafío, se realizarán distintas modificaciones destinadas a conseguir estos objetivos. Partiendo de un diseño convencional de una LPDA, primero se realizará su adaptación para poder ajustar la antena al techo de un vehículo. Debido a los requisitos de implementación y dimensionamiento, se propondrán distintas alternativas que mejorarán las características. Estos diseños propuestos provendrán de un análisis de los campos y corrientes de las simulaciones anteriores. Se irán ajustando parámetros y realizando modificaciones en la forma hasta conseguir cumplir las especificaciones de ganancia y adaptación impuestas. En el diagrama de flujo mostrado en la Figura 12 se representa la metodología seguida para la realización de este trabajo:

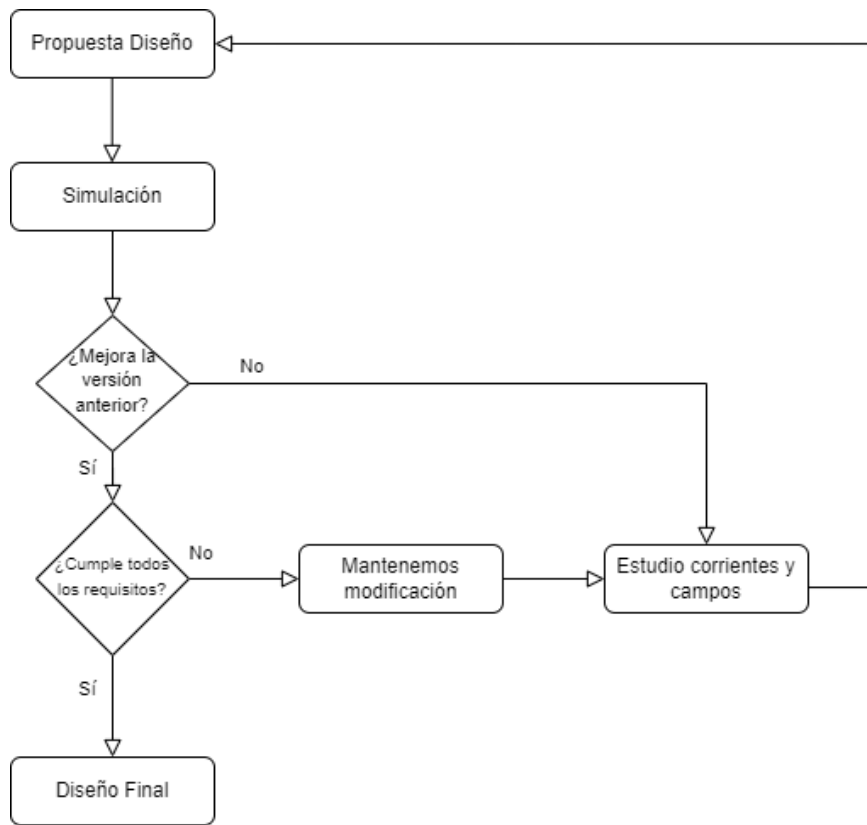


Figura 12: Proceso de diseño

## 5. Desarrollo

### 5.1. Primera iteración

Una vez establecidos los parámetros de diseño, se puede comenzar a modelar la antena. Un primer paso es el cálculo de longitudes necesarias. El cálculo más sencillo en este caso es la frecuencia de resonancia del primer dipolo, aquél que resonará a 20 MHz. Para dicha frecuencia, la longitud de resonancia  $\lambda/2 = 7,5 \text{ m}$ .

A continuación, se calculó la longitud del boom de la LPDA. En esta primera iteración se utilizaron valores óptimos de  $\sigma$ . Para un  $\tau = 0,8$ , el correspondiente spacing factor es  $\sigma = 0,143$ .

Para el cálculo teórico, se hizo uso de una herramienta online [13] que permite resultados rápidos de las longitudes de la antena introduciendo unos pocos parámetros de entrada. Se pone a disposición del lector en el caso de que quiera reproducir los cálculos. En este primer planteamiento, las variables y valores introducidos se muestran en la Tabla 3, y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4:

Parámetro	Valor
Frecuencia Mínima	20 MHz
Frecuencia Máxima	200 MHz
Diámetro dipolos	37 mm
Impedancia de entrada	50 $\Omega$
$\tau$	0.8
$\sigma$	0.143

Tabla 3: Parámetros de entrada

Parámetro	Valor
Número de dipolos	15
Longitud del Boom	10.246 m
Stub trasero	1.874 m
Longitud primer dipolo	7.495 m
Longitud último dipolo	0.330 m
$\tau$	0.8
$\sigma$	0.143

Tabla 4: Parámetros de salida

Como se puede observar, esta configuración es inviable, ya que la longitud total (la suma de la sección del stub trasero más el boom) es igual a  $L = 12,12 \text{ m}$ . Por lo tanto, se modificó  $\sigma$ , reduciendo su valor hasta conseguir 5 m de longitud.

El valor del spacing factor que permite fijar la longitud del boom es  $\sigma = 0,072$ . Advertir que en este caso no se ha tenido en cuenta la sección del stub trasero, puesto que habría que infradimensionar  $\sigma$ , por lo que se planteó desde un principio que en futuras iteraciones sería posible eliminar esta sección. Además, se redujo el número de dipolos de 15 a 13. Una vez conseguido los 5 m de largo, el siguiente paso es el modelado y simulación en CST Studio. Los resultados se muestran en las Figuras 13, 14 y 15.

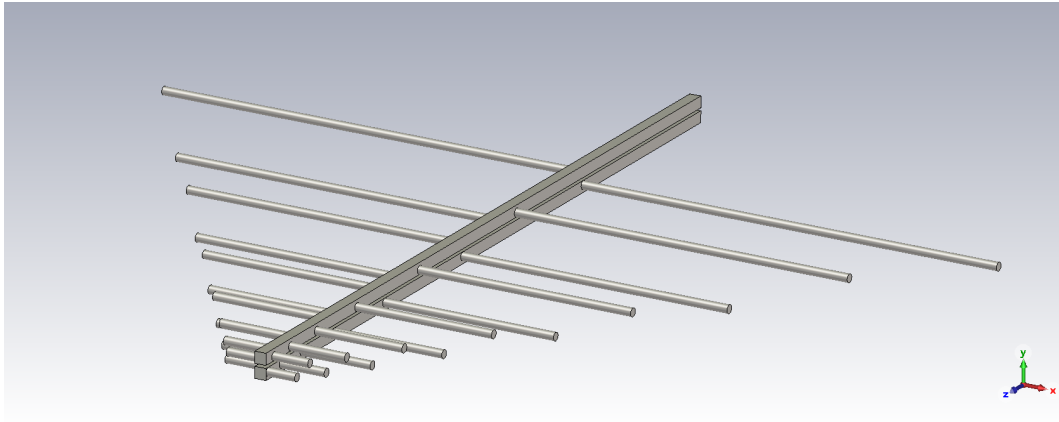


Figura 13: Modelado LPDA convencional de 5 m

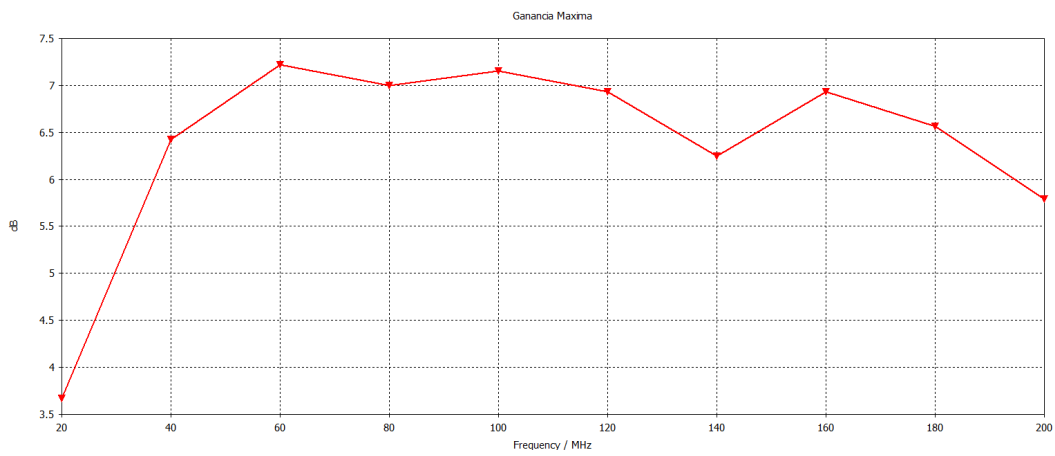


Figura 14: Ganancia LPDA convencional de 5 m

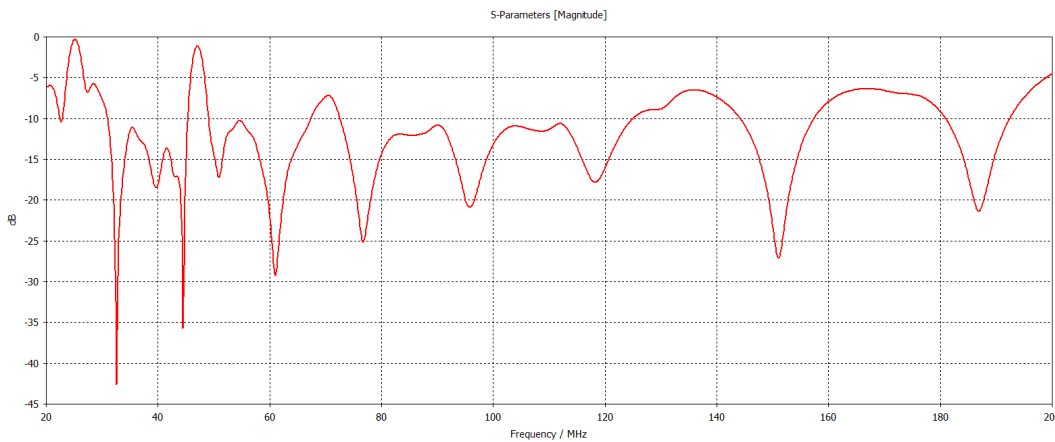


Figura 15: Adaptación LPDA convencional de 5 m

Como se puede ver, aun reduciendo en gran medida  $\sigma$ , podemos cumplir con soltura los requisitos en cuanto a ganancia y adaptación.

Como se ha comentado previamente en teoría, la alimentación se realiza a través del extremo de la antena, donde se sitúan los dipolos de mayor frecuencia. Este puerto se modela en CST mediante un puerto discreto de impedancia  $50 \Omega$ , como se puede observar en la siguiente figura:



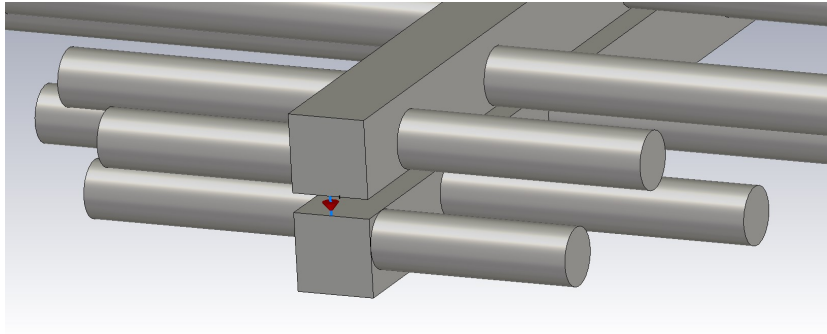


Figura 16: Alimentación puerto discreto de la LPDA convecional

## 5.2. Transformación a monopolos

Una vez realizado este estudio en el que se muestra la viabilidad del proyecto, se continuó con la transición de dipolos a monopolos. El uso de monopolos se debe a la necesidad de que la antena se encuentre en el techo del vehículo, siendo esta disposición la más sencilla en cuanto a fabricación e implementación. El primer modelo realizado en CST Studio se muestra en la siguiente figura:

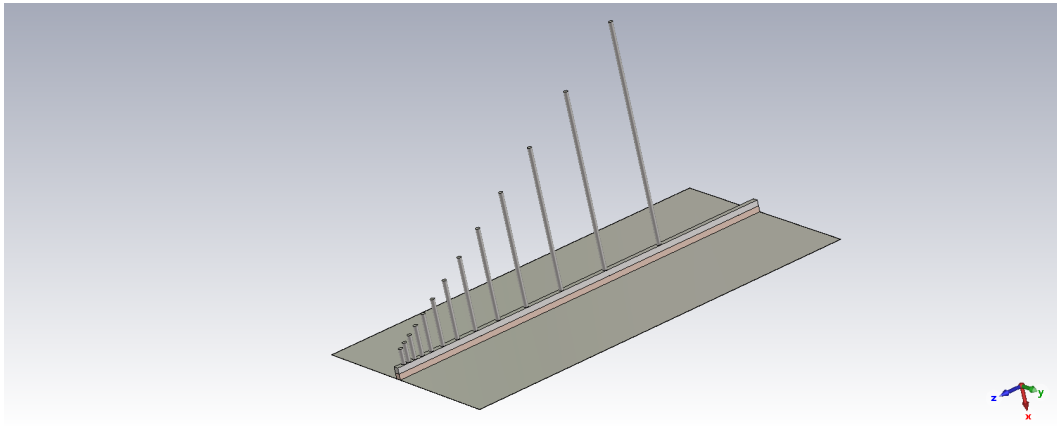


Figura 17: Modelado primera versión con monopolos

Como se observa en la imagen, para simular el techo del vehículo se usa un plano metálico. Los monopolos no están incrustados directamente sobre el plano de masa. Esto se debe a que, para alimentar la antena, se mantuvo uno de los booms y se separó del plano metálico por teflón. Esta alimentación se puede apreciar con mayor detalle en la Figura 18.

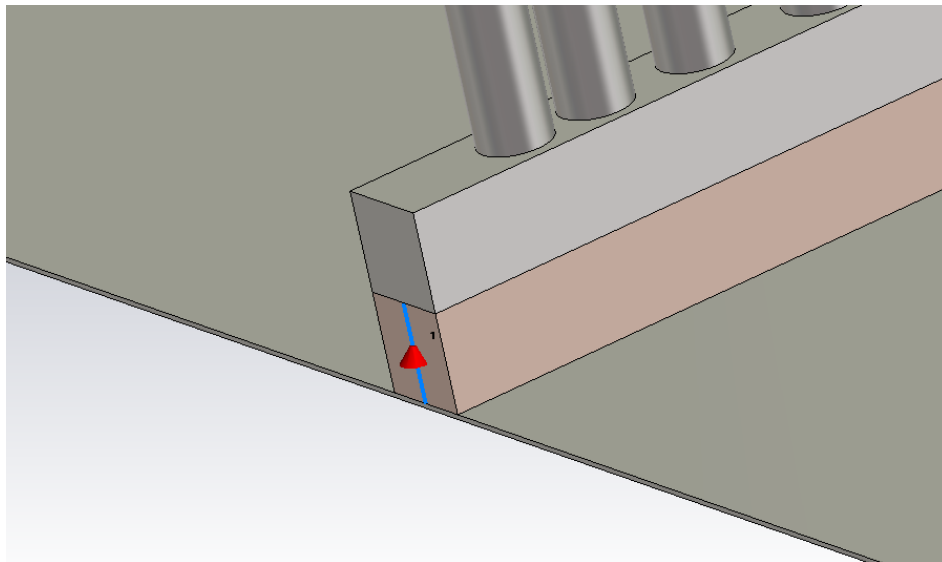


Figura 18: Alimentación de la antena

Dicha alimentación se realiza mediante el uso de un puerto discreto que conecta el plano metálico con el boom, en la zona de los monopolos de mayor frecuencia.

En cuanto a los requisitos de ganancia y adaptación, esta modificación reduce drásticamente dichas características, quedando muy por debajo de las necesidades impuestas. Esto se muestra en las figuras 19 y 20. Por lo tanto, partiendo de este diseño se realizaron las correcciones necesarias para poder llegar a los requisitos mínimos.

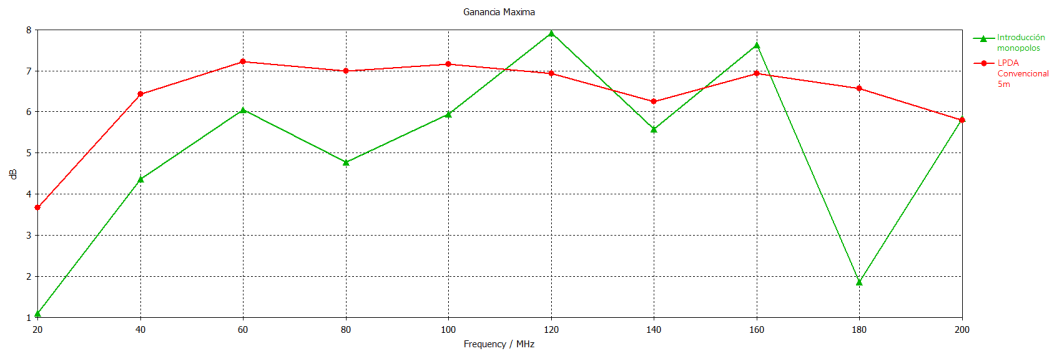


Figura 19: Ganancia primera versión con monopolos

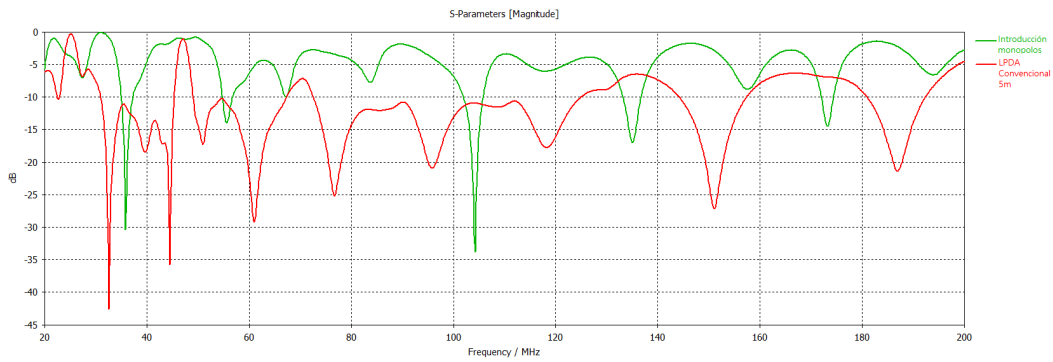


Figura 20: Adaptación primera versión con monopolos

### 5.3. Introducción segundo boom

La primera mejora introducida consistió en una implementación de la alimentación más correcta. Para ello, se introdujo el segundo boom eliminado anteriormente, colocándolo en la misma superficie del plano metálico que el primer boom. La separación entre ambos booms sería posteriormente un parámetro de optimización. De la forma descrita, el puerto no tiene que estar conectado al plano metálico, sino que une ambos booms, permitiendo alimentar uno de ellos a través de un coaxial. Además, aprovechando la introducción del segundo boom se insertaron el resto de monopolos eliminados, simulando una antena LPDA plegada sobre un plano de masa.

Este modelo y su alimentación se visualizan en las Figuras 21 y 22, y sus resultados en las Figuras 23 y 24.

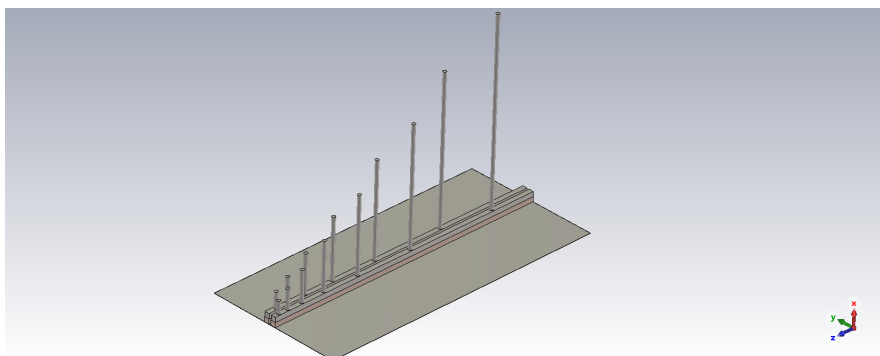


Figura 21: Modelado antena con doble boom

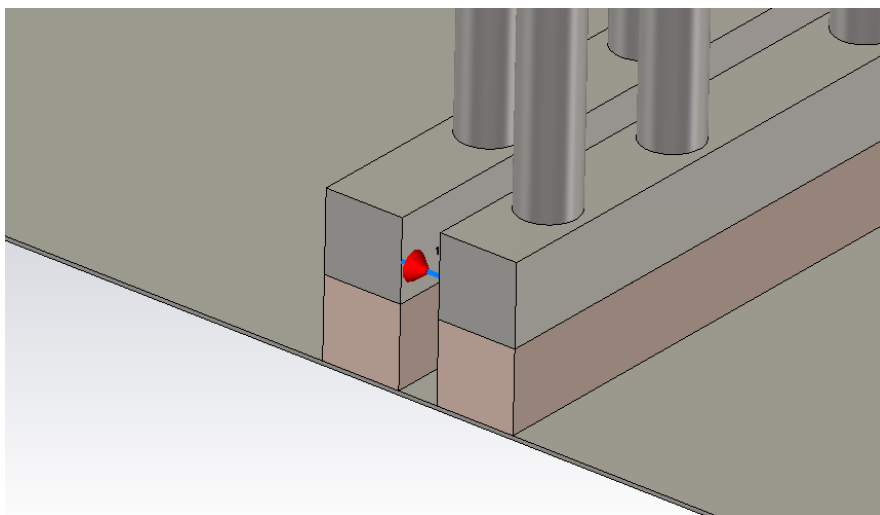


Figura 22: Alimentación antena con doble boom

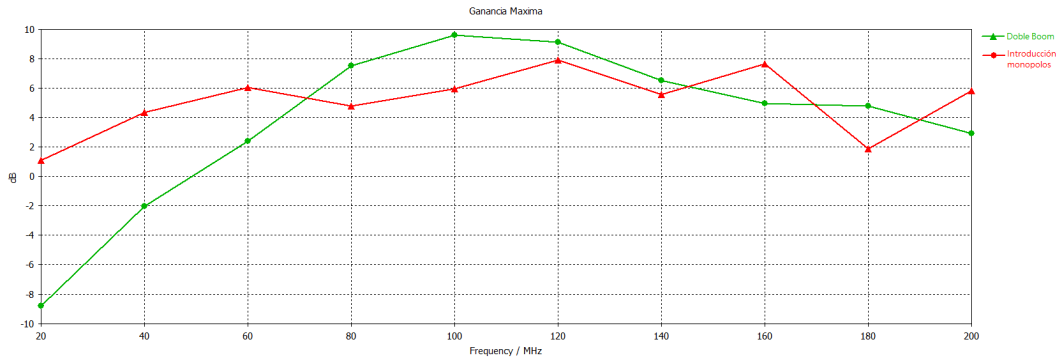


Figura 23: Ganancia antenna con doble boom

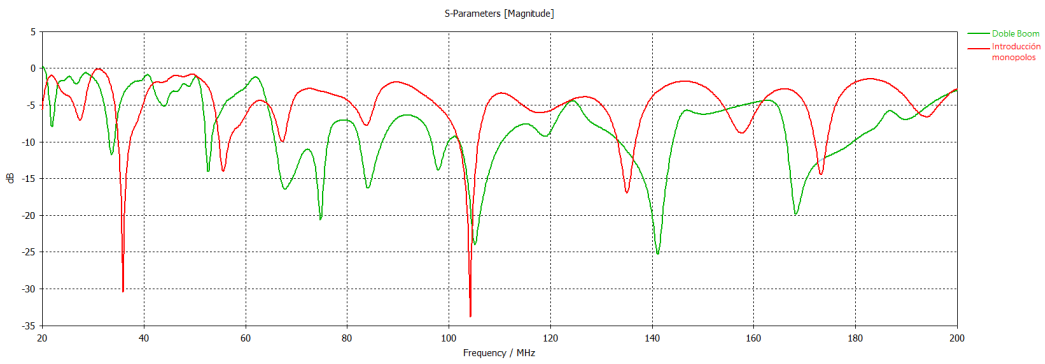


Figura 24: Adaptación antenna con doble boom

A pesar de que se consigue cierta mejora en la banda intermedia en cuanto a ganancia, se pierde demasiada adaptación y ganancia en la parte más baja. Aun así, se consideró que la alimentación de este modelo era la adecuada y partir de este se podrían corregir los problemas surgidos.

## 5.4. Aumento densidad monopolos

En esta ocasión se decidió aumentar el número de monopolos, insertando monopolos intermedios entre los anteriores. La relación de posiciones y longitudes de estos nuevos monopolos con respecto a los originales no sigue exactamente una relación logoperiódica, ya que más tarde se realizaría una optimización de estos parámetros. Además, de forma simultánea se llevó a cabo un estudio para saber si la eliminación de la sección trasera del boom afectaba notablemente a los resultados. Como la diferencia era mínima, se prescindió de ella, cumpliendo de esta forma definitivamente con el requisito de longitud.

Los resultados y modelados se muestran en las siguientes imágenes:

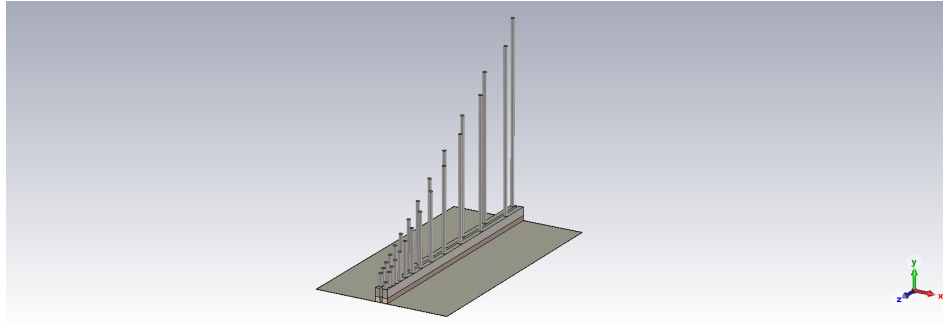


Figura 25: Modelado antenna con mayor número de monopolos

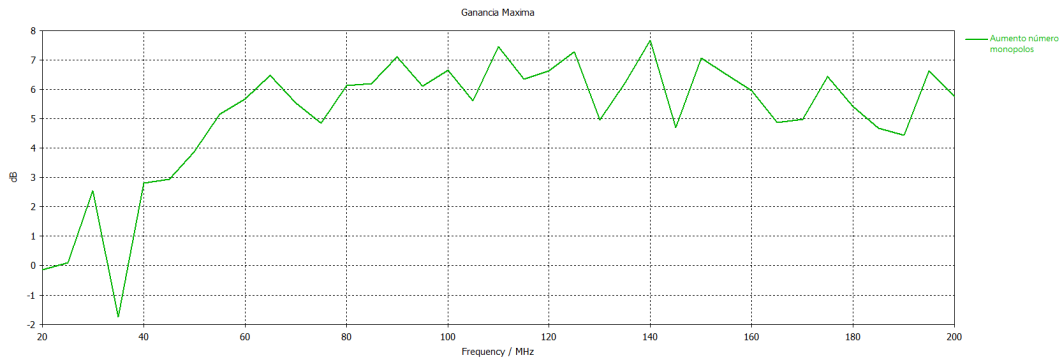


Figura 26: Ganancia antenna con mayor número de monopolos

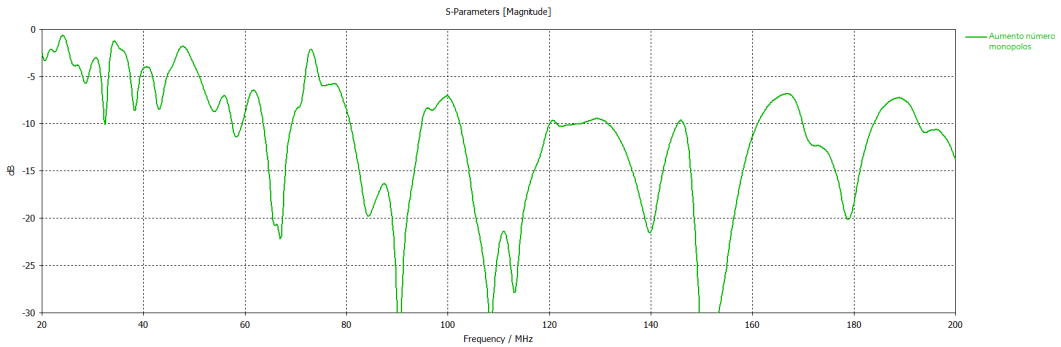


Figura 27: Adaptación antenna con mayor número de monopolos

Con esto, se consiguió mejorar la ganancia en la banda media y alta. Sin embargo, se perjudica aún más la banda baja en algunos puntos. Aclarar que en esta ocasión se realizó un aumento del mallado y del número de puntos para una mayor precisión en la simulación, lo que provoca el rizado que se aprecia en esta ocasión.

## 5.5. Introducción stubs horizontales

En este punto, la principal problemática es la banda baja, más concretamente el rango de frecuencias de 20 MHz a 40 MHz. Con el fin de mejorar dicho rango de frecuencias, se planteó el uso de stubs horizontales, usando como base el estudio realizado en [12]. Estos stubs estarían modelados como monopolos perpendiculares a los ya implementados, en la misma posición y con la misma longitud que estos, conectados al boom de forma horizontal. El modelo se puede ver en la siguiente figura:

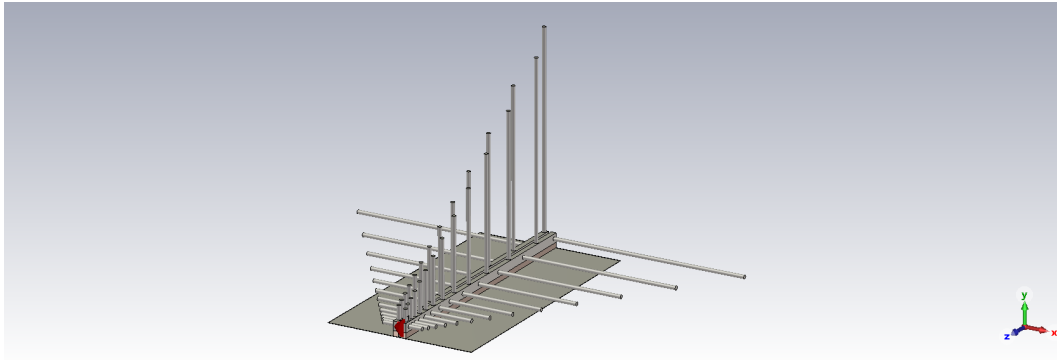
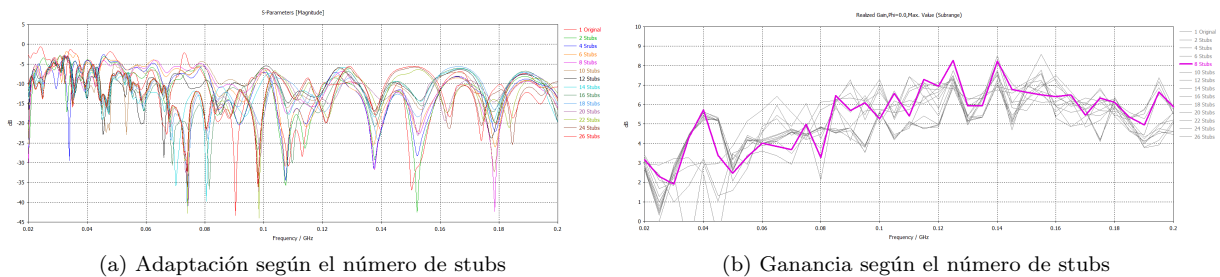


Figura 28: Modelado con stubs horizontales

Como se puede observar, en este primer modelado se incluyeron todos los stubs. Sin embargo, se realizó un estudio para conocer cuál sería la distribución de stubs óptima: eliminando los stubs delanteros, traseros, alternos... En las siguientes figuras se puede ver un ejemplo de comparativa de las características de la antena según el número de stubs, incluyéndolos desde los monopolos de frecuencia más baja hasta los de más alta:



(a) Adaptación según el número de stubs

(b) Ganancia según el número de stubs

Figura 29: Características antena en función del número de stubs

Con esta comparativa se concluyó que el mejor número de monopolos que se podían utilizar eran 8, ya que era aquel que presentaba mejor comportamiento en la banda deseada. El modelado y los resultados obtenidos se visualizan en las siguientes figuras:

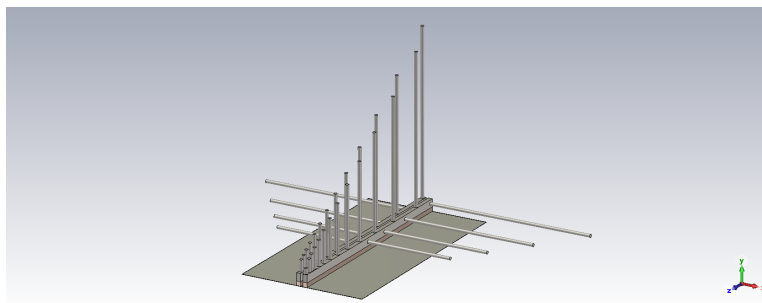


Figura 30: Modelado antena con 8 stubs



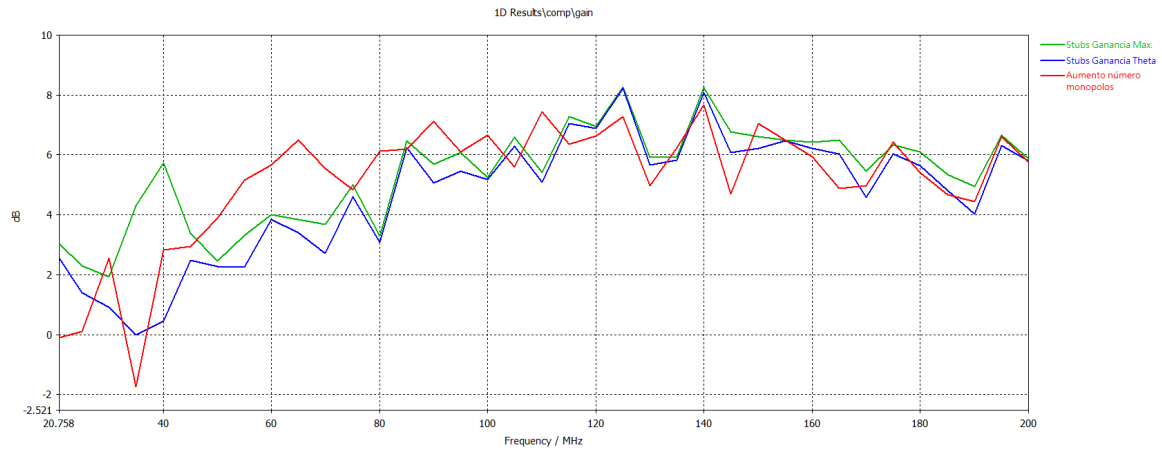


Figura 31: Ganancia antenna con 8 stubs

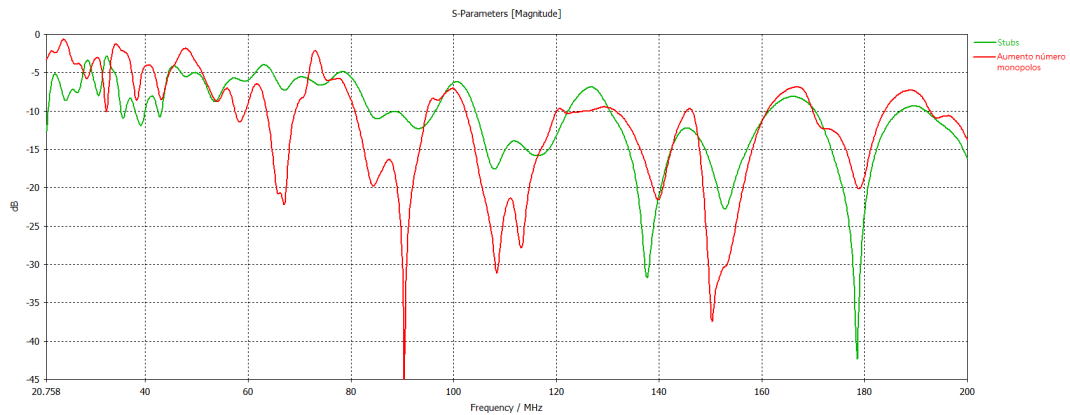


Figura 32: Adaptación antenna con 8 stubs

Como se puede ver en la gráfica de ganancia, tenemos que diferenciar entre la ganancia en la componente  $\theta$  y la ganancia total, suma de la ganancia en la componente  $\theta$  y la componente  $\phi$ . En los modelados anteriores, todos los elementos estaban dispuestos de forma vertical, por lo tanto la ganancia total correspondía con la ganancia con la ganancia en  $\theta$ . A partir del uso de stubs horizontales, introducimos una componente en horizontal y por tanto, ganancia en  $\phi$ . Por ello, a partir de ahora únicamente nos fijaremos en la ganancia en  $\theta$ , ya que observar la ganancia total nos puede inducir a error. Hecha esta aclaración, con este diseño conseguimos mejorar entre 20 MHz y 50 MHz la ganancia, hasta 2 dB en los 20 MHz, y adaptación hasta 8 dB, sacrificando a cambio ganancia entre los 50 MHz y 100 MHz.

## 5.6. Agregación componente vertical a los stubs horizontales

A pesar de que gracias al diseño anterior se conseguía una mejora de la banda baja, la aparición de un nulo en la ganancia impedía que el comportamiento fuera el aceptable. A partir de este punto, se plantearon numerosas simulaciones en las que no se obtuvo ningún éxito.

Sin embargo, surgió la idea de aprovechar la ganancia que introducían los stubs en la componente horizontal, aumentando la componente vertical y reduciendo la horizontal. Para ello, se realizó un gran número de pruebas en las que se torcían, levantaban o diagonalizaban los stubs. De todas estas simulaciones, aquella que mejor resultado obtuvo fue doblar el octavo stub, como se puede ver en la Figura 33 junto con sus resultados en ganancia y adaptación.

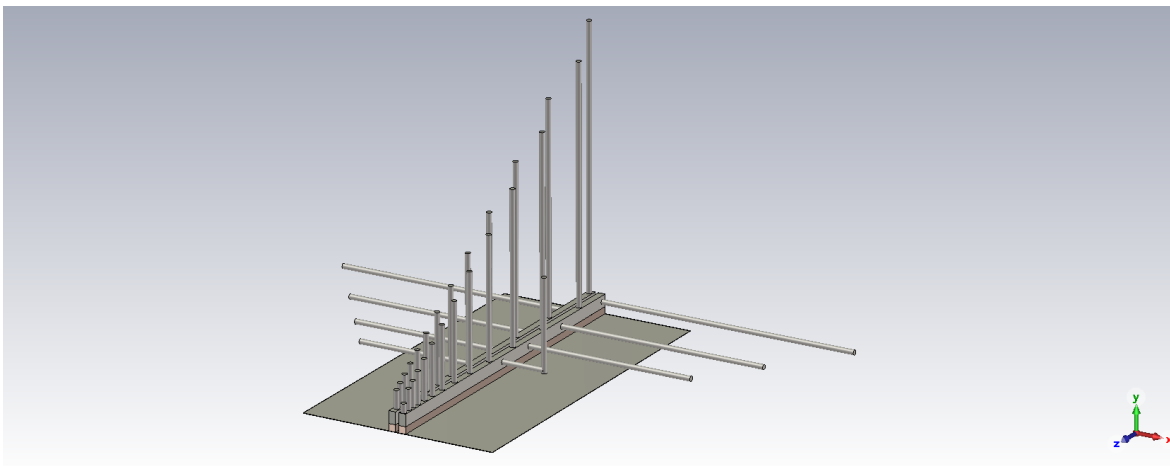


Figura 33: Modelado antenna con stub doblado

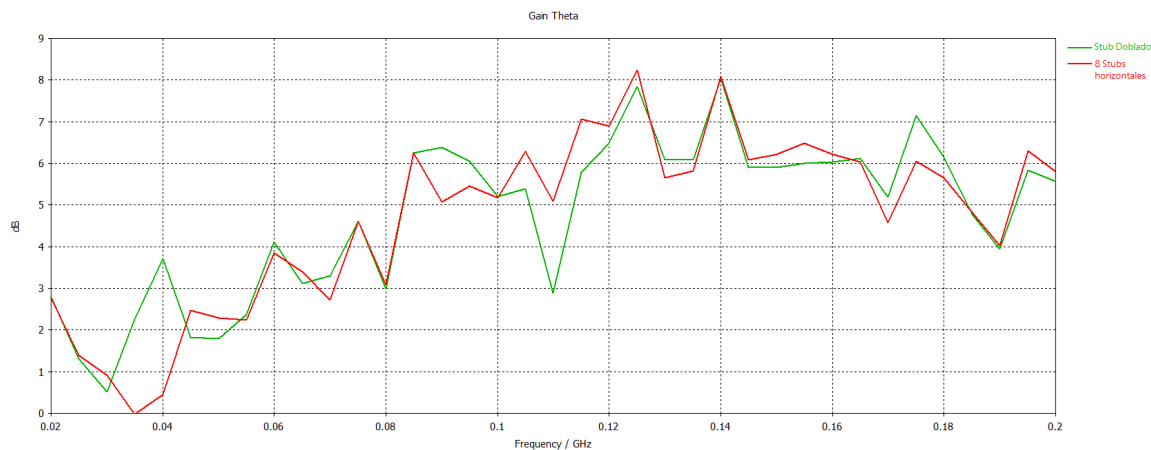


Figura 34: Ganancia antenna con stub doblado

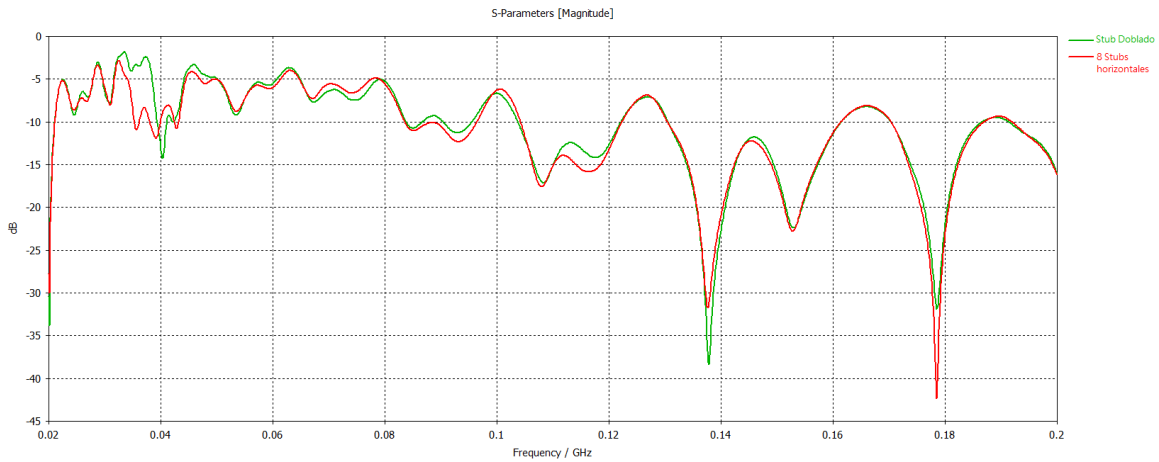


Figura 35: Adaptación antena con stub doblado

Como se observa en la imagen, el nulo de ganancia en los 30 MHz es evitado, además de conseguir una mejora de 3 dB en 40 MHz. Sin embargo, aunque se evite el nulo, la ganancia seguía siendo demasiado baja, además de perder 3 dB en 110 MHz.

### 5.7. Mejora banda alta

De forma simultánea a la modificación anterior (sin incluir el dipolo doblado), se aumentó el número de dipolos en la banda media-alta con el fin de conseguir aumentar la ganancia en dicho rangos de frecuencia. La mejora, que oscila entre 1 dB y 2 dB, se puede apreciar en la siguiente figura:

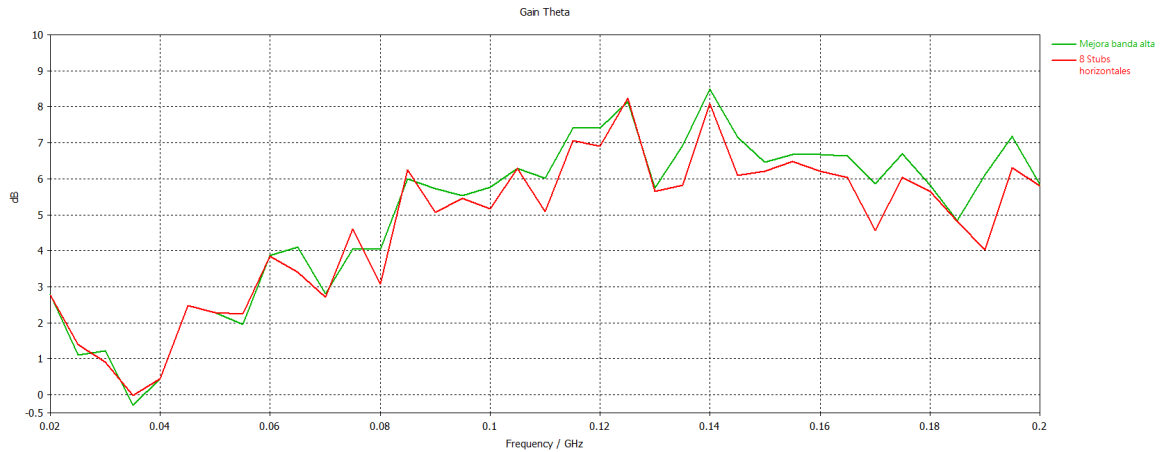


Figura 36: Ganancia mejora banda alta

## 5.8. Diseño de un meandro

Continuando con la mejora de la banda baja, se decidió seguir con el diseño del stub doblado modificando su longitud efectiva mediante su transformación en un meandro. La longitud del meandro en el eje X e Y, además de la separación con los monopolos fueron los principales parámetros de optimización. En las siguientes figuras se muestra el modelado y sus características.

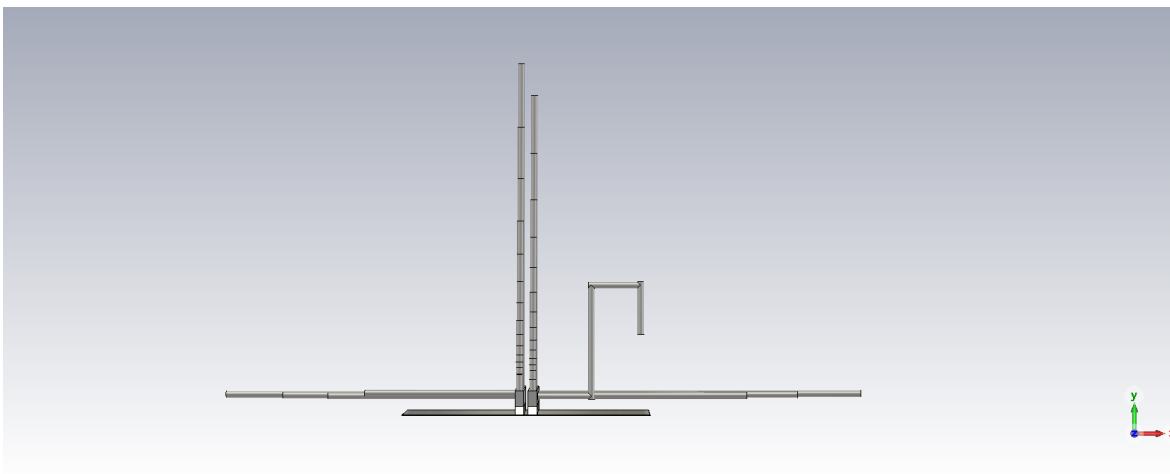


Figura 37: Modelado antenna con meandro

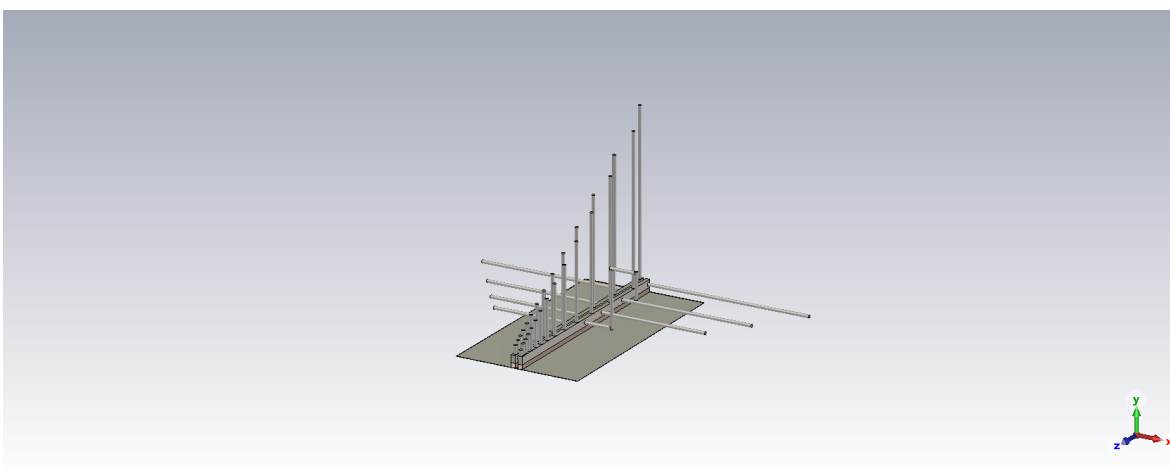


Figura 38: Modelado antenna con meandro

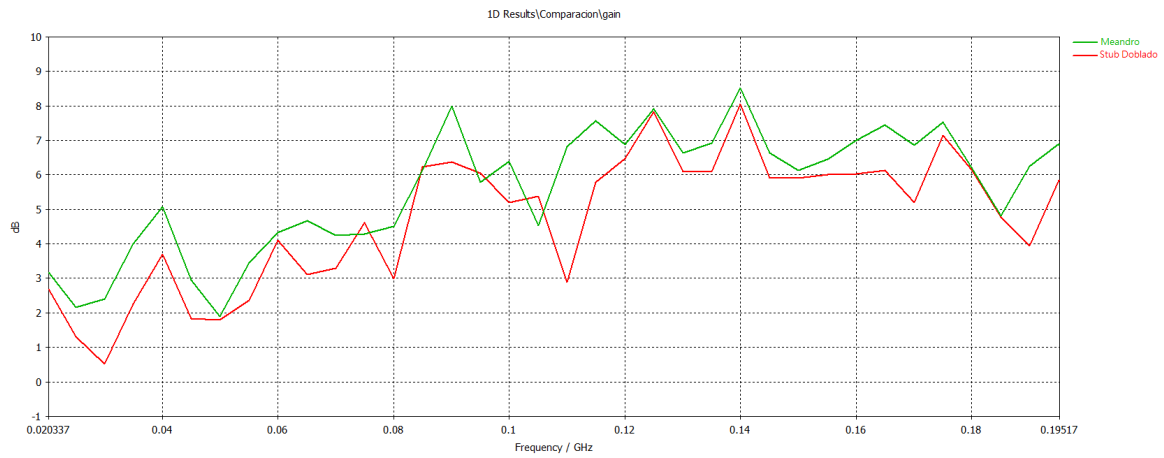


Figura 39: Ganancia antenna con meandro

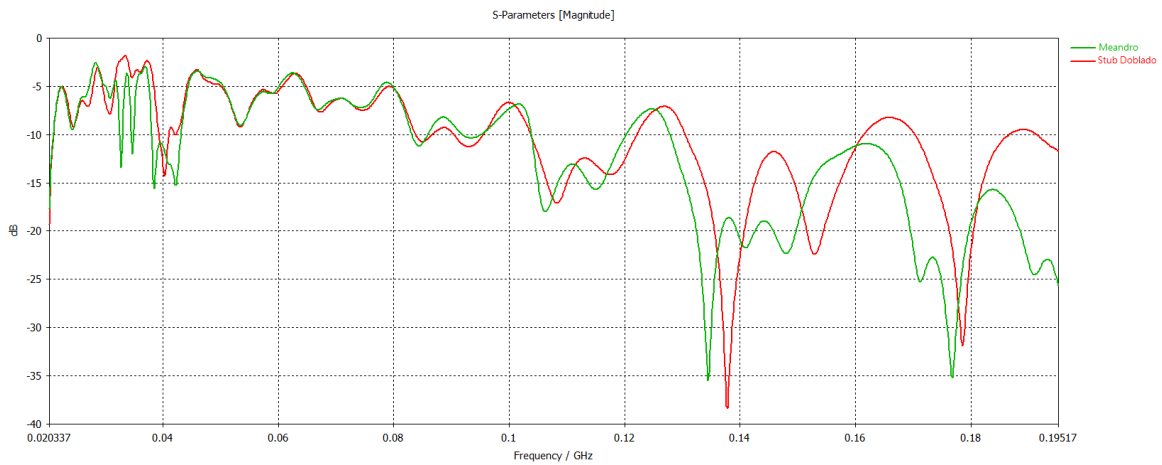


Figura 40: Adaptación antenna con meandro

Como se puede ver, en ganancia la mejora es sustancial, situándose por encima de los 2 dB en el rango de 20 MHz a 40 MHz, y evitando la caída en 110 MHz. Además del meandro, la implementación de la mejora en la banda alta descrita en el apartado anterior, provoca que este diseño sea superior en toda la banda.

## 6. Diseños finales

### 6.1. Versión final: introducción segundo meandro

Observando los buenos resultados obtenidos a partir del meandro anterior, se decidió probar otras combinaciones de meandros que pudieran funcionar. Tras numerosas simulaciones, los resultados mostraron que la formación de un segundo meandro en el cuarto stub mejoraba las prestaciones. Además, se realizaron optimizaciones de diferentes parámetros de la antena:

- Distancia entre monopolos
- Longitudes de los monopolos
- Radio de los monopolos
- Distancia entre booms
- Longitudes de los stubs
- Altura y anchura teflón
- Altura y anchura booms
- Longitud efectiva de los meandros

Gracias a esta última modificación y la optimización realizada, se llegó a una versión final cuyas características cumplieran con los requisitos planteados al comienzo del documento. Este modelado y sus resultados se muestran en las siguientes figuras:

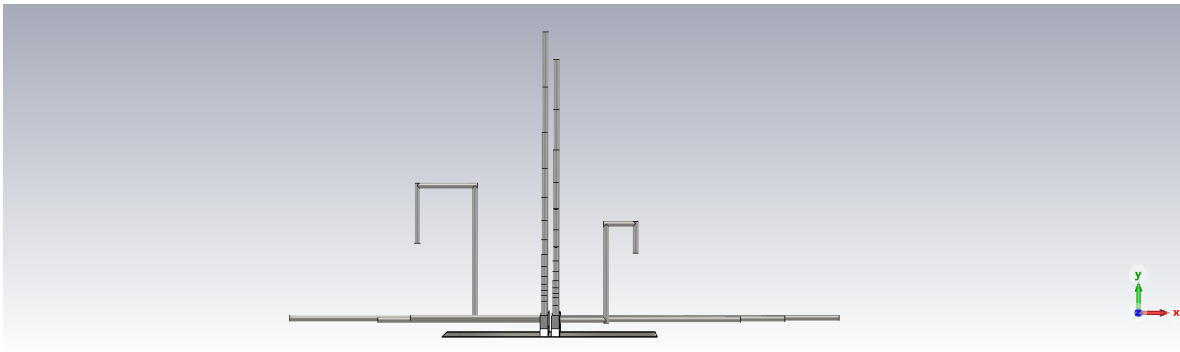


Figura 41: Modelado final antena con segundo meandro

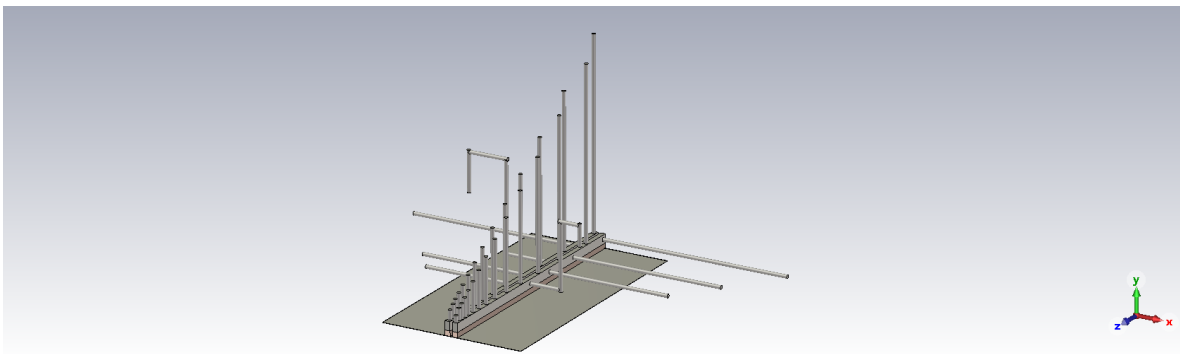


Figura 42: Modelado final antena con segundo meandro

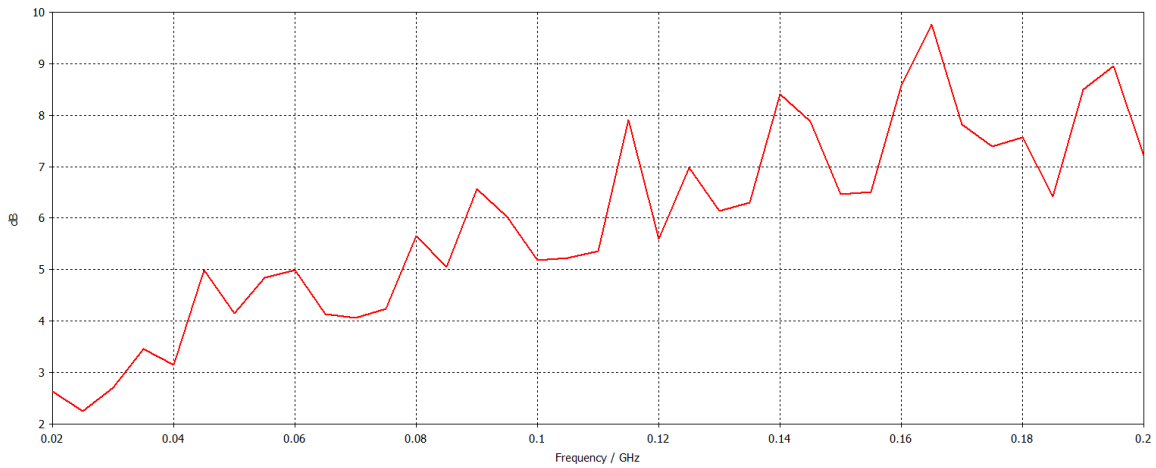


Figura 43: Ganancia final antena con segundo meandro

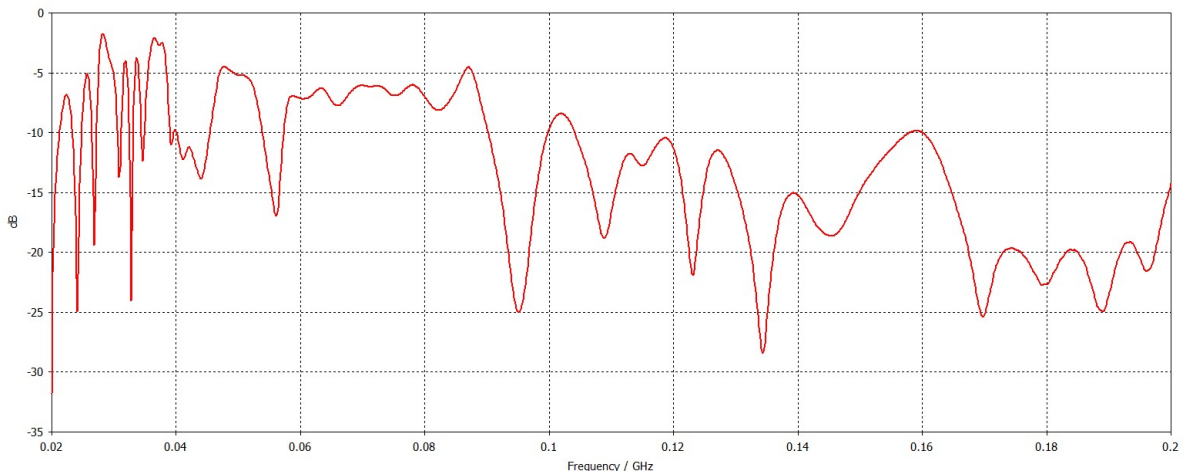
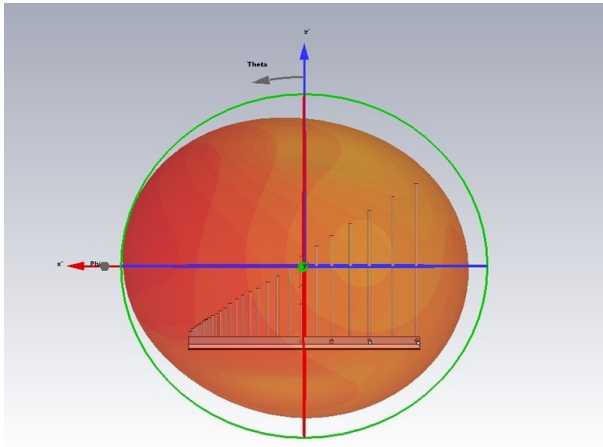


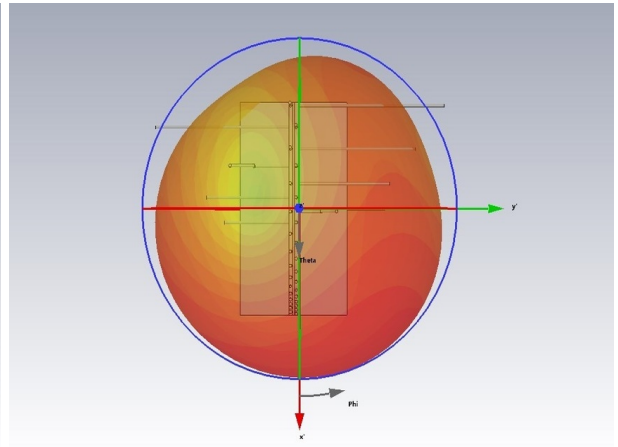
Figura 44: Adaptación final antena con segundo meandro

Como se puede observar, la adaptación presenta un buen comportamiento, sobre todo en la parte más baja de la banda y en la zona media/alta, encontrándose por debajo de los -10 dB. En cuanto a la ganancia, se ha obtenido un comportamiento ascendente con unos valores más que aceptables, cumpliendo con los mínimos establecidos.

Sin embargo, es necesario además un estudio de los diagramas de radiación para asegurar que los máximos de radiación se encuentren en una zona adecuada, asegurando un comportamiento 'endfire' de la antena.

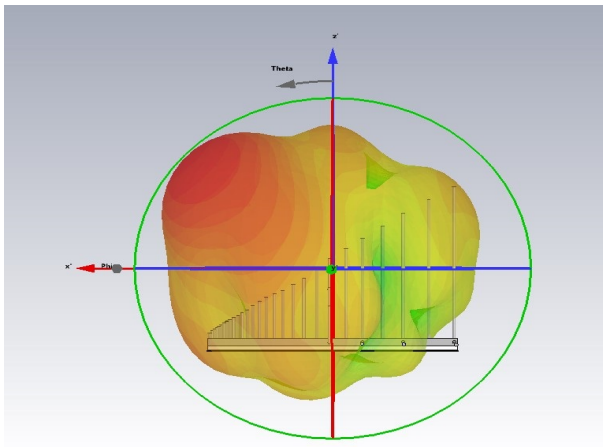


(a) Plano YZ

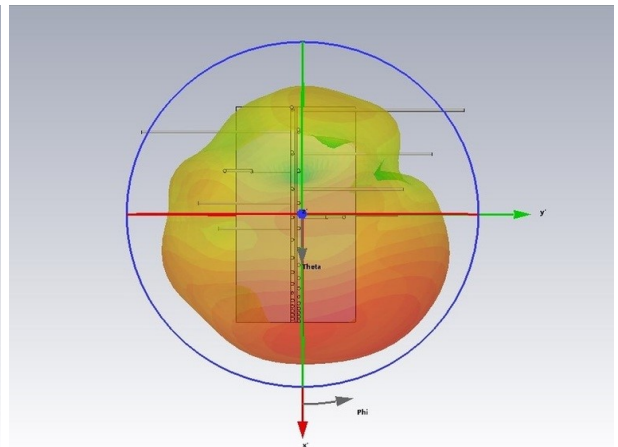


(b) Plano XZ

Figura 45: Diagrama de radiación de la antena 20 MHz



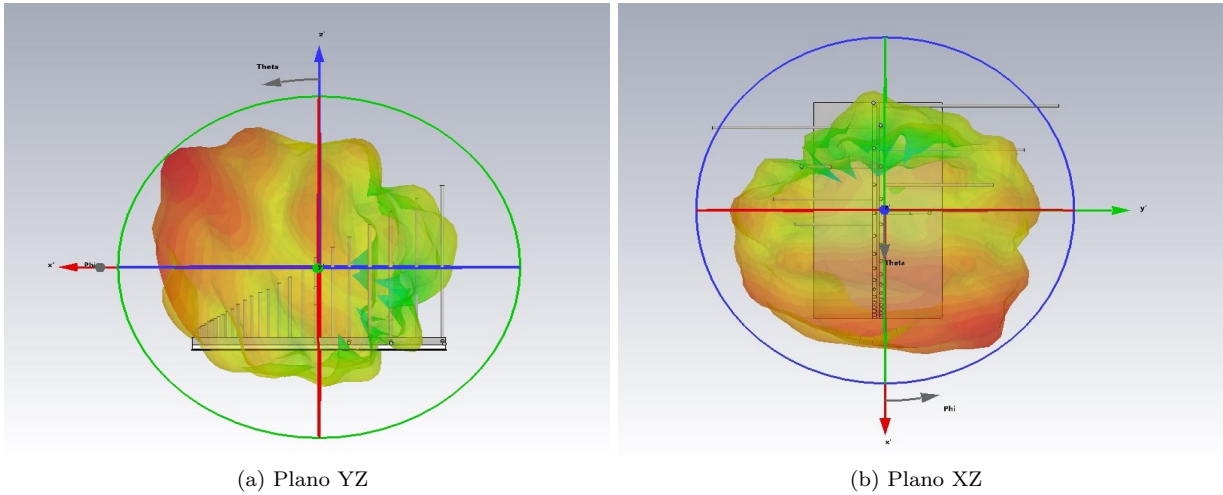
(a) Plano YZ



(b) Plano XZ

Figura 46: Diagrama de radiación de la antena 80 MHz

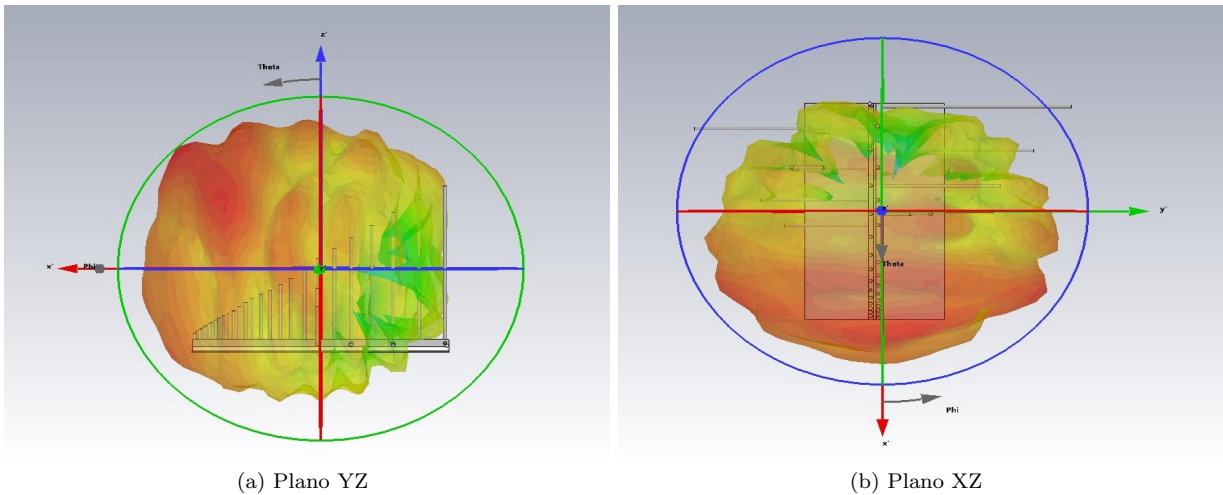




(a) Plano YZ

(b) Plano XZ

Figura 47: Diagrama de radiación de la antena 140 MHz



(a) Plano YZ

(b) Plano XZ

Figura 48: Diagrama de radiación de la antena 200 MHz

Como se puede observar, en el plano XZ el lóbulo principal está desplazado ligeramente hacia la derecha, aunque este desplazamiento desaparece a 200 MHz.

En el plano YZ, el máximo de ganancia se desplaza hacia arriba en el eje Y conforme aumentamos en frecuencia. Sin embargo, este pequeño desajuste se encuentra dentro de los límites aceptables por el proyecto.

## 6.2. Implementación en el vehículo

Una vez se obtuvo el diseño final, el siguiente paso fue realizar las simulaciones con la antena situada en el techo del vehículo mostrado anteriormente. En estas simulaciones, algunos puntos de frecuencia se veían gravemente perjudicados. Por lo tanto, como el modelo del coche era un modelo bastante aproximado del que se iba a usar en la realidad, se decidió realizar una optimización 'ad hoc' para este vehículo. Esta optimización se basó en ajustar la longitud de los stubs cuyo extremo se encontraba cerca de los extremos del vehículo. El problema provenía de la inducción de corrientes en el techo y en los laterales del vehículo, lo que afectaba negativamente. Para solucionar esto se aumentó la longitud de algunos de los stubs para alejarlos de dichas paredes. Los resultados conseguidos se muestran en las siguientes figuras:

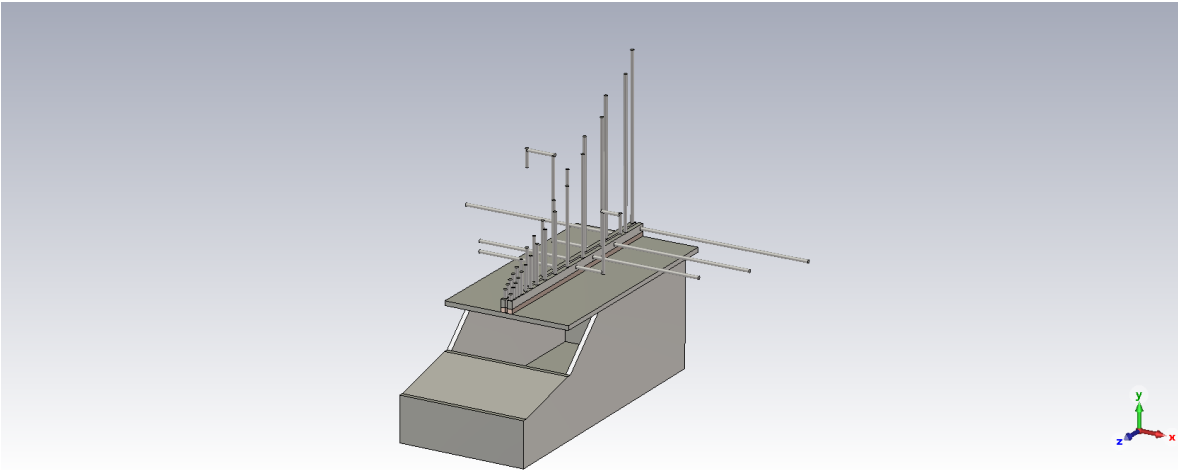


Figura 49: Modelado antena implementada en el vehículo

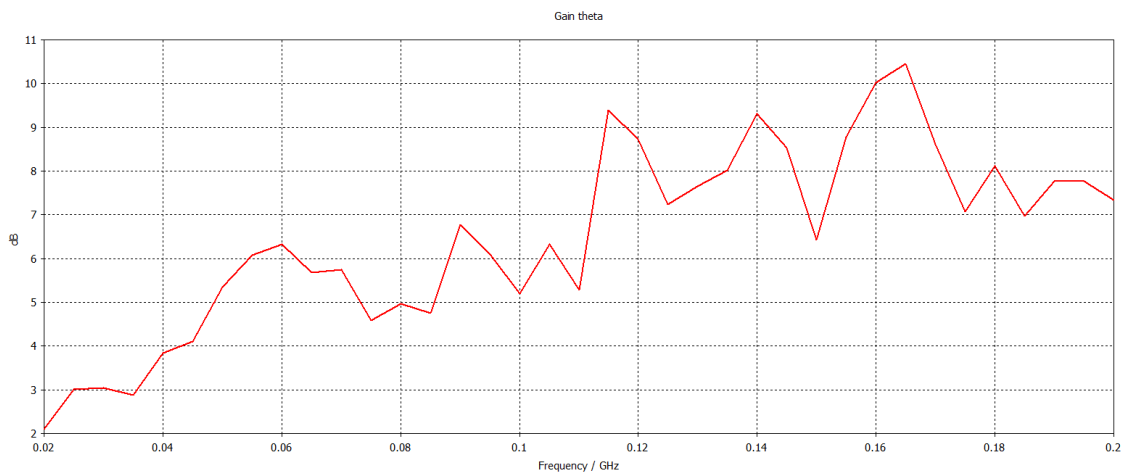


Figura 50: Ganancia antena implementada en el vehículo

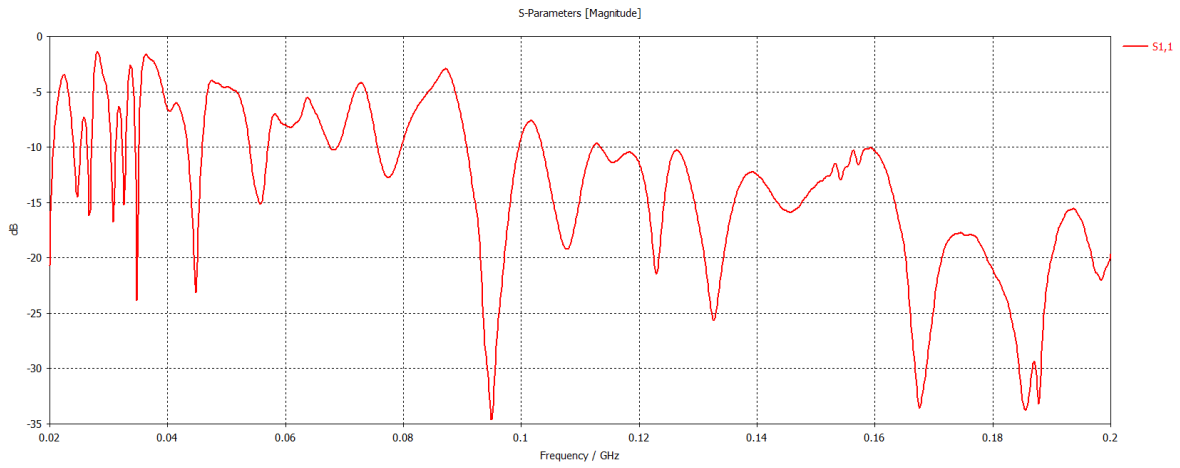


Figura 51: Adaptación antenna implementada en el vehículo

En esta ocasión, aunque la adaptación empeora en ciertas zonas como la banda baja, conseguimos hasta 1 o 2 dB más de ganancia con respecto a la antena sin vehículo, gracias a la actuación del vehículo como plano de masa. Ahora es necesario comparar estos resultados con los diagramas de radiación:

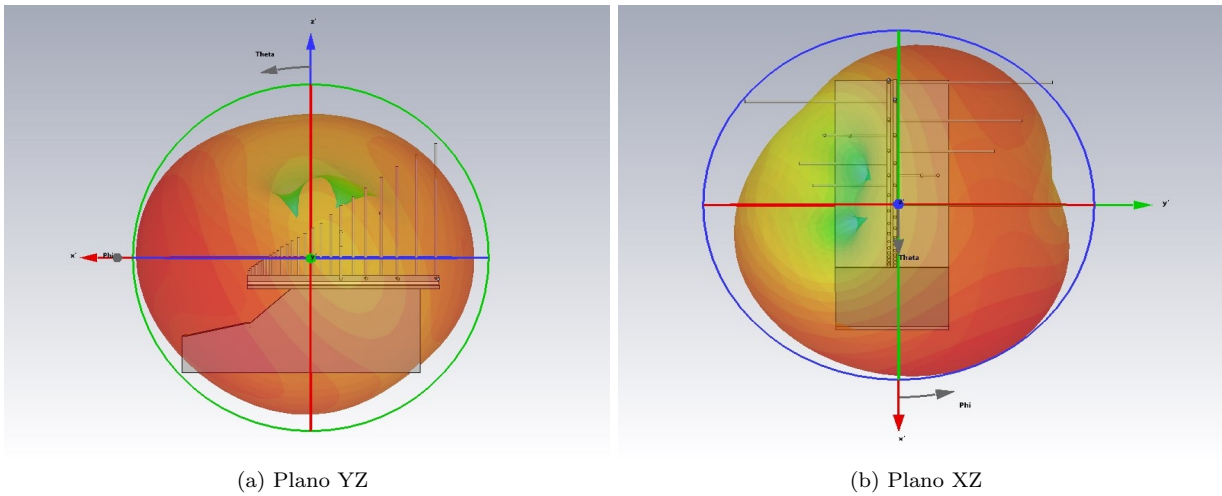
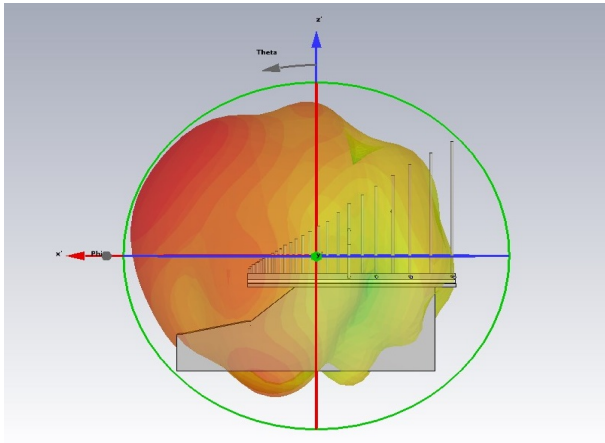
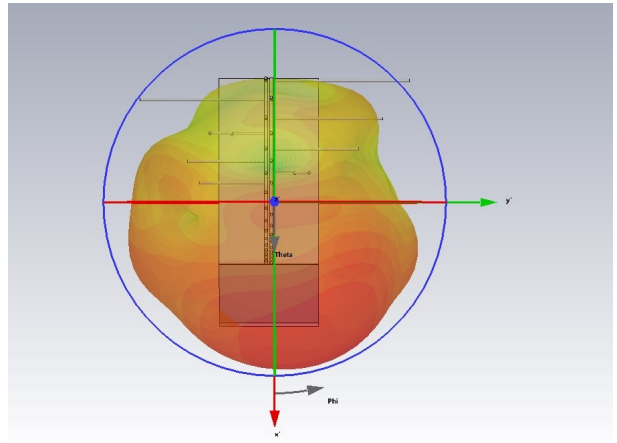


Figura 52: Diagrama de radiación de la antena implementada en el vehículo 20 MHz

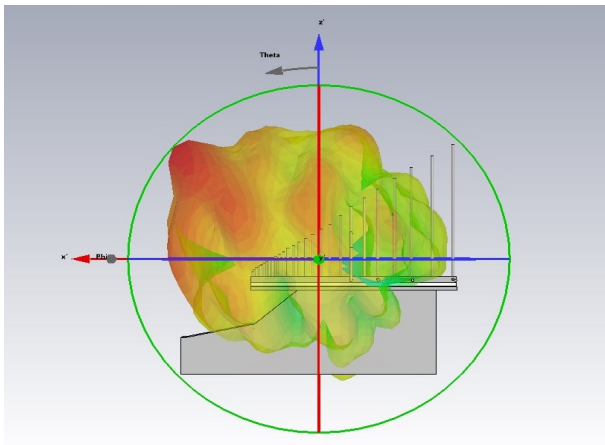


(a) Plano YZ

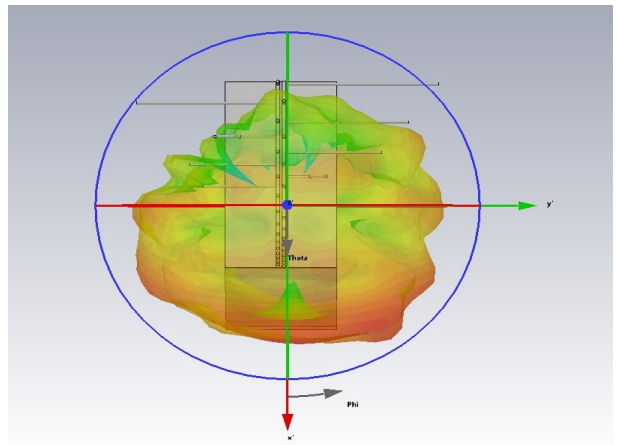


(b) Plano XZ

Figura 53: Diagrama de radiación de la antena implementada en el vehículo 80 MHz



(a) Plano YZ



(b) Plano XZ

Figura 54: Diagrama de radiación de la antena implementada en el vehículo 140 MHz

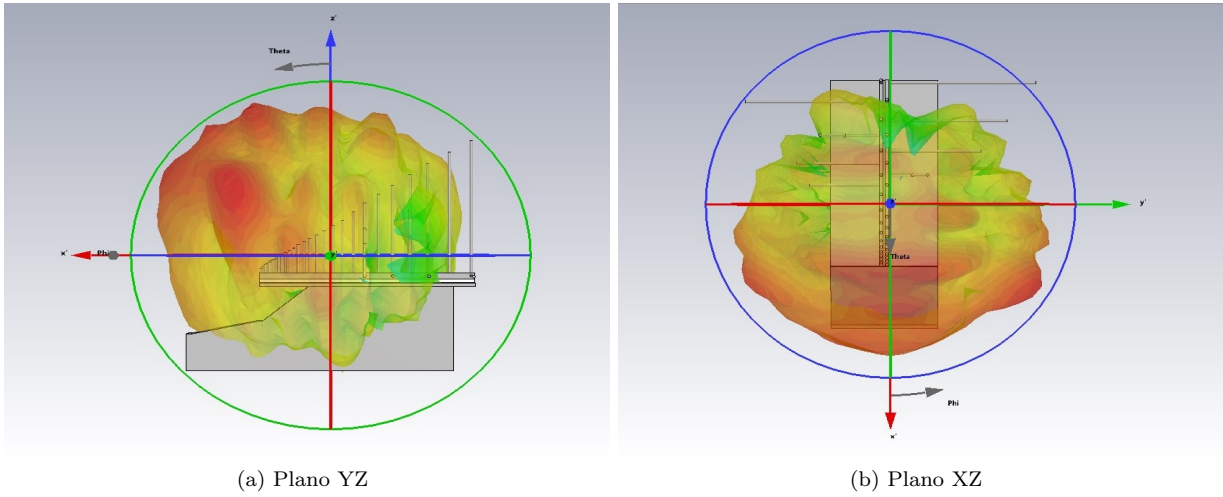


Figura 55: Diagrama de radiación de la antena implementada en el vehículo 200 MHz

El comportamiento es muy similar al de la antena individual: en el plano XZ cierto desvío en el eje X y en el plano YZ una tendencia hacia la parte positiva del eje Y conforme aumentamos la frecuencia.

### 6.3. Compatibilidad electromagnética

Finalmente, una vez resuelta la implementación en el coche, se integraron en el diseño el resto de las antenas que iban a ser utilizadas por el sistema. Estas antenas son:

- LPDA con banda de trabajo de 200 MHz a 1000 MHz
- Bocina con banda de trabajo de 1 GHz a 3 GHz
- Bocina con banda de trabajo de 3 GHz a 6 GHz.

Dichas antenas fueron modeladas previamente en CST Studio. Una vez fue comprobado que el comportamiento de estas eran acordes a las hojas de especificaciones, se incluyeron con el vehículo mediante un mástil, dando lugar al sistema mostrado en la siguiente figura:

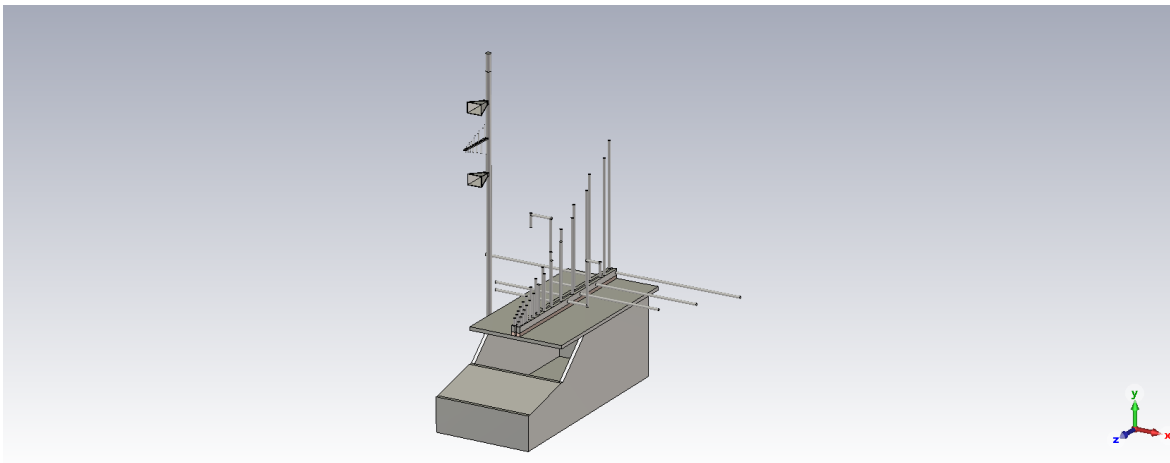


Figura 56: Modelo sistema completo

Debido a la complejidad del sistema, no fue posible obtener resultados de ganancia, únicamente de adaptación. Aun así, se puede comprobar en los parámetros S cómo no se produce transferencia de energía entre puertos, siendo el puerto de la antena diseñada el 1:

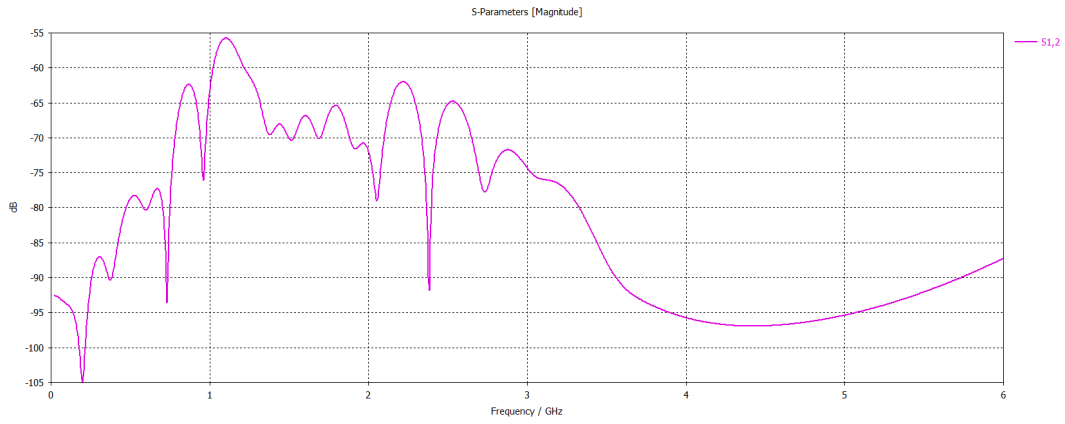


Figura 57:  $S_{12}$  Sistema Completo

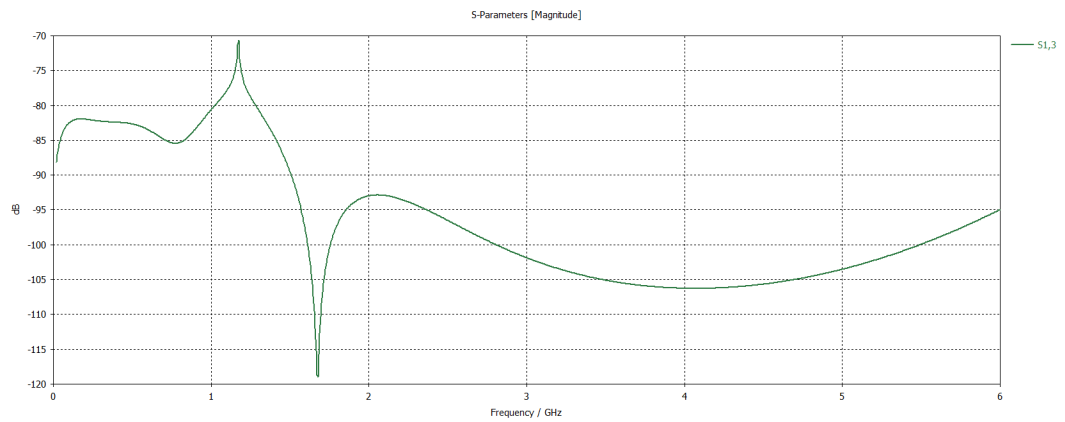


Figura 58:  $S_{13}$  Sistema Completo

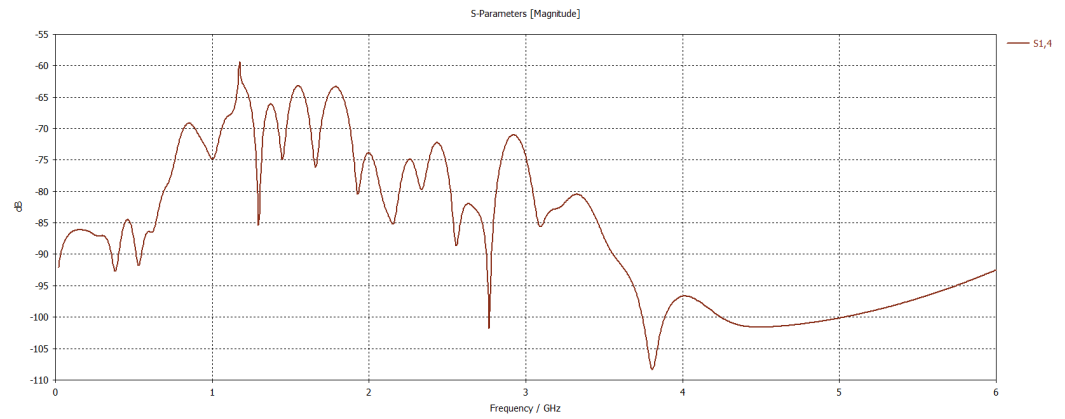


Figura 59:  $S_{14}$  Sistema Completo

Lamentablemente, el parámetro  $S_{11}$  obtenido se alejaba demasiado de los resultados de la simulación previa, mostrando un comportamiento de 5 dB más de adaptación en toda la banda. Por lo tanto, supusimos que debido a la falta de mallado y la imposibilidad de aumentarlo debido a las limitaciones técnicas, dicha simulación era incorrecta y no era posible realizarla de forma correcta.

## 7. Conclusiones y líneas futuras

A lo largo de este trabajo se ha realizado un diseño alternativo a la antena LPDA tradicional. Este diseño permite mantener unas buenas propiedades en cuanto a adaptación y ganancia en la banda baja al mismo tiempo que se consigue reducir notablemente las dimensiones de la antenna. Además, el diseño basado en monopolos permite su implementación en el techo de un vehículo o en cualquier superficie planar. En la siguiente figura se resumen las distintas fases del proceso de diseño explicadas en el apartado anterior:

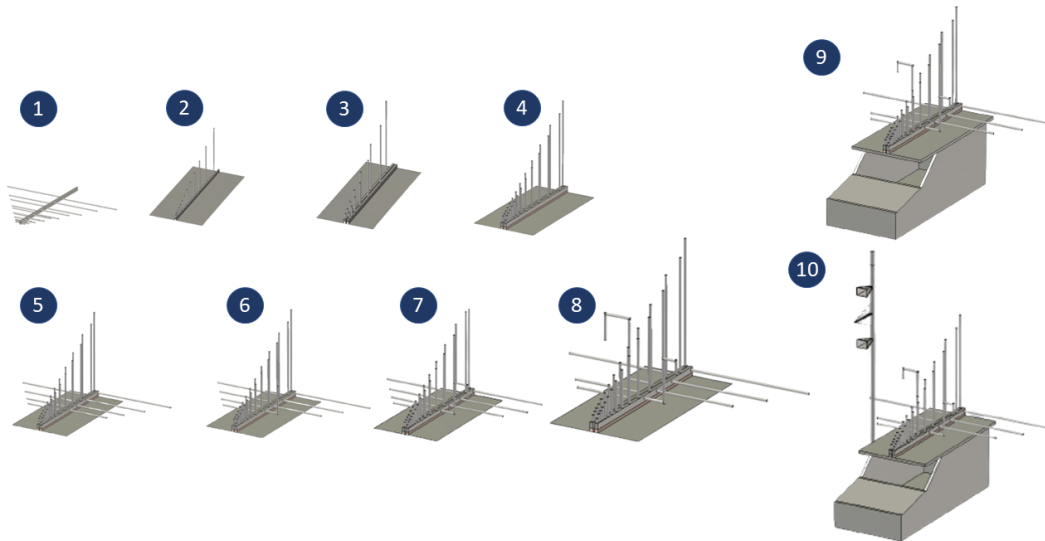


Figura 60: Evolución de la LPDA

Una vez completado el diseño, la antena ha sido integrada en el modelo de un vehículo para estudiar cómo afecta dicho vehículo al comportamiento de la antena. Tras confirmar que esta interacción perjudicaba su comportamiento, se ha realizado una optimización 'ad hoc' para ese modelo en concreto, puesto que el objetivo del proyecto es la fabricación de la antena y su implementación en un vehículo de características similares.

Posteriormente, tras este ajuste 'ad hoc', se han integrado en las simulaciones una serie de antenas que formarían parte del sistema. Estas antenas trabajan en bandas distintas, elevando la frecuencia de la simulación hasta los 6 GHz. Debido a la complejidad del modelado, solo se han podido estudiar los parámetros  $S$  de las diferentes antenas. A pesar de esto, el estudio de compatibilidad electromagnética ha sido exitoso, puesto que no se producía transferencia de energía entre los puertos de las distintas antenas. Sin embargo, no se ha podido estudiar de forma precisa la adaptación de cada una de las antenas, debido a problemas en la simulación derivados de la complejidad del modelado. En las siguientes figuras se muestra de forma visual cómo los requisitos de diseño se han cumplido de forma exitosa, tanto para el diseño final de la antena como su implementación en el coche:



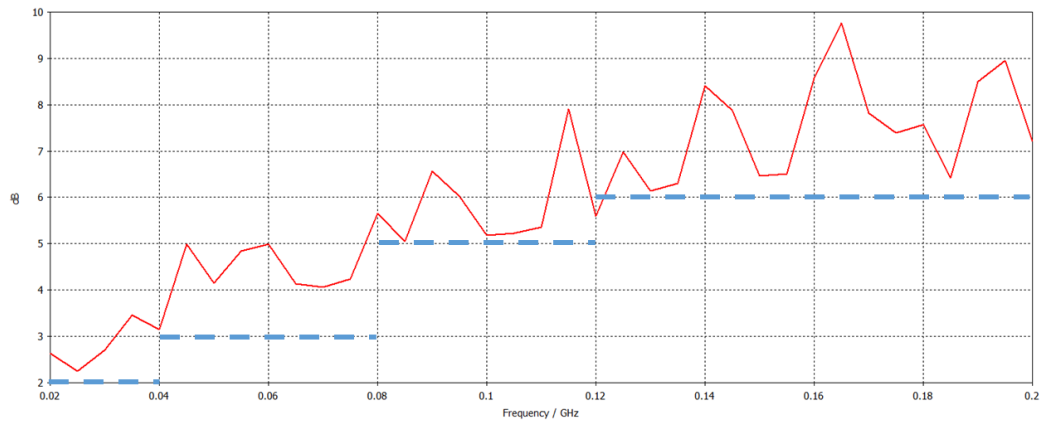


Figura 61: Requisitos ganancia del diseño final de la antena

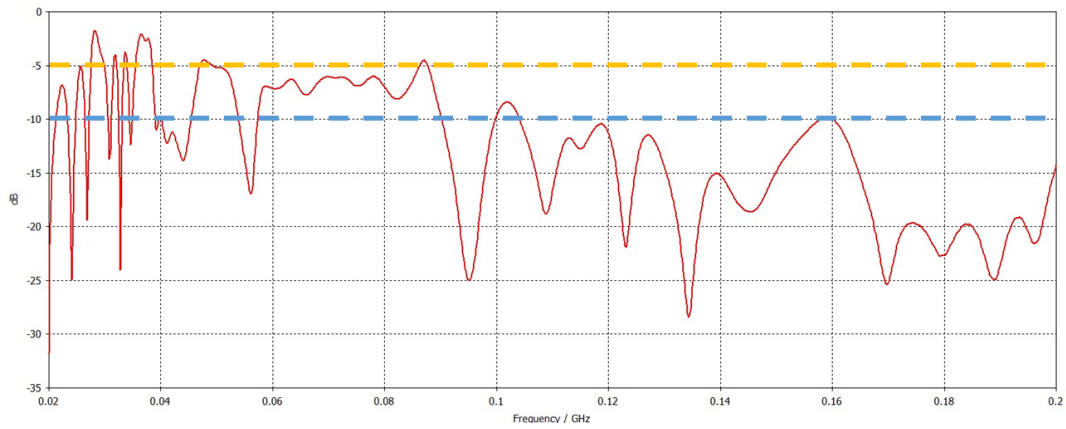


Figura 62: Requisitos adaptación del diseño final de la antena

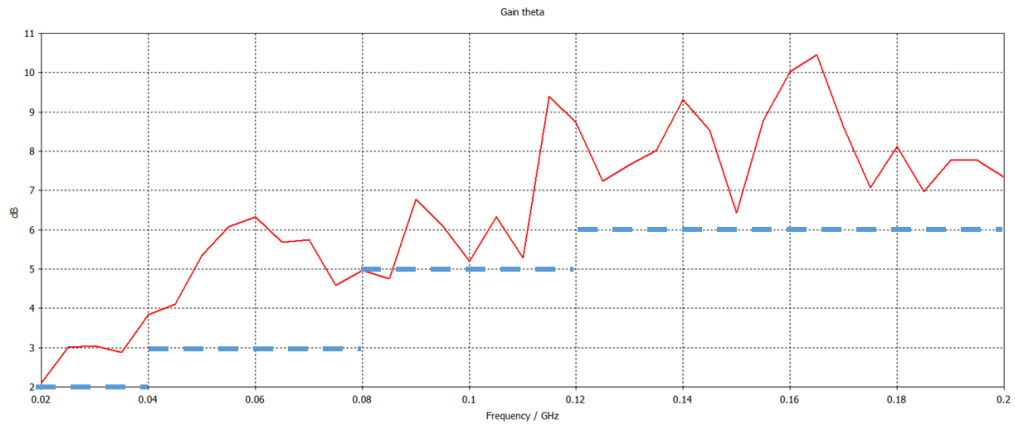


Figura 63: Requisitos ganancia del diseño final de la antena implementada en el coche

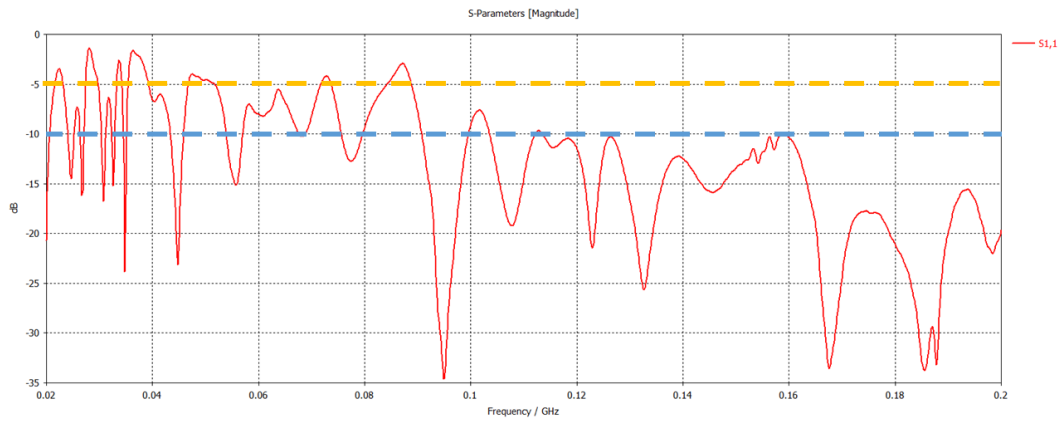


Figura 64: Requisitos adaptación del diseño final de la antena implementada en el coche

Como se puede observar, en ambos casos se ha conseguido alcanzar y superar los mínimos requeridos. En términos de ganancia, a excepción de un pequeño punto en 120 MHz en el caso del diseño final sin implementar y un punto en 80 MHz en la antena implementada, se puede decir que el resultado cumple las especificaciones. Incluso en el caso del diseño con el vehículo, el efecto de plano de masa de este provoca un aumento de la ganancia en 1 o 2 dB en casi toda la banda. Con respecto a la adaptación, en la mayoría de la banda el  $S_{11}$  se encuentra por debajo de los -5 dB, y en gran parte por debajo de los -10 dB. Más concretamente, en el diseño de la antena sin implementar, un 94.175% de la banda se encuentra por debajo de los -5 dB, y un 66.65% por debajo de -10 dB. En el caso de la antena implementada en el vehículo, un 88.71% de la banda se sitúa por debajo de -5 dB, y un 66.23% por debajo de -10 dB.

En la siguiente tabla resumen podemos verificar como los diferentes objetivos propuestos han sido superados:

Requisito	Antena sin implementar	Antena implementada vehículo
Largo 5 m	✓	✓
Ancho 2.8 m	✓	✓
2 dB Ganancia $f \geq 20$	✓	✓
3 dB Ganancia $f \geq 40$	✓	✓
5 dB Ganancia $f \geq 80$	✓	✓
6 dB Ganancia $f \geq 120$	✓	✓
-5 db Adaptación	94.175 %	88.71 %
-10 db Adaptación	66.65 %	66.23 %

Tabla 5: Requisitos cumplidos

Por lo tanto, se considera el diseño un éxito, ya que ha conseguido cumplir satisfactoriamente todos los requisitos impuestos de ganancia, adaptación, dimensiones e interacción con el resto del sistema.

Como líneas futuras asociadas a este trabajo, se podría continuar con la monitorización de la antena. Una vez fabricada, es necesaria la medición de sus parámetros de adaptación y ganancia reales, junto a una posterior comparación con los valores de simulación presentados en este documento. Una diferencia considerable requeriría de una mejora en los parámetros de simulación propuestos.

Además, debido a los periodos de tiempo ajustados de los que ha dispuesto el proyecto, la antena final presentada ha sido aquella que ha cumplido con los requisitos mínimos. Sin embargo, es posible una posible mejora de las características mediante una optimización en cuanto a los parámetros comentados a lo largo del documento (longitud de los monopolos, separaciones entre elementos, modificaciones en la forma, etc).

Asimismo, se pueden presentar diseños alternativos que partan de las propuestas descartadas durante este proyecto con el objetivo de estudiar si potencialmente puede haber una mejora de las características alcanzadas con el diseño establecido.

## 8. Referencias

- [1] Don E. Gordon, CHAPTER I - Introduction, Editor(s): Don E. Gordon, Electronic Warfare, Pergamon, 1981, Pages 1-13, ISBN 9781483197227, [doi.org/10.1016/B978-1-4831-9722-7.50004-2](https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9722-7.50004-2).
- [2] [Army Technology: Analysis of evolution of electronic warfare timeline](#)
- [3] [Sipri: World military expenditure passes \\$2 trillion for first time](#)
- [4] [Bloomberg: Electronic Warfare Market Size](#)
- [5] [Nota Prensa Gabinete de Ministros](#)
- [6] [Indra: participación Española en el Programa Europeo FCAS](#)
- [7] [DW: How Drones are changing the way of war](#)
- [8] Cardama Áznar, A., Jofre Roca, L., Rius Casals, J.M., Romeu Robert, J., Blanch Boris, S., Ferrando Bataller, M., Antenas, UPC, 2002
- [9] Matsuzawa, S., Sato, K., Nishikawa K., Radiation Characteristics of On-Glass Mobile Antennas for Digital Terrestrial Television
- [10] Qinghua, S., Shen, Z., Lu, J., Log-Periodic Monopole Array With Uniform Spacing and Uniform Height, IEEE Transactions on Antennas and propagation, Vol. 66, No. 9, September 2018
- [11] Zengin, F., The Effects of the Trapezoidal Dipole Array Elements on Planar Log Periodic Antenna, IEEE
- [12] Berry, D.G., Ore, F.R., Log Periodic Monopole Array, IEEE
- [13] [Hamwaves: LPDA Calculator](#)