Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior

INGENIERÍA EN SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES

Trabajo Fin de Grado

Optimización de antenas de parche en el espectro actualizado de la TDT como parte de un sistema radar pasivo

Autor: Celia Rus Delgado

Tutor: David Anastasio de la Mata Moya
Cotutor: Javier Rosado Sanz

2021

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

Ingeniería en Sistemas de telecomunicaciones

Trabajo Fin de Grado
Optimización de antenas de parche en el espectro actualizado de la TDT como parte de un sistema radar pasivo

Autor: Celia Rus Delgado

Tutor: David Anastasio de la Mata Moya
Cotutor: Javier Rosado Sanz

TRIBUNAL:

Presidente: María Pilar Jarabo Amores

Vocal 1º: Fco. Javier Escribano Aparicio

Vocal 2º: David de la Mata Moya

FECHA: 20/09/2021

Agradecimientos:

Para mis padres, mi hermano y mis abuelitos

Para los amigos que he hecho en esta etapa

Para los profesores que han aportado en mi conocimientos y valores

Y para mi compañero de vida

Insistir, persistir y resistir, pero nunca desistir

Capítulo 1 : Índice

Capítulo 1 : Índice 4

Índice de ilustraciones 6

Resumen 9

Abstract 10

Resumen extendido 11

Capítulo 2 INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA 12

Introducción 12

Objetivos 13

Capítulo 3 FUNDAMENTO TEÓRICO 16

Antenas 16

Tipos de antena 17

Antenas de hilo 17

Antenas de apertura 20

Antenas microstrip 23

Antenas con reflectores 24

Array de antenas 24

Parámetros de las Antenas 24

Impedancia de entrada 25

Ancho de banda 26

Diagrama de radiación 27

Directividad 28

Eficiencia de radiación 28

Ganancia 29

Polarización 29

Radares 30
¿Qué es un radar? 30
Contexto histórico 31
Determinación de la distancia 32
Ángulo de elevación 32
Alcance mínimo medible 33
Ecuación radar 33
Derivación de la ecuación radar 34
Clasificación de los sistemas radar 35
Radares de generación de imágenes y radares de medición 35
Radar primario 35
Radar secundario 35
Radares pasivos 36
IDEPAR 37
Capítulo 4 RESULTADOS 40
Antena Televés 4G Nova 40
Antena tipo E 51
Polarización vertical 57
Polarización horizontal 59
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, LÍNES FUTURAS, PLIEGO DE CONDICIONES Y PRESUPUESTO 63
Conclusiones 63
Líneas futuras 64
Pliego de condiciones 64
Presupuesto 65
Capítulo 6 Bibliografía 67

Índice de ilustraciones

Fig. 2-1 Antenas del demostrador IDEPAR 13
Fig. 2-2 Segundo Dividendo Digital [2] 14
Fig. 3-1 Línea de transmisión Thevenin equivalente a una antena en modo de transmisión [7] 16
Fig. 3-2 Antena como dispositivo de transición [7] 17
Fig. 3-3 Antenas de hilo [8] 18
Fig. 3-4 Dipolo λ/2 adaptada a la frecuencia 98MHz 18
Fig. 3-5 Diagrama de radiación 3D del dipolo λ/2 a la frecuencia 98MHz 19
Fig. 3-6 Diagrama de radiación en elevación del dipolo λ/2 a la frecuencia 98MHz..... 19
Fig. 3-7 Antenas de apertura [7] 20
Fig. 3-8 Dimensiones de la antena de bocina diseñada a la frecuencia 6GHz 21
Fig. 3-9 Diagrama de radiación 3D de una antena de bocina diseñada a la frecuencia 6GHz 22
Fig. 3-10 Diagrama de radiación en azimut de una antena de bocina diseñada a la frecuencia 6GHz 23
Fig. 3-11 Antena microstrip [8] 23
Fig. 3-12 Antena con reflector parabólico 24
Fig. 3-14 Algunos tipos de configuraciones de arrays 24
Fig. 3-15 Antena en modo transmisión 25
Fig. 3-16 Equivalente Thevenin [8] 25
Fig. 3-17 Parámetro $S11$ antena de parche [6] 26
Fig. 3-18 Diagramas de radiación 3D y 2D de una antena Yagi 27
Fig. 3-19 Principio básico fundamental de un radar [12] 31
Fig. 3-20 Telemobiloscopio [Megger, marzo 2021] 32
Fig. 3-21 Esquema de un radar pasivo que usa IoO de TDT 36
Fig. 3-22 Radar multiestático [Apuntes Radiodeterminación y Radar, marzo 2021] 37
Fig. 4-1 Antena 4G Nova Televés [6] 41
Fig. 4-2 Parámetro S11 [6] 41
Fig. 4-3 Antena 4G Nova Televés adaptada [6] 42
Fig. 4-4 Antena 4G Nova [6] 43

Fig. 4-5 Parámetro| $S11$| cuando la antena reduce su tamaño a la mitad 44
Fig. 4-6 Parámetros S11 con las medidas de optimización 45
Fig. 4-7 Parámetro S11 con la segunda medida de optimización..... 46
Fig. 4-8 Diseño de la arquitectura del array 47
Fig. 4-9 Menu > Excitations > Edit Sources..... 48
Fig. 4-10 Array de 7 elementos antena 4G Nova..... 49
Fig. 4-11 Ancho de haz 4G Nova 49
Fig. 4-12 Ancho de haz antena 4G Nova 50
Fig. 4-13 Antena E 52
Fig. 4-14 Parámetros S11 Antena E..... 53
Fig. 4-15 Antena E 54
Fig. 4-16 Antena E dimensiones finales 55
Fig. 4-17 Parámetro S11 E final..... 55
Fig. 4-18 Disposición array de 7 elementos antena E polarización vertical..... 56
Fig. 4-19 Ancho de haz antena E optimizada 57
Fig. 4-20 Array de 7 elementos antena E polarización vertical..... 58
Fig. 4-21 Ganancia array de 7 elementos antena E con polarización vertical..... 58
Fig. 4-22 Array de 7 elementos antena E con polarización horizontal [5] 59
Fig. 4-23 Array de 7 elementos polarización horizontal 60
Fig. 4-24 Ganancia array 7 elementos antena E para diferentes fases polarización horizontal 61

Resumen

Este TFG tiene como objetivo el estudio de la posible adaptación de la banda de trabajo de los elementos actuales para las nuevas frecuencias de la Televisión Digital Terrestre (TDT) tras el segundo dividendo digital que ha disminuido las frecuencias en las que se ubica el sistema de radiodifusión. Se llevará a cabo por la optimización de una antena tipo log-periódica construida con tecnología microstrip y una antena de parche con substrato de aire, esta última para polarización vertical, las soluciones se darán con el estudio de estas dos antenas mencionadas, de sus parámetros y la variación de dichos parámetros en función de la frecuencia (S11). Ambas soluciones serán posteriormente integradas en el demostrador IDEPAR [1] para su operación en esta nueva banda de frecuencia.

Palabras clave: antena de parche, tecnología microstrip, IDEPAR, radar pasivo, TDT,

Abstract

The objective of this TFG is to study the possible adaptation of the working band of the current elements for the new frequencies of Digital Terrestrial Television (TDT) after the second digital dividend which has decreased the frequencies in which the broadcasting system is located. It will be carried out by optimizing a log-periodic antenna built with microstrip technology and a path antenna with an air substrate the latter for vertical polarization. The solutions will be found with the study of these two antennas mentioned, their parameters and the carination of said parameters as a function of frequency (S11). Both solutions will later be integrated into the IDEPAR demonstrator for operation in this new frequency band.

Keywords: path antenna, microstrip technology, IDEPAR, passive radar, TDT

Resumen extendido

Como parte de este trabajo se lleva a cabo porque se ha realizado una actualización en el espectro de la TDT, para solucionar esto se planteó trabajar con las antenas que fueron previamente diseñadas para el demostrador IDEPAR que cuenta con tres posibles sistemas de antenas para el canal de vigilancia. El demostrador es diseñado por el grupo de investigación Redes de sensores acústicos y electromagnéticos inteligentes y procesado de la señal.

Para llevar a cabo este proceso se ha utilizado el software de simulación electromagnéticas ANSYS HFSS, estudiando los modelos 3D de las siguientes antenas:

- Antena "Televés 4G Nova"
- Antena de parche tipo E

Se realizará el estudio de los parámetros y como afectan los cambios de dichos parámetros en la adaptación de la antena dependiendo de la frecuencia, estas variaciones se verán en el parámetro S11.

Una vez realizado esto, gracias al software podemos realizar algoritmos de optimización y ver así como se logra el ancho de banda de adaptación, aproximadamente entre 470 y 590 MHz.

Una vez se hayan realizado la optimización de las antenas, se realizará la composición de un array lineal de antenas para el canal de vigilancia del demostrador IDEPAR, estudiando posteriormente el rendimiento del array, se mirará el acoplamiento entre elementos, ganancia máxima del haz, nivel de los lóbulos laterales, adaptación de grating lobes y margen de apuntamiento electrónico.

Capítulo 2
INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y ESTRUCTURA

Introducción

Este trabajo se centra en la optimización de antenas de parche en el espectro actualizado de la TDT como parte de un array del canal de vigilancia de un sistema radar pasivo.

Para la realización de este TFG ha contemplado trabajar con diferentes antenas previamente diseñadas para el demostrador IDEPAR centrado en el espectro de la TDT sin el último dividendo. IDEPAR ha sido desarrollado por el grupo de investigación Redes de sensores acústicos y electromagnéticos inteligentes y procesado de señal y en este trabajo se ha centrado en determinar qué cambios hay que realizar para lograr trabajar en la banda de frecuencias establecida por la nueva regulación.

Los radares pasivos son dispositivos de gran interés, puesto que son capaces de anticiparse y prevenir amenazas a las que nos podemos enfrentar.

A medida que hemos ido avanzando en los campos tecnológicos, hemos podido confirmar la viabilidad que tienen los radares pasivos capaces de detectar blancos y estimar parámetros como son la posición o la velocidad, esto se consigue a partir de la energía que es dispersada por ellos mismos.

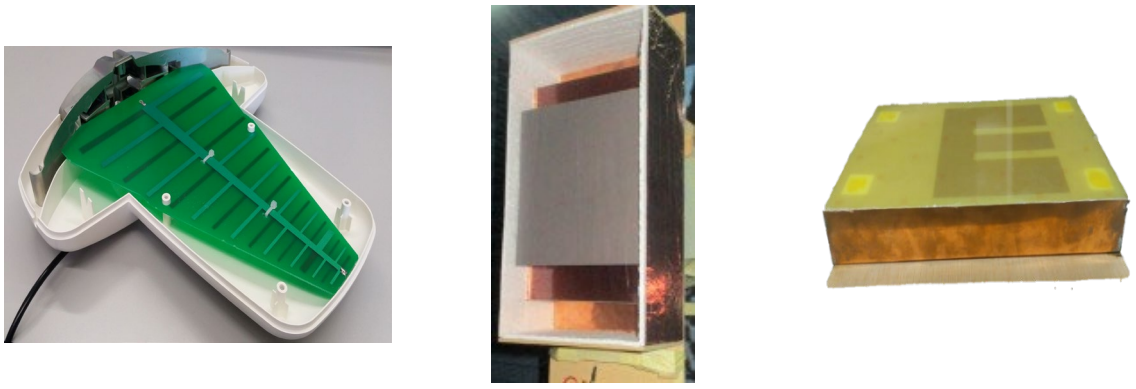
Los radares pasivos destacan por su bajo coste de desarrollo, mantenimiento y despliegue, además de no estar sometidos a la legislación por su escaso impacto medioambiental.

Los radares pasivos no cuentan con un trasmisor propio, sino que se aprovechan de trasmisores del entorno o iluminadores de oportunidad. En este TFG se considera la explotación de señales ofrecidas por las transmisiones de TDT cuyo espectro ha sufrido una nueva actualización del segundo dividendo digital [2], para liberar la banda de los 700MHz destinada al despliegue de la red 5G.

Objetivos

El propósito de este trabajo es optimizar dos antenas previamente diseñadas por el grupo de investigación Redes de sensores acústicos y electromagnéticos inteligentes y procesado de la señal para el demostrador IDEPAR para el nuevo espectro de la TDT. La versión actual de IDEPAR cuenta con tres posibles sistemas de antenas para el canal de vigilancia:

- Un Array de 5 elementos comerciales "Televés 4G Nova" aptas para operar en la banda de frecuencias entre 690 y 790 MHz. Son los elementos empleados antes del primer dividendo digital. Se trata de antenas de tipo log-periódicas construidas en tecnología microstrip.
- Un array de 7 antenas de parche, para funcionar con el demostrador radar pasivo IDEPAR. La banda de frecuencia de estas antenas es entre 590 y 790 MHz. Se trata de antenas basadas en parche circular modificado y con alimentación por acoplamiento mediante una apertura en forma de H [3].
- Una antena de parche con substrato grueso de aire diseñado para la posible operación en Array, con señales de polarización vertical. Esta antena es de tipo E. La TDT en España tiene polarización horizontal, pero los radares pasivos pueden utilizar polarización ortogonal como una medida para reducir el impacto producido por la recepción de la señal transmitida por el iluminador de oportunidad por el canal de vigilancia [4].



a) b) c)

Fig. 2-1 Antenas del demostrador IDEPAR

El objetivo principal del TFG es estudiar si es posible ajustar la banda de frecuencia de trabajo de los elementos actuales, para las nuevas frecuencias de la TDT tras el segundo dividendo digital que se llevó a cabo en octubre de 2020. Tras este dividendo la nueva banda de operación será entre 470 y 694 MHz y las soluciones que se encuentran en este TFG podrán ser integradas en el demostrador IDEPAR para su operación en esta nueva banda frecuencial.

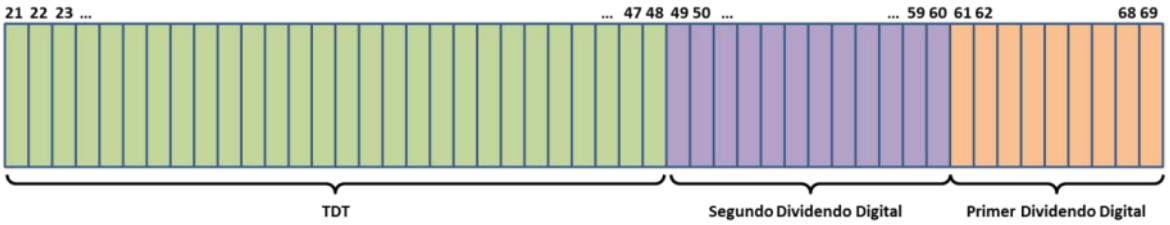


Fig. 2-2 Segundo Dividendo Digital [2]

El trabajo se centrará en la optimización de las siguientes antenas:

- Antena "Televés 4G Nova" (se trata de una antena log-periódica).
- Antena de parche tipo E.

Mediante el software de simulación electromagnética ANSYS HFSS [3], se estudiará los modelos 3D de dichas antenas, sus parámetros y cómo afectan los cambios de dichos parámetros en la adaptación de la antena dependiendo de la frecuencia, es decir, se analizará las variaciones del parámetro S_{11}.

Tras esta investigación, se aplicarán algoritmos de optimización para lograr un ancho de banda de adaptación y poder capturar correctamente la señal de la banda baja de la TDT, aproximadamente entre 470 y 590 MHz (lo que significa un ancho de banda relativo del 20%). Posteriormente se comprobará el cumplimiento de los requisitos necesarios en cuanto a diagrama de radiación, para el correcto rendimiento del demostrador radar pasivo (ganancia, ancho de haz y lóbulo trasero).

Finalmente, se verificará la viabilidad de integrar las antenas diseñadas en un array lineal de antenas para el canal de vigilancia del demostrador IDEPAR. Se estudiará el rendimiento del array: acoplamiento entre elementos, ganancia máxima del haz, nivel de los lóbulos laterales, aparición de grating lobes (réplicas del lóbulo principal) y margen de apuntamiento electrónico.

CAPÍTULO 2

Capítulo 3
FUNDAMENTO TEÓRICO

Antenas

Podemos dar una definición de antena a partir de un diccionario, que sería "Dispositivo (generalmente metálico) para irradiar o recibir ondas de radio". Mientras que el IEEE (Institute of Electrical an Electronic Engineers) lo define como: "Aquella parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas". En resumen, una antena es la estructura transicional entre el espacio libre y la línea de transmisión. La línea de transmisión puede tomar forma de coaxial o de guía de onda, además es usado para transportar energía electromagnética desde la fuente de trasmisión a la antena o desde la antena al receptor (Figura 3-2)

Se puede interpretar la antena como una línea de transmisión Thevenin (figura 3-1) con un modo de transmisión donde la fuente es representada por un generador ideal.

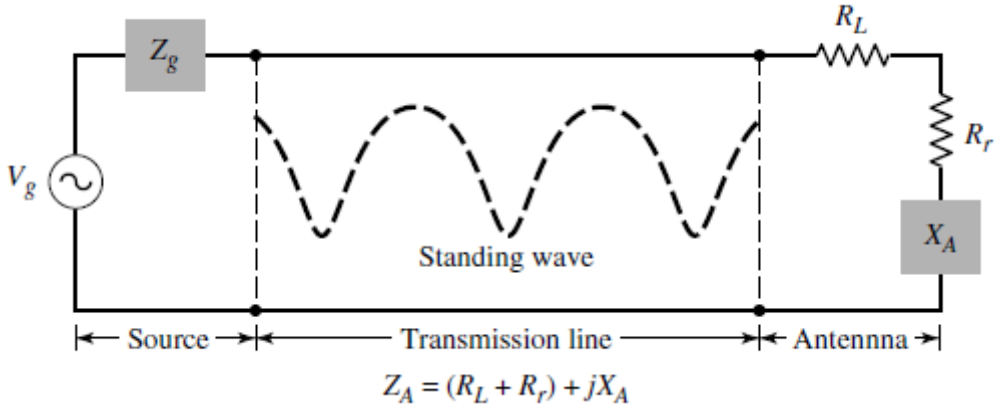


Fig. 3-1 Línea de transmisión Thevenin equivalente a una antena en modo de transmisión [7]

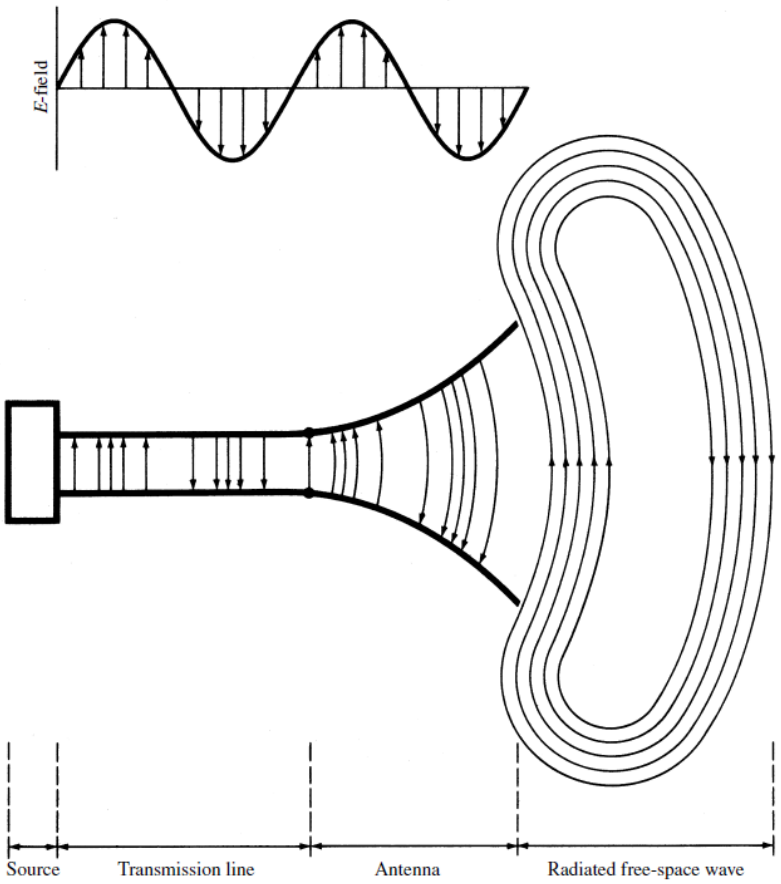


Fig. 3-2 Antena como dispositivo de transición [7]

Tipos de antena

A continuación, clasificaremos las antenas según su geometría:

Antenas de hilo

Son antenas bastante comunes que se basan en conductores finos para generar las ondas electromagnéticass radiadas. Se usan tanto de forma aislada o como elementos de un array.

De las antenas de hilo, destacamos los siguientes tipos:

- Hélice
- Dipolo
- Circular

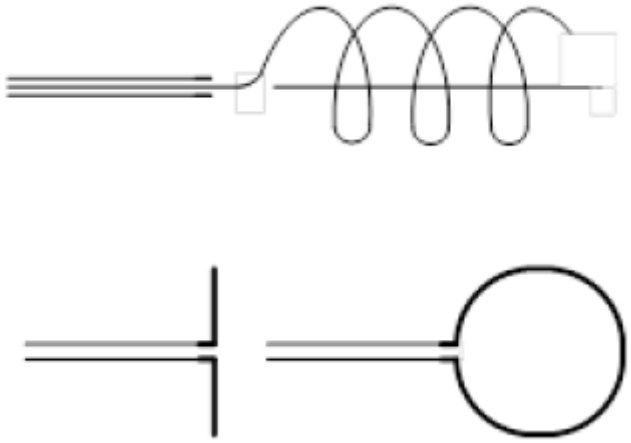


Fig. 3-3 Antenas de hilo [8]

En la figura 3-3 la primera es la antena de hilo tipo hélice, abajo a la izquierda antena de hilo tipo dipolo y por último la de abajo a la derecha es una antena de hilo tipo circular.

Basándonos en la ecuación de Maxwell, relacionaremos la corriente sobre la antena para poder calcular los campos radiados. Gracias a estos campos radiados, calcularemos sus parámetros: directividad, diagrama de radiación, polarización, ancho de haz y resistencia de radiación.

En las figuras 3-4, 3-5 y 3-6 se muestran los resultados de simular un dipolo $\lambda/2$ con la herramienta Software Matlab.

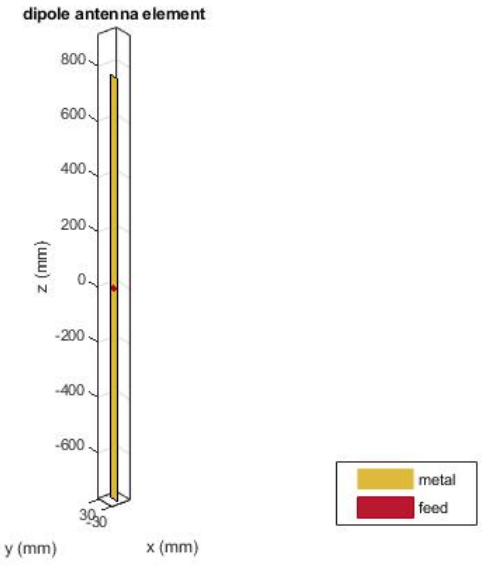


Fig. 3-4 Dipolo λ/2 adaptada a la frecuencia 98MHz

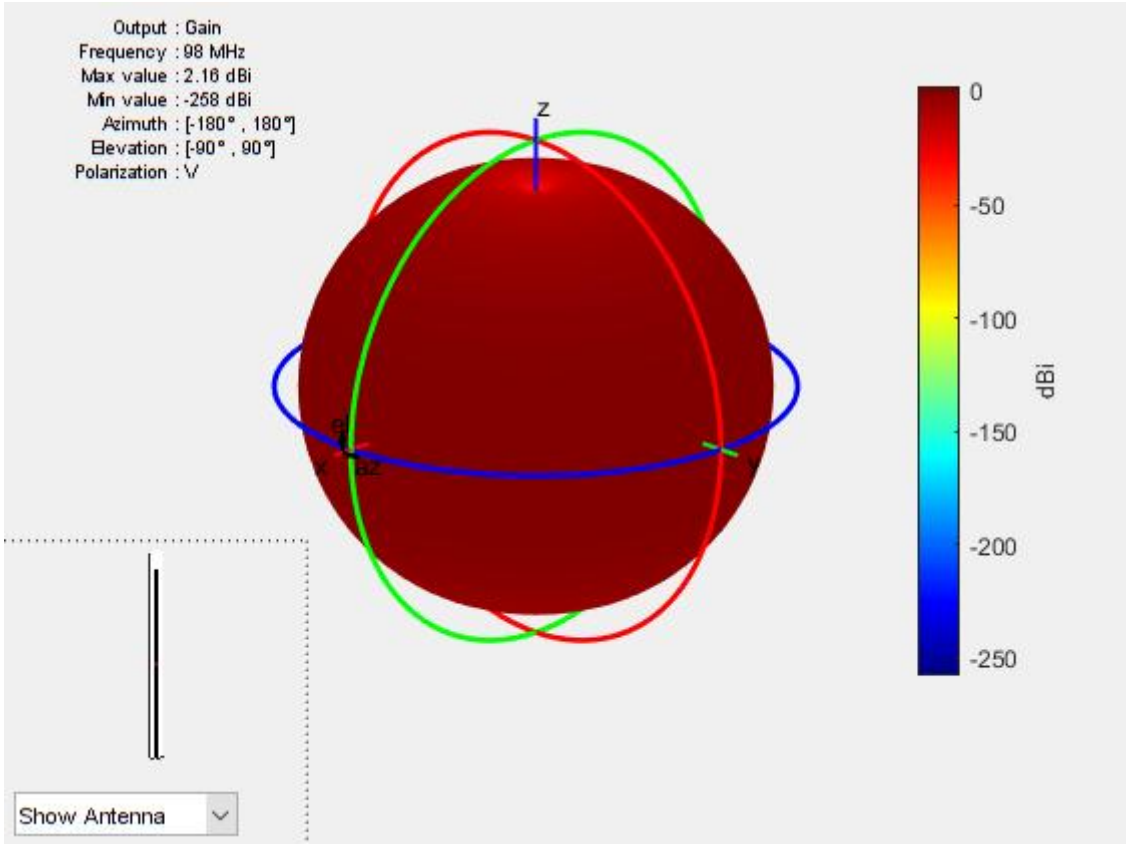


Fig. 3-5 Diagrama de radiación 3D del dipolo λ/2 a la frecuencia 98MHz

Observamos en el diagrama de radiación de la figura 3-5 que se trata de una antena omnidireccional en azimut y con un diagrama en forma de ocho en elevación. Su máximo valor de directividad es de 2,16 dBi.

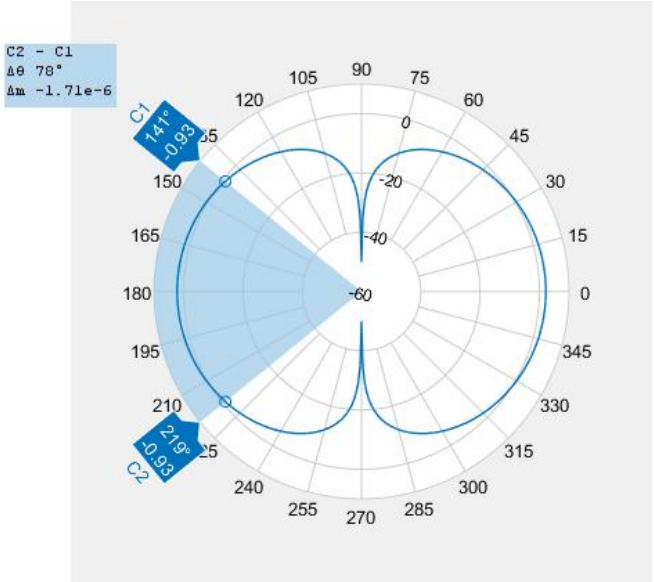


Fig. 3-6 Diagrama de radiación en elevación del dipolo λ/2 a la frecuencia 98MHz

Antenas de apertura

Su uso ha sido demandado al ofrecer servicios a frecuencias más altas que requieren mayor directividad.

Antenas de apertura clásicas:

- Bocas de guía
- Bocina
- Ranuras

Fig. 3-7 Antenas de apertura [7]

En la figura 3-7 la primera antena se trata de una antena de apertura de tipo boca de guía, la segunda es una antena de apertura de tipo bocina y la última es una antena de apertura de tipo ranura.

Estas antenas, se caracterizan porque el tamaño de la apertura de salida está directamente relacionado con su directividad. son mucho más directivas que las antenas de hilo, como, por ejemplo, los dipolos. También podemos destacar que aumentando las dimensiones de la antena podremos conseguir que sean más directivas, cosa que con los dipolos no se podía hacer.

En la figura 3-9 se presenta el diagrama de radiación de radiación 3D de una antena rectangular con las siguientes características:

- Frecuencia de diseño: 6Ghz
- Tamaño de la guiaonda:
  - Anchura=0.03
  - Longitud=$\lambda/2$
- Tamaño de la apertura: Figura 3-8

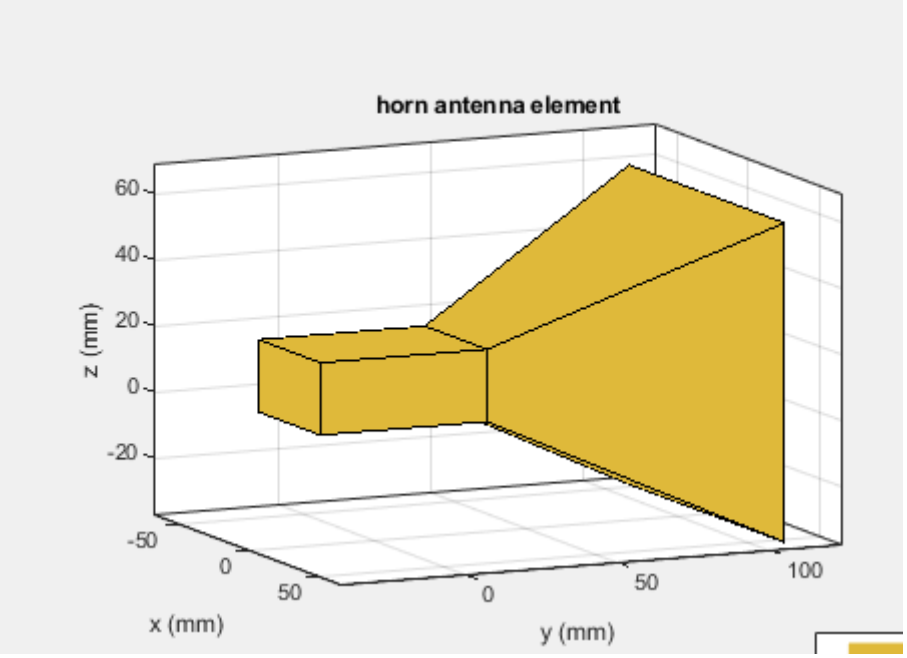


Fig. 3-8 Dimensiones de la antena de bocina diseñada a la frecuencia 6GHz

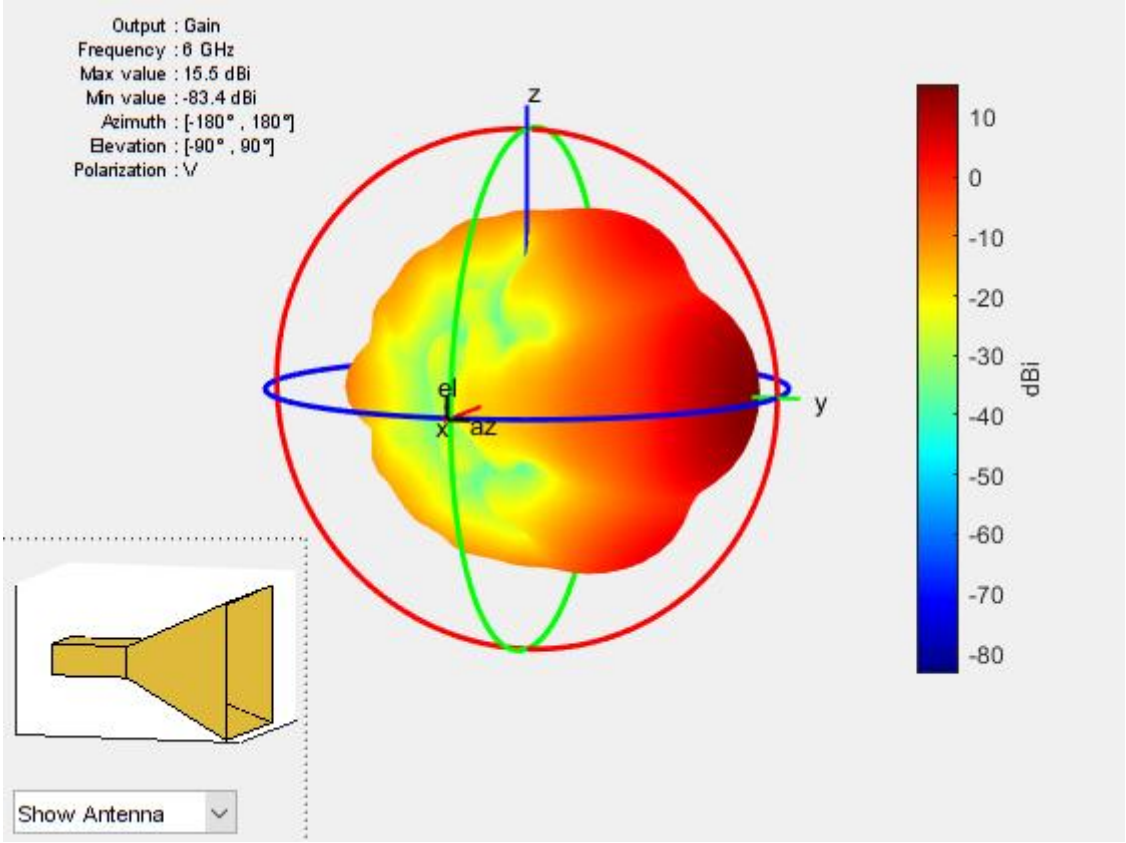


Fig. 3-9 Diagrama de radiación 3D de una antena de bocina diseñada a la frecuencia 6GHz

En la figura 3-9 se presenta el corte en azimut del diagrama de radiación de la misma antena que presenta una directividad de 15,5 dBi y un ancho de haz a 3 dBs, en esta dimensión, de 32º.

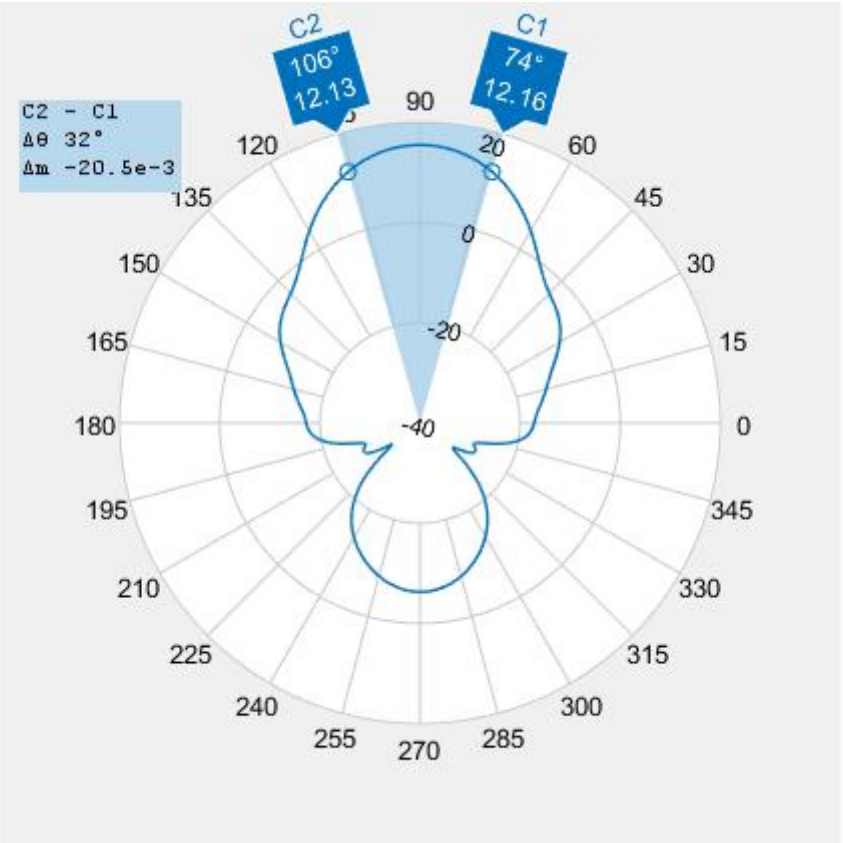


Fig. 3-10 Diagrama de radiación en azimut de una antena de bocina diseñada a la frecuencia 6GHz

Antenas microstrip

Comenzaron a hacerse populares por 1970 y desde entonces no han parado de evolucionar por su capacidad de integración en cualquier estructura.

Consisten en un parche metálico sobre un substrato y un plano de masa.

Se puede destacar que son antenas de perfil bajo, simples y económicas de fabricar.

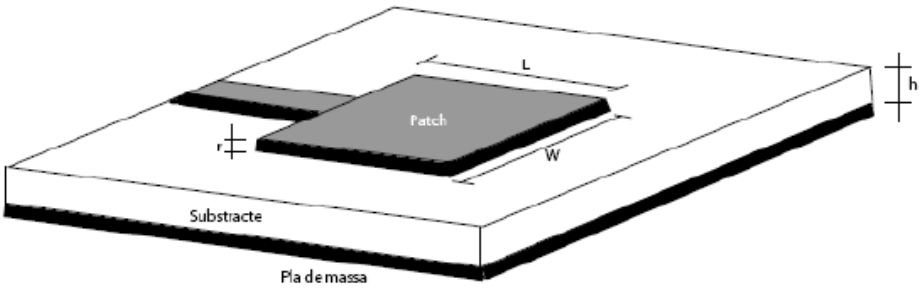


Fig. 3-11 Antena microstrip [8]

Antenas con reflectores

Son antenas formadas por un alimentador primario y un reflector, generalmente con perfil parabólico (Figura 3-12). Estas antenas surgen por la gran directividad que son capaces de ofrecer para servicios de comunicación que requieren grandes distancias.

Fig. 3-12 Antena con reflector parabólico

Array de antenas

Como bien indica su nombre se trata de una agrupación de antenas con el fin de conseguir unas determinadas características de radiación.

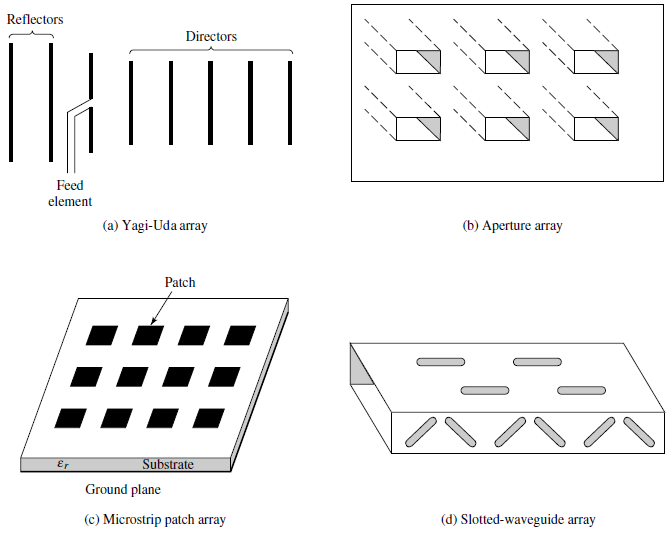


Fig. 3-13 Algunos tipos de configuraciones de arrays

Parámetros de las Antenas

Impedancia de entrada

Una antena es un dispositivo de un puerto, que presenta una impedancia en los terminales que relaciona la tensión y la corriente en la parte del terminal. Esta impedancia tiene una parte real y una parte imaginaria que se define de la siguiente forma:

$$Z_A = R_A + jX_A$$

En la figura 3-14 se pueden identificar cada uno de estos parámetros,

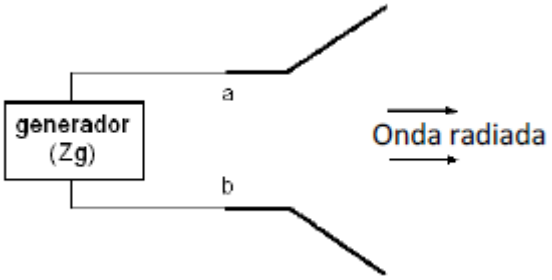


Fig. 3-14 Antena en modo transmisión

- Z_A: Impedancia de la antena entre a-b
- R_A: Resistencia de la antena entre a-b
- X_A: Reactancia de la antena entre a-b

En la figura 3-15 se muestra el circuito equivalente en Thevenin o Norton.

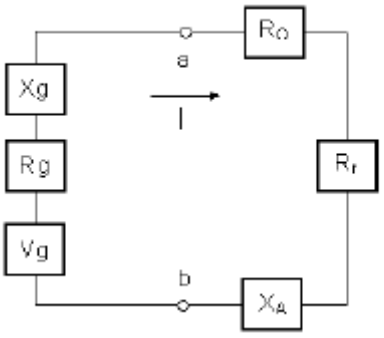


Fig. 3-15 Equivalente Thevenin [8]

$$Z_A = R_r + R_\Omega + jX$$

- R_r: Resistencia de radiación, es el valor que disiparía la misma potencia que la radiada por la antena
- R_Ω: Resistencia de pérdidas, representando las pérdidas que se producen en la antena, en los conductores y dieléctricos.
- X Parte imaginaria

Las dos primeras resistencias en conjunto formarían la resistencia de la antena R_A.

Ancho de banda

El ancho de banda es el rango de frecuencias en el cual el rendimiento de la antena con respecto alguna característica, conforma un estándar especifico.

Si nos referimos a la impedancia, sabremos que una antena está adaptada cuando el coeficiente de onda estacionaria (ROE) es menor a un valor prefijado.

$$ROE = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

Donde ρ es el coeficiente de reflexión, que lo calcularemos a partir de la impedancia de la antena (Z_L) y la impedancia característica (Z_0).

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Cuando la ROE<3 se puede considerar que la antena está adaptada.

Mientras que, si nos referimos al diagrama, tendremos que ver las acepciones que tenemos. La ganancia de la antena no disminuye de un valor respecto al máximo. Como todos sabemos, es el ancho de banda a -3 dB.

Cuando tenemos la antena de un solo puerto, tenemos que observar el parámetro S_{11}, el cual es el coeficiente de reflexión.

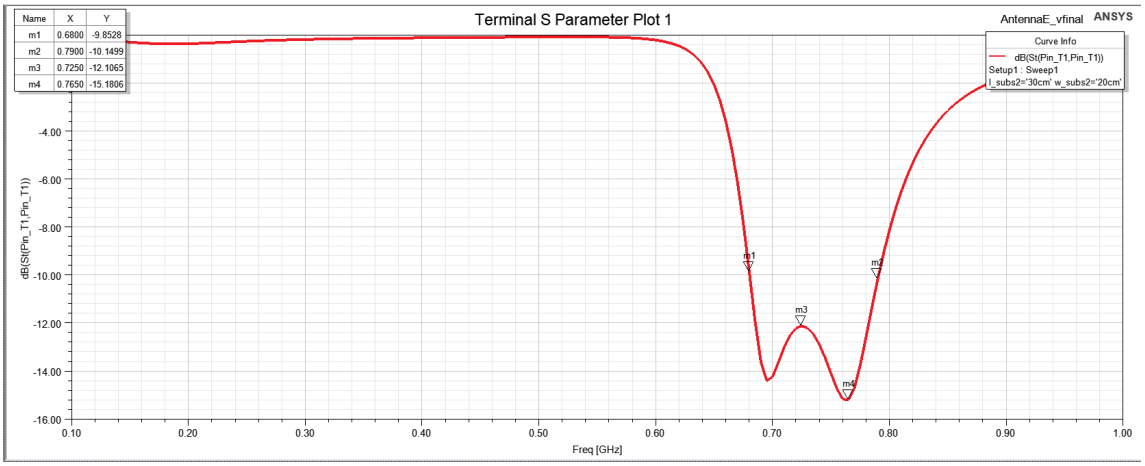


Fig. 3-16 Parámetro S_{11} antena de parche [6]

En este TFG, se hará el estudio del parámetro S_{11}<=-10 dB, luego se calculará el ancho de banda en valores relativos de la siguiente manera:

$$BW(^0/_0) = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \cdot 100$$

Diagrama de radiación

Definimos el diagrama de radiación como la representación gráfica de las propiedades de radiación de antena en función de las coordenadas espaciales, a una distancia fija. Se utilizan las coordenadas esféricas (r,ϴ,ϕ).

Con el diagrama de radiación podemos representar el campo eléctrico, magnético o la densidad de potencia radiada. El campo magnético se deriva directamente del eléctrico, la representación podría hacerse a partir de cualquiera de los dos.

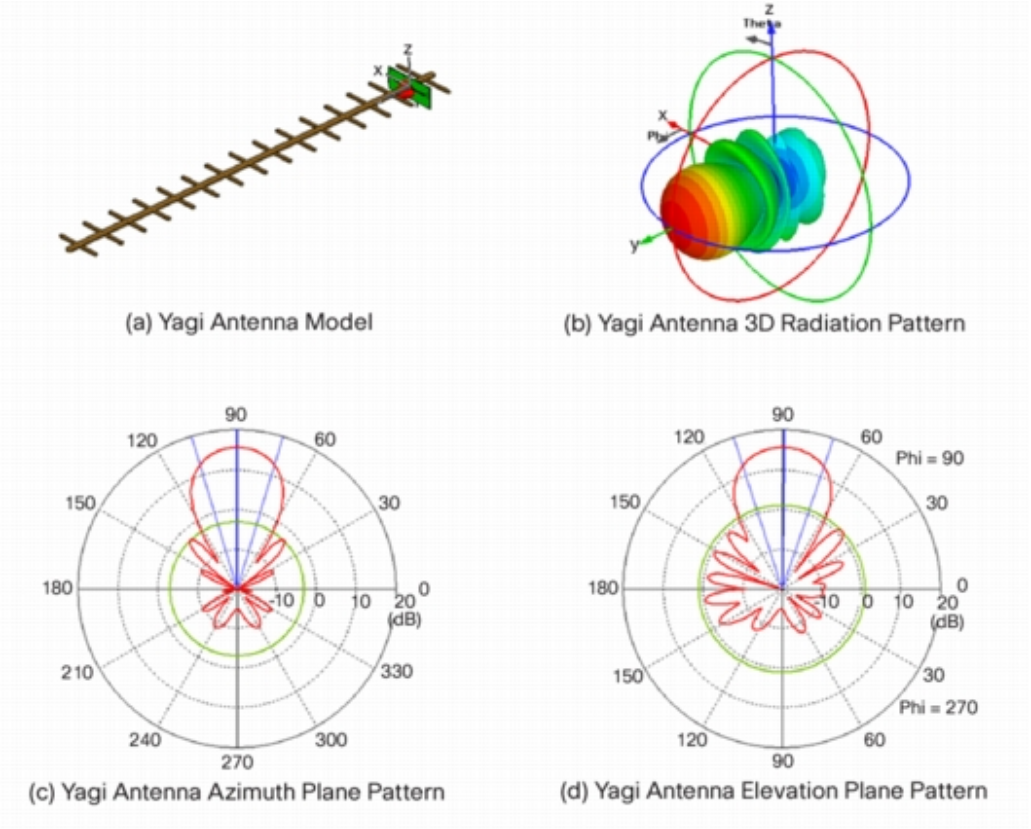


Fig. 3-17 Diagramas de radiación 3D y 2D de una antena Yagi

También, podemos definir algunos parámetros característicos que se pueden observar en un diagrama de radiación:

- Lóbulo principal: Zona en la que la radiación es máxima.
- Lóbulos laterales: Zona que rodea los máximos de menor amplitud.
- Lóbulo secundario: Lóbulo lateral de mayor amplitud.
- Lóbulo posterior: Zona opuesta al lóbulo principal.
- Ancho de haz a 3dB: Separación angular de las direcciones en las que el

diagrama de radiación de potencia toma el valor mitad del máximo.

- Ancho de haz entre ceros: Separación angular en las direcciones del espacio en las cuales el lóbulo principal toma un valor nulo.
- Relación delante atrás (FDR, Front-to-Back Ratio): cociente entre el lóbulo principal y el lóbulo posterior.
- Relación lóbulo principal a secundario (SLL): Cociente entre el lóbulo principal y el lóbulo secundario, que suele ser adyacente al lóbulo principal.

En las antenas que están linealmente polarizadas las definimos en los siguientes planos:

- Plano E: Donde la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en esa dirección.
- Plano H: Donde la dirección de máxima radiación y el campo magnético en esa dirección.

Directividad

El International Electrotechnical Commission (IEC) define la directividad como "La relación de la intensidad de la radiación en una dirección dada desde la antena a la intensidad de la radiación promediada en todas las direcciones.".

Comentamos que una antena es muy directiva, cuando logra concentrar la potencia que radio en una dirección concreta.

Definimos la directividad de una antena teniendo en cuenta su dirección angular a partir de la expresión matemática:

$$D(\theta,\varphi) = \frac{P(\theta,\varphi)}{\frac{Pr}{4\pi r^2}}$$

Cuando no nos referimos a su dirección angular, diremos que se está refiriendo a la dirección máxima de radiación, y se expresará de la siguiente manera [10]:

$$D = \frac{P_{\max}}{\frac{Pr}{4\pi r^2}}$$

Eficiencia de radiación

Como se ha contado al definir la impedancia de entrada de una antena, ésta está formada por una parte real y una parte imaginaria. A partir de estos conceptos podemos definir que la eficiencia de radiación como la relación de la potencia radiada y la potencia entregada por la antena.

$$\eta_r = \frac{P_r}{P_r + P_\Omega} = \frac{I^2 \cdot R_r}{I^2(R_r + R_\Omega)} = \frac{R_r}{R_r + R_\Omega}$$

Ganancia

Definimos la ganancia como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, a igualdad de distancias y potencias entregadas a la antena.

Este parámetro lo podemos relacionar con la directividad, no solo porque estos dos parámetros dependan de las coordenadas esféricas, sino que también nos referiremos a la directividad y a la ganancia máxima cuando no es más que el máximo de su función [11].

Tenemos la siguiente expresión matemática para definir la ganancia de la antena, cuando especificamos la dirección angular.

$$G(\theta, \phi) = \frac{p(\theta, \phi)}{\frac{w_e}{4\pi r^2}}$$

Cuando no especificamos la dirección angular, la ganancia será en la dirección de máxima radiación.

$$G = \frac{Pmax}{\frac{w_e}{4\pi r^2}}$$

Como hemos comentado más arriba, la ganancia y la directividad están relacionadas y a partir de la eficiencia obtenemos la siguiente expresión:

$$G(\theta, \phi) = \frac{P(\theta, \phi)}{\frac{P_A}{4\pi r^2}} = \frac{P_r}{P_A} \frac{P(\theta, \Phi)}{\frac{P_r}{4\pi r^2}} = \eta \cdot D(\theta, \phi)$$

Polarización

Es la polarización de la onda transmitida por la antena. Mientras que la polarización de la onda radiada es definida como la propiedad de la onda electromagnética que se describe en la dirección variada en el tiempo y la magnitud relativa del vector campo eléctrico.

Resumiendo, la polarización depende de la onda radiada por una antena en una dirección dada.

Tenemos estos tipos de polarización:

- Lineal
- Circular
- Elíptica

Radares

¿Qué es un radar?

Antes de introducirnos a que es un radar, deberíamos explicar el termino de radiodeterminación, que consiste en la determinación característica de objetos a partir de ondas electromagnéticas. Dentro de este campo podemos distinguir dos tipos de sistemas:

- Sistemas de radionavegación
- Sistemas de radiolocalización

Ahora que ya hemos explicado este término, podremos comentar lo primero de todo, de donde viene la palabra radar, ya que se trata de un acrónimo inglés, **ra**dio **d**etection **a**nd **r**anging. Daremos una definición de Radar a partir del IEEE Standard Radar Definitions (IEEE Std 686-2008), en el que define al radar como un sistema electromagnético para la detección y localización de objetos. Usa ondas electromagnéticas, que, a partir de producir un impulso de radio, se reflejará en un objeto (blanco) y se recibe en la misma posición donde lo hemos emitido. Esto se llama eco, donde obtendremos información.

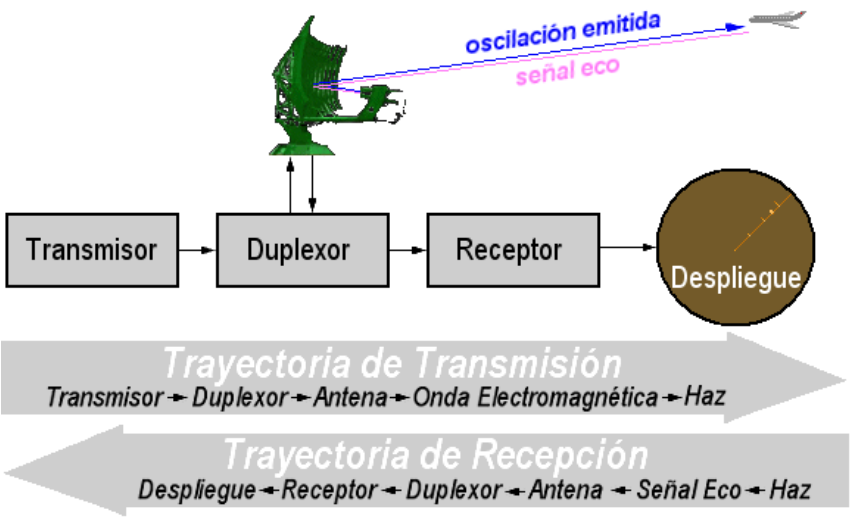


Fig. 3-18 Principio básico fundamental de un radar [12]

Con esto podremos determinar la distancia, dirección y a la altura donde se encuentra el blanco.

Contexto histórico

Principalmente el radar se ha podido llevar a cabo, porque en 1865 James Clerk Maxwell desarrolló su teoría electromagnética. En 1886 tarde Heinrich Rudolf Hertz descubre las ondas electromagnéticas, probando, así como las señales eléctricas pueden viajar a través del aire libre.

La primera vez que podemos decir que se puso en práctica un radar, fue en 1904 cuando el alemán Christian Hülsmeyer inventó el telemobiloscopio, eso media el tiempo en que las ondas electromagnéticas se demoran en ir y regresar al golpear contra un metal.

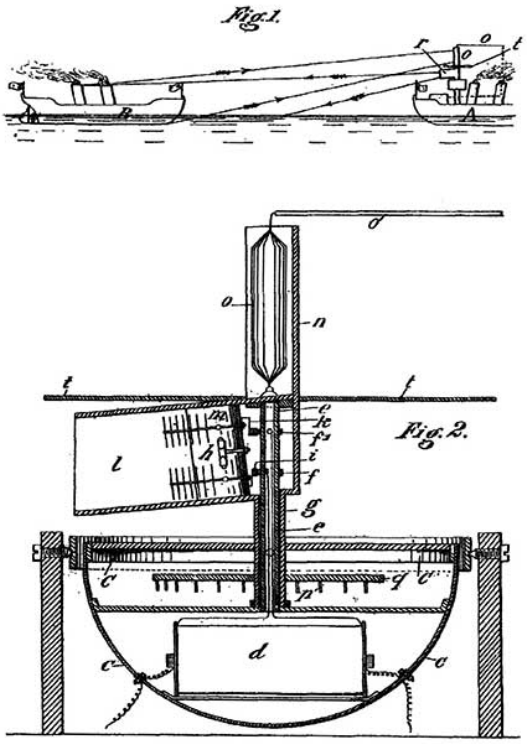


Fig. 3-19 Telemobiloscopio [Megger, marzo 2021]

Determinación de la distancia

Podremos medir la distancia entre el radar y el blanco, transmitiendo un pulso electromagnético, con el eco que se genera, se podrá medir el tiempo que tardamos en recibirlo.

Calcularemos el rango o distancia, medida en km, a partir de la siguiente fórmula:

$$R = \frac{c \cdot t}{2}$$

Ángulo de elevación

El ángulo de elevación es un ángulo vertical, donde la dirección de referencia hace que el ángulo valga 0º. Este ángulo se puede designar con la letra Ɛ, obteniendo un valor positivo cuando está por encima del horizonte y un valor negativo cuando está por debajo.

Alcance mínimo medible

Viene definido en un radar que usa la misma antena para trasmitir y recibir en función del tiempo de transmisión que no se puede recibir. Se calcula de la siguiente manera:

$$R_{min} = \frac{c \cdot (\tau - t_r)}{2}$$

Donde τ es el tiempo de transmisión y t_r es el tiempo de recuperación, este último debe ser lo más corto posible.

Ecuación radar

La ecuación radar es una expresión matemática que describe el balance energético de la propagación de ondas electromagnéticas. Primero se definirán términos de esta ecuación.

Pérdidas en espacio libre

Son las pérdidas de intensidad de la señal de una onda electromagnética cuando estamos en una trayectoria de una línea de visión en espacio libre, en condiciones ideales.

Para poder calcular estas pérdidas, tendremos que ponernos en contexto, cuando transmitimos energía se hace en todas las direcciones, por tanto, deberemos tener en cuenta el área y la potencia transmitida, por tanto, calcularemos la potencia por unidad de área de la siguiente manera:

$$S = \frac{P_t}{4 \cdot \pi \cdot R^2}$$

También deberemos tener en cuenta la potencia recibida, que viene relacionada con la apertura de la antena, pues que la antena capta la onda electromagnética, se calculará a partir de la siguiente expresión:

$$P_r = \frac{S \cdot \lambda^2}{4\pi}$$

Por último, las pérdidas por espacio libre vienen dadas por la relación entre la potencia transmitida y recibida:

$$L_{bf} = \frac{P_t}{P_R} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2$$

Derivación de la ecuación radar

Si en lugar de una antena isotrópica, se cuenta con una antena directiva tenemos que actualizar la forma de calcular la potencia por unidad de área:

$$S_g = S \cdot G = \frac{P_t}{4\pi R^2} \cdot G$$

Para poder determinar cuál es la potencia reflejada útil, tendremos que saber cuál es la sección transversal del radar, σ. Ya que para detectar un blanco debemos tener en cuenta la potencia reflejada desde el blanco hacia el radar.

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi R^2} \cdot G \cdot \sigma$$

Ahora bien, sabiendo cual es la potencia reflejada podremos determinar la densidad de potencia en el receptor, S_e.

$$S_e = \frac{P_r}{4\pi R^2}$$

Y con esta, determinar la potencia recibida teniendo en cuenta cual es el área efectiva de la antena que posee el radar, que nombraremos como A_{eff}, a partir de aquí, tendremos la expresión de la potencia.

$$P_e = S_e \cdot A_{eff} = \frac{P_r}{4\pi R^2} Aeff = \frac{P_t}{(4\pi R^2)^2} \cdot G \cdot \sigma \cdot Aeff$$

Finalizando, para definir la ecuación de transmisión del radar, a partir de la relación entre la potencia recibida y la potencia transmitida.

$$\frac{P_e}{P_t} = \frac{G \cdot \sigma \cdot A_{eff}}{(4\pi R^2)^2}$$

De esta última ecuación podremos despejar para calcular el rango, R, y de ahí determinar un rango máximo que dependerá de un factor de propagación del transmisor al blanco y del blando al transmisor F_t y F_r respectivamente. Como el alcance máximo de un radar, debe describirse como un proceso probabilístico, la S_{min} es la naturaleza estadística, que es determinada por el ruido del receptor, los ecos recibidos y la sección del blanco.

$$R\max = \left[\frac{P_t \cdot G \cdot \sigma \cdot A_{e_{ff}} \cdot F_t^2 F_r^2}{(4\pi)^2 s_{min}}\right]^{\frac{1}{4}}$$

Clasificación de los sistemas radar

A partir de la tecnología y las cualidades que se usan, los radares los podemos clasificar de diferentes maneras.

Radares de generación de imágenes y radares de medición

Estos radares se utilizan para generar un mapa de una zona a partir de la información que reciben, como puede ser en el caso de los radares de meteorología, aviación, barcos.

Mientras que, si nos referimos a los radares de medición, solo obtenemos información numérica al realizar las mediciones, ya que incluyen algún medidor, como, por ejemplo, uno de velocidad. Estos radares entonces son los que se usan como tráfico.

Radar primario

Los radares primarios son radares activos que cuentan con un transmisor dedicado se centran en la detección de blancos no cooperativos.

Dentro de los radares primarios podemos desglosarlos en más tipos de radares

- Radares pulsados: Estos radares generan una señal pulsada de alto valor en potencia y frecuencia, siguiendo a esto tendremos una pausa más larga a la hora de recibir los ecos, por lo que tardaremos más en generar una nueva señal. Con estos radares podemos obtener varios parámetros del blanco detectado, como puede ser su posición.
- Radares de onda continua: Estos radares están continuamente irradiando potencia de transmisión, aunque no tenga interrupción, seguimos recibiendo los ecos. Lo que destacamos de estos radares, es que el receptor, no hace falta que este colocado en el mismo sitio que el transmisor.

Radar secundario

Para poder usar estos radares, los blancos. Deben estar equipados con un

transpondedor para así poder recibir la señal. Posteriormente codificará esa señal y y comunicarse con el radar. Es decir, se trata de blancos cooperativos.

Radares pasivos

Los radares pasivos se caracterizan por detectar blancos de forma pasiva, es decir no emiten ninguna radiación, utilizan señales que hay en el entorno. Al no emitir ninguna señal, se puede decir que estos radares son indetectables. Como hemos dicho, funcionan a partir de señales procedentes de otras tecnologías, como puede ser el TDT, que serán utilizados como iluminadores de oportunidad podremos detectar los blancos. Gracias a esto, podremos reducir el coste.

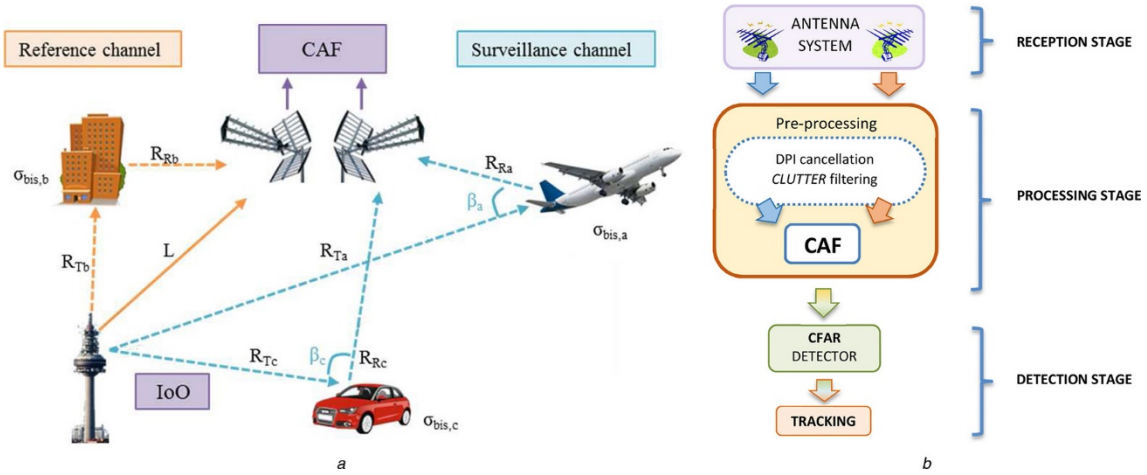


Fig. 3-20 Esquema de un radar pasivo que usa IoO de TDT

En la anterior ilustración vemos una serie de parámetros:

- L: línea de la base.
- R_{R_i} y R_{T_i}: Son las distancias del radar al objetivo y del objetivo al iluminador de oportunidad.
- β_i: Ángulos biestáticos definidos por $R_{R_i} y$ R_{T_i}
- $\sigma_{bis,i}$: Son los objetivos

El principio de funcionamiento se basa en la función de ambigüedad cruzada, CAF (Cross Ambiguity Function), que es la correlación entre la señal de vigilancia y copias desplazadas en Doppler, produciendo así una copia escalada de la función de ambigüedad de la señal.

Los radares pasivos pueden tener una configuración multiestática de de la siguiente manera:

- Sistemas angulares: Utilizan los ángulos característicos de las antenas, tanto de la emisora como de la receptora. Tienen que usar dos antenas directivas o realizar un barrido de sincronización para realizar una exploración. Tienen la posibilidad de usar altas PRF y también pueden usar el tiempo de retardo del eco para realizar un ajuste más perfeccionista de la posición.
- Sistemas temporales: Utilizan los parámetros característicos de la antena más directiva, siempre suele ser la receptora, también se usará el tiempo de retardo del eco. Estos sistemas pueden usar antenas omnidireccionales y usan una PRF menor que los anteriores.

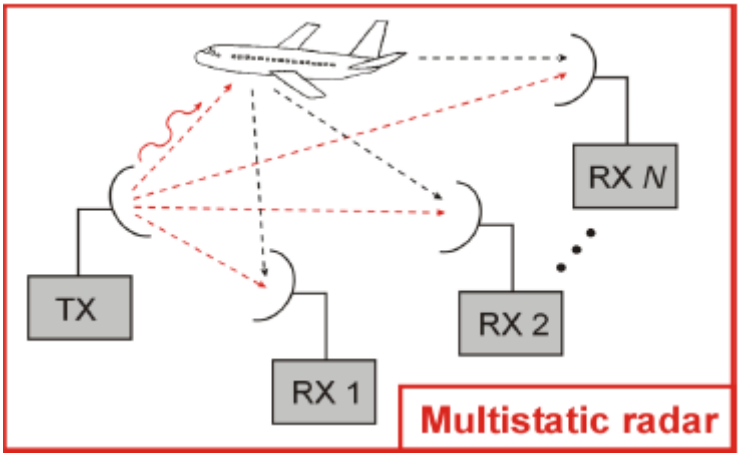


Fig. 3-21 Radar multiestático [Apuntes Radiodeterminación y Radar, marzo 2021]

IDEPAR

El grupo de investigación Redes de sensores acústicos y electromagnéticos inteligentes y procesado de señal ha desarrollado un demostrador llamado IDEPAR.

Un sistema radar pasivo capaz de explorar diferentes Iluminadores de oportunidad, en este caso el TDT, DAB, FM, UMTS.

El demostrador IDEPAR utiliza como plataforma de investigación para desarrollar y validar los algoritmos.

Este TFG se centra en las señales TDT. En España, el estándar que se utiliza para la TDT se basa en el uso de modulación COFDM (Multiplexado por división de frecuencia ortogonal codificada) para ofrecer una señal robusta frente al multitrayecto. Este estándar permite diferentes codificadores como el modo 2k (zonas geográficas

reducidas) y el modo 8K (zonas geográficas extensas). Transmite audio, video y otros datos a través de codificaciones MPEG-2.

El espectro de la TDT acaba de sufrir el Segundo Dividendo Digital que es un proceso por el cual se va a liberar la banda de 700 MHz para desplegaren ellas las futuras redes de telecomunicaciones 5G. Las antenas del canal de vigilancia de la versión actual de IDEPAR no están optimizadas para la banda 474-690 MHz. En los siguientes capítulos presentaremos los resultados para actualizar las antenas y mejorar las prestaciones del sistema IDEPAR.

Capítulo 4
RESULTADOS

En este capítulo se estudiarán dos tipos de antenas diferentes, una comercial 4G Nova y una antena de parche tipo E previamente diseñada para la aplicación bajo estudio, con el objetivo de proponer modificaciones en ambas que permitan su adaptación en la nueva banda frecuencias de la TDT tras el segundo dividendo digital. Con los resultados, se procederá a realizar un array de 7 antenas, para cada caso, y se estudiarán sus características de radiación. Estos cambios permitirán al demostrador radar pasivo IDEPAR operar en la nueva banda de frecuencias de la TDT tras el segundo dividendo digital.

Ambas antenas están construidas en tecnología microstrip, también llamadas antenas de parche. Una antena de parche es un elemento radiante construido en un metal de alta conductividad (suele ser cobre) sobre un substrato. Se puede alimentar mediante una línea microstrip o un cable coaxial, de forma directa o mediante acoplamiento.

Para realizar este apartado, hemos partido de las antenas iniciales y a partir del empleo del software de simulación electromagnética ANSYS HFSS, estudiaremos el modelo de estas antenas, parámetros y como afecta la variación de dichos parámetros a la adaptación de la antena en función de la frecuencia (parámetro S11).

Antena Televés 4G Nova

Se trata de una antena comercial de Televés, es una antena de emisión y recepción de señales LTE/4G para la extensión de cobertura en zonas de difícil propagación. Es de tipo log-periódica construida en tecnología microstrip y es apta para operar en la banda de frecuencia de 698-790MHz o en la banda de 1700-2700MHz, con una ganancia entre 6.5-7.5 dBi. El estudio que se realizó se encontraba inicialmente en disposición de un array de 5 elementos [9], pero al cambiar al nuevo dividendo digital, haremos el estudio con un array de 7 elementos.

El modelo 3D de esta antena en el software de simulación electromagnética ANSYS HFSS, tiene esta disposición, pero posteriormente la modificaremos para poder realizar bien el estudio de las medidas y como iba afectando el cambiar ciertos

parámetros que hacían cambiar el propio dimensionado y estructura de la antena.

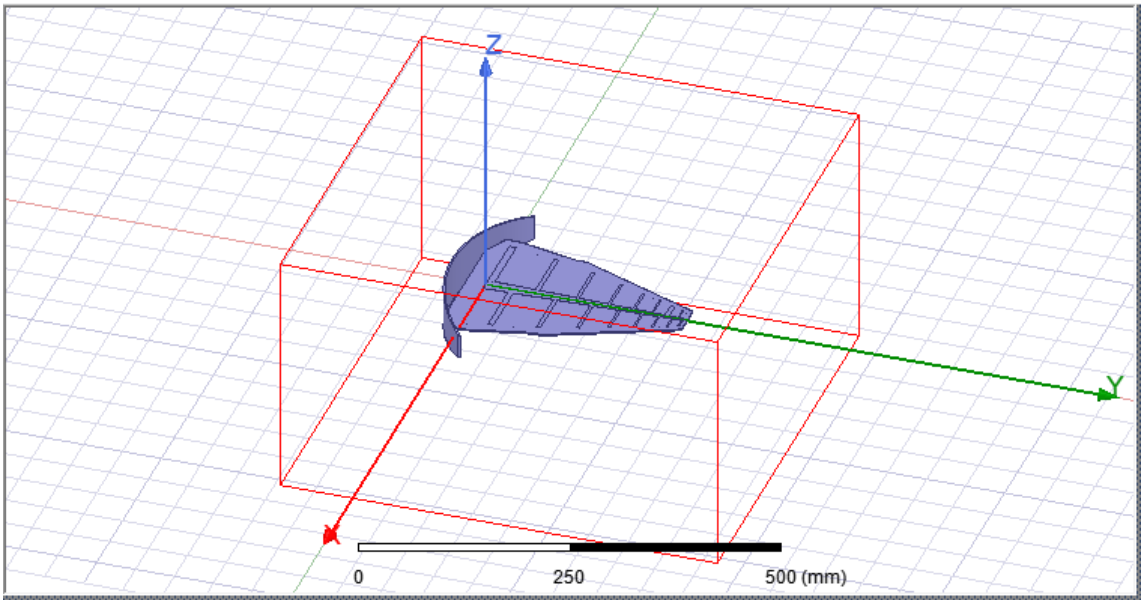


Fig. 4-1 Antena 4G Nova Televés [6]

Obteniendo así la siguiente gráfica del módulo del parámetro S_{11}.

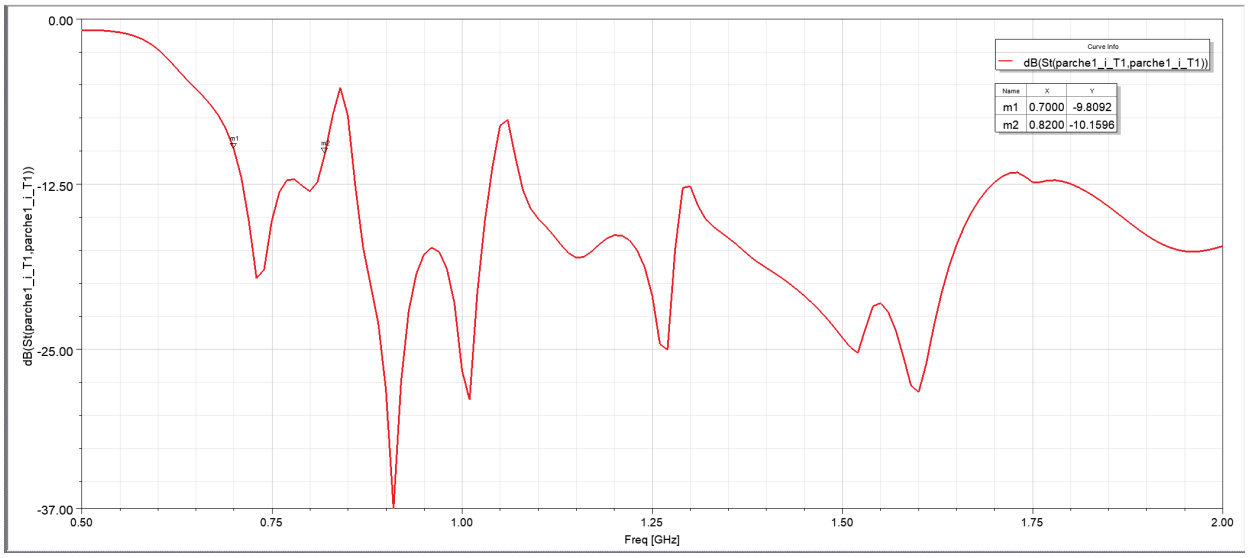


Fig. 4-2 Parámetro S11 [6]

Como se explicó anteriormente vamos a sacar el ancho de banda relativo a partir de estas medidas adquiridas, cuando el parámetro $|S_{11}|$ está por debajo de -10 dB. A partir de la fórmula:

$$BW(^0/_0) = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \cdot 100$$

Obtenemos un BW (%) = 16%

Posteriormente se adaptó la antena a la siguiente forma,

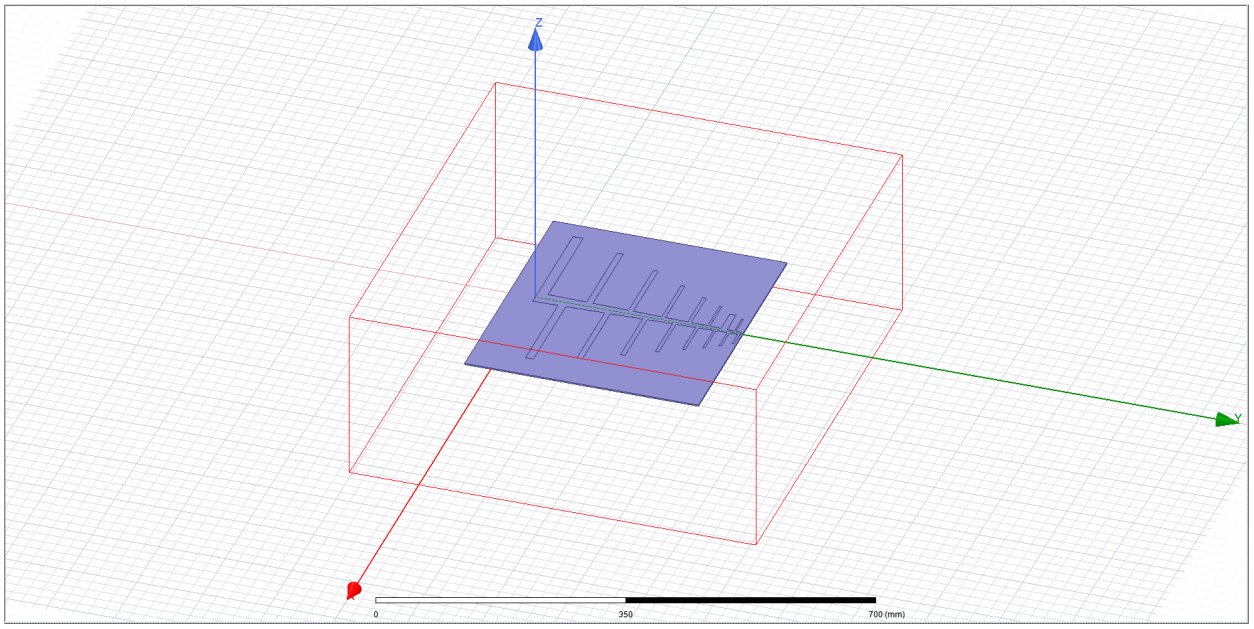


Fig. 4-3 Antena 4G Nova Televés adaptada [6]

Para facilitar la automatización del trabajo, mediante parametrizaciones y optimizaciones, se cambió la alimentación a *Driven Modal* para evitar la necesidad de asignar un terminar a cada cambio de parámetro que afecte a la alimentación. También se crearon diferentes variables, que son factores multiplicativos, que permiten agrandar o reducir de manera proporcionada las líneas microstrip que componen la antena.

Esta antena, está formada por dos partes, una con orientación en el lado izquierdo y en el lado derecho. Ambas se van a modificar de manera dependiente, es decir, se modificará la parte izquierda de igual manera que la parte derecha. Sus dimensiones se verán modificadas tanto en ancho como en largo.

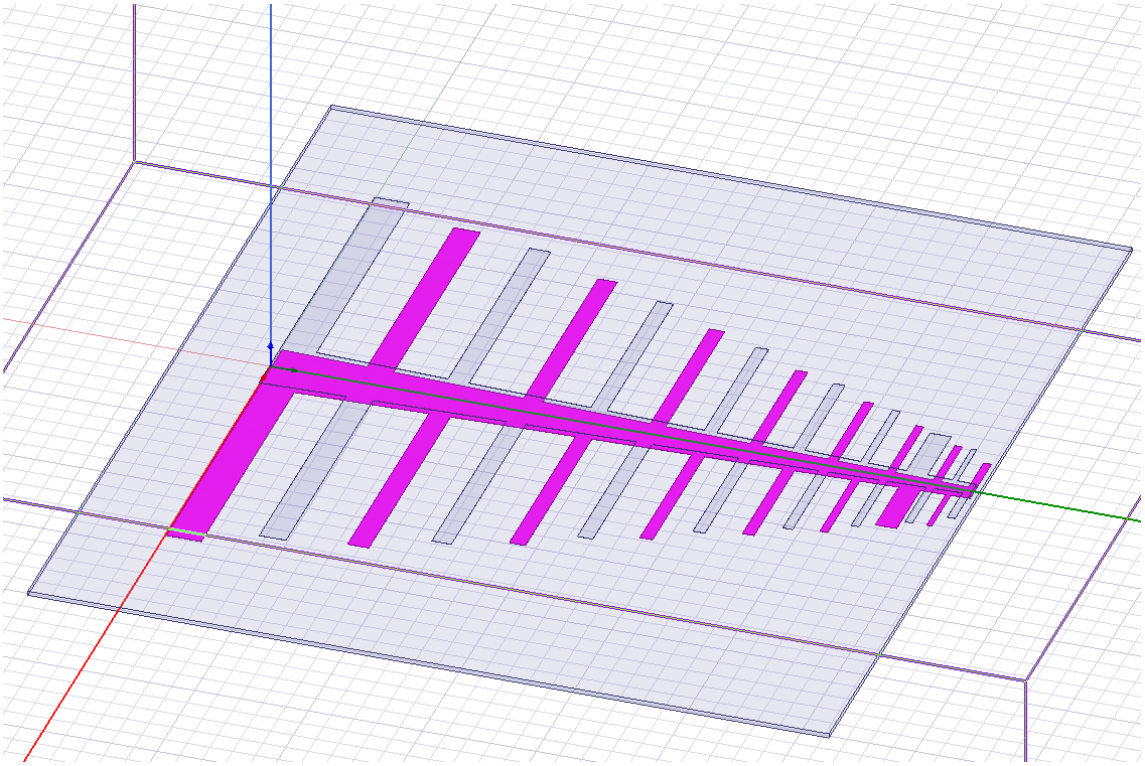


Fig. 4-4 Antena 4G Nova [6]

En la figura 4-4 vemos que hay una parte rosa y otra parte que no está remarcada, para ello, se creó nombres para cada sección dependiendo de a que parte perteneciese y en qué sentido iba, por lo que las modificaciones se iban a ver alteradas, sobre todo en el eje x (eje color rojo) y en el eje y (eje color verde).

Multiplicador	A que afecta
Mult1	Va a modificar las medidas en dirección del eje x. Influye en el grosor.
Mult2	Va a modificar las medidas en dirección del eje y. Influye en el grosor.
Mult3	Va a modificar la separación que hay, esta separación.
Mult4	Va a modificar en el eje y.
Mult5	Va a modificar en el eje y.

Para realizar la modificación de la separación, lo más sencillo era hacer que dependan entre ellas y así no se produzca solapamiento.

También se crearon otros dos multiplicadores para modificar la base central, pero se dejaron por defecto.

Para ver como se debería modificar estos valores, se hizo primero un estudio reduciendo a la mitad y posteriormente aumentando el doble.

Con esto comprobamos que cuanto más pequeña es la antena, podremos trabajar con frecuencias más altas.

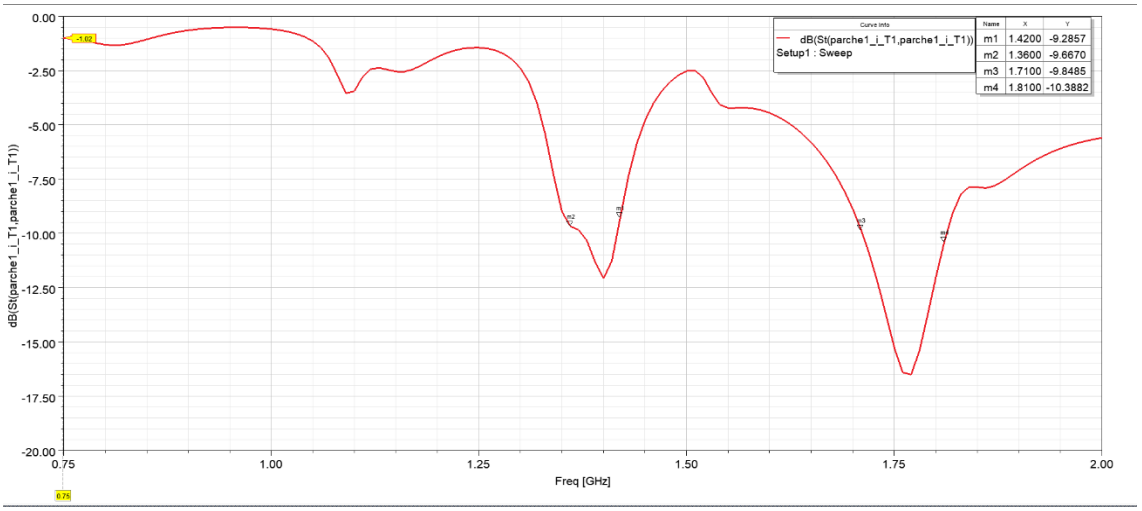


Fig. 4-5 Parámetro| S_{11}| cuando la antena reduce su tamaño a la mitad

Para poder determinar que dimensiones debía tener la Antena 4G Nova, se realizó una optimización, con objetivo que el parámetro $|S_{11}|$<=-10 dB entre 490-690MHz.

Obtenemos así los siguientes resultados, quedando las siguientes dimensiones.

Multiplicador	Dimensiones
Mult1	1.8875mm
Mult2	1.6575mm
Mult3	1.17mm
Mult4	1.1275mm
Mult5	1.32mm

Dando lugar a la siguiente gráfica del parámetro S_{11}.

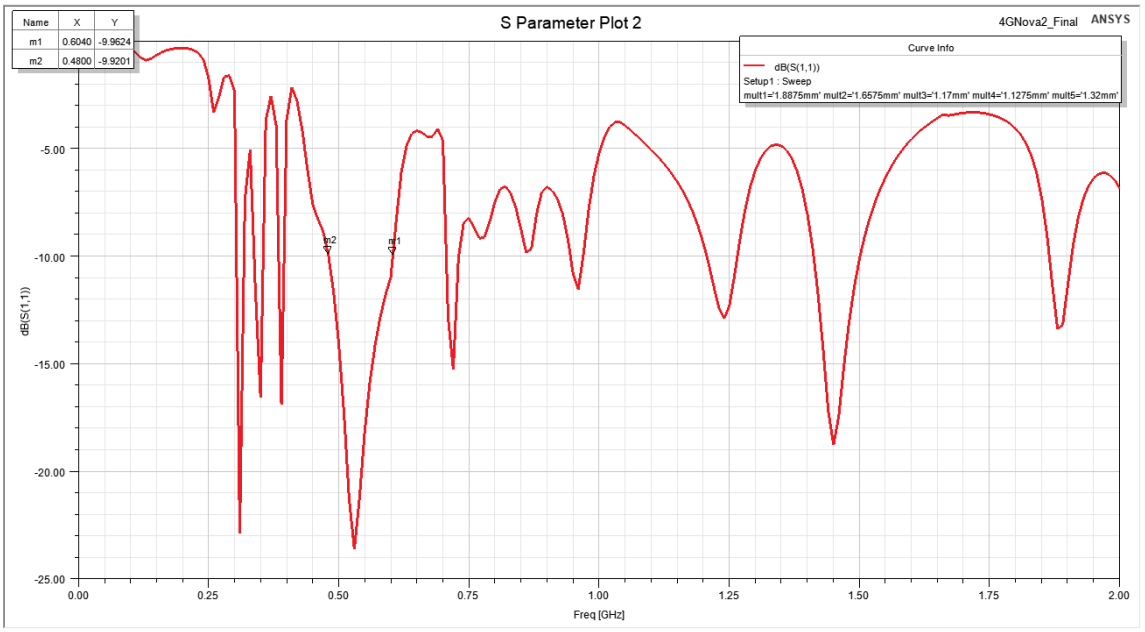


Fig. 4-6 Parámetros S11 con las medidas de optimización

La optimización consigue adaptación en más de la mitad de la banda de frecuencias de la Televisión Digital Terrestre (entre 480-604MHz) consiguiendo un ancho un ancho de banda relativo de 22.87%.

Partiendo de la solución previa, a partir de la optimización podemos trabajar con otra solución que podemos aportar, es con las siguientes medidas.

Multiplicador	Dimensiones
Mult1	1.9mm
Mult2	1.6mm
Mult3	1.8mm
Mult4	1.8mm
Mult5	1.8mm

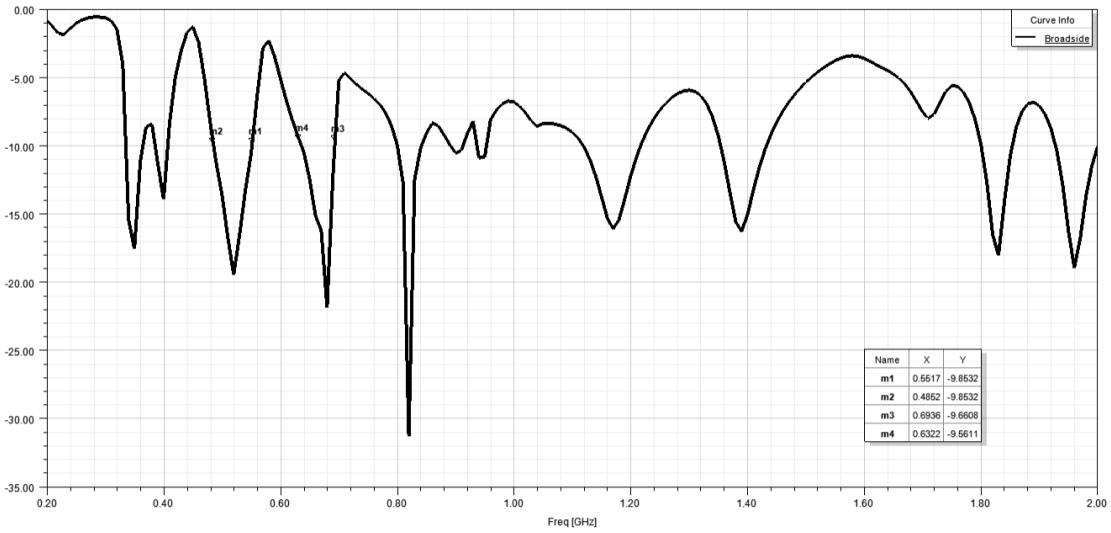


Fig. 4-7 Parámetro S11 con la segunda medida de optimización

En este caso, podemos trabajar entre 485-552MHz y entre 632-693MHz, obteniendo así los siguientes anchos de banda relativo.

$$BW(^0/_0) = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \cdot 100$$

Obtenemos un BW (%) para la primera zona = 12.92%

BW (%) para la segunda zona = 9.21%

Esto supone cubrir 120 MHz de los 200 MHz disponibles en la banda frecuencial de la DVB-T.

Dimensiones	Ancho de banda relativo
Medida original	16%
Primera medida de optimización	22.87%
Segunda medida de optimización (primera zona)	12.92%
Segunda medida de optimización (segunda zona)	9.21%

A partir de estos resultados, crearemos un componente 3D para poder realizar el array de 7 elementos. Para crear este componente, deberemos seleccionar todos los elementos de la antena, incluyendo la alimentación, botón derecho y *Create 3D Component.* Una vez creado el componente, tendríamos que crear un nuevo proyecto

acordándonos de cambiar el modo de alimentación, y para que esté en disposición de que forme un array, lo más recomendable es jugar con la distancia que hay desde el centro de un componente a otro, para así formar el array de la siguiente manera.

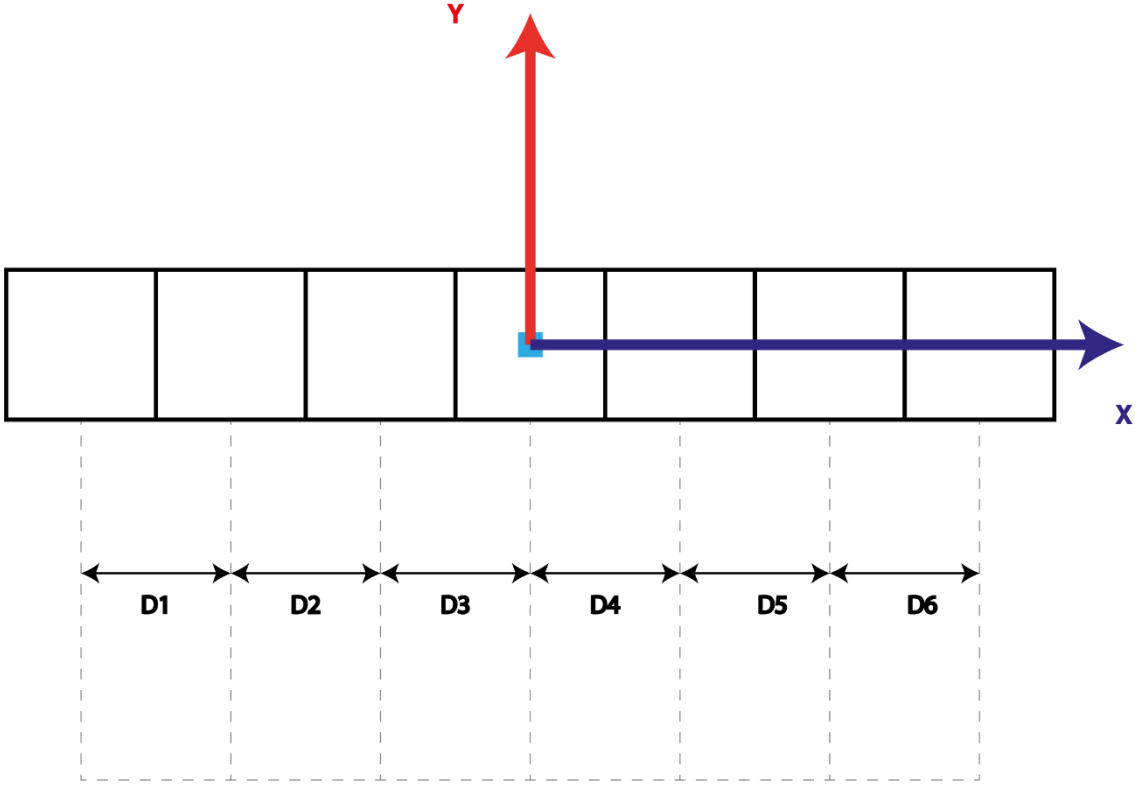


Fig. 4-8 Diseño de la arquitectura del array

Una vez situado cada elemento en la ubicación que le corresponde, debemos seleccionar todo y volver a crear *Open Region* para crear la región de radiación alrededor de todo el array. Así mismo, para poder analizar el diagrama de radiación del array, deberemos alimentar todos los elementos del array con su correspondiente amplitud y fase. Esto se realiza al pulsar en *Excitations* y luego en *Edit Sources*.

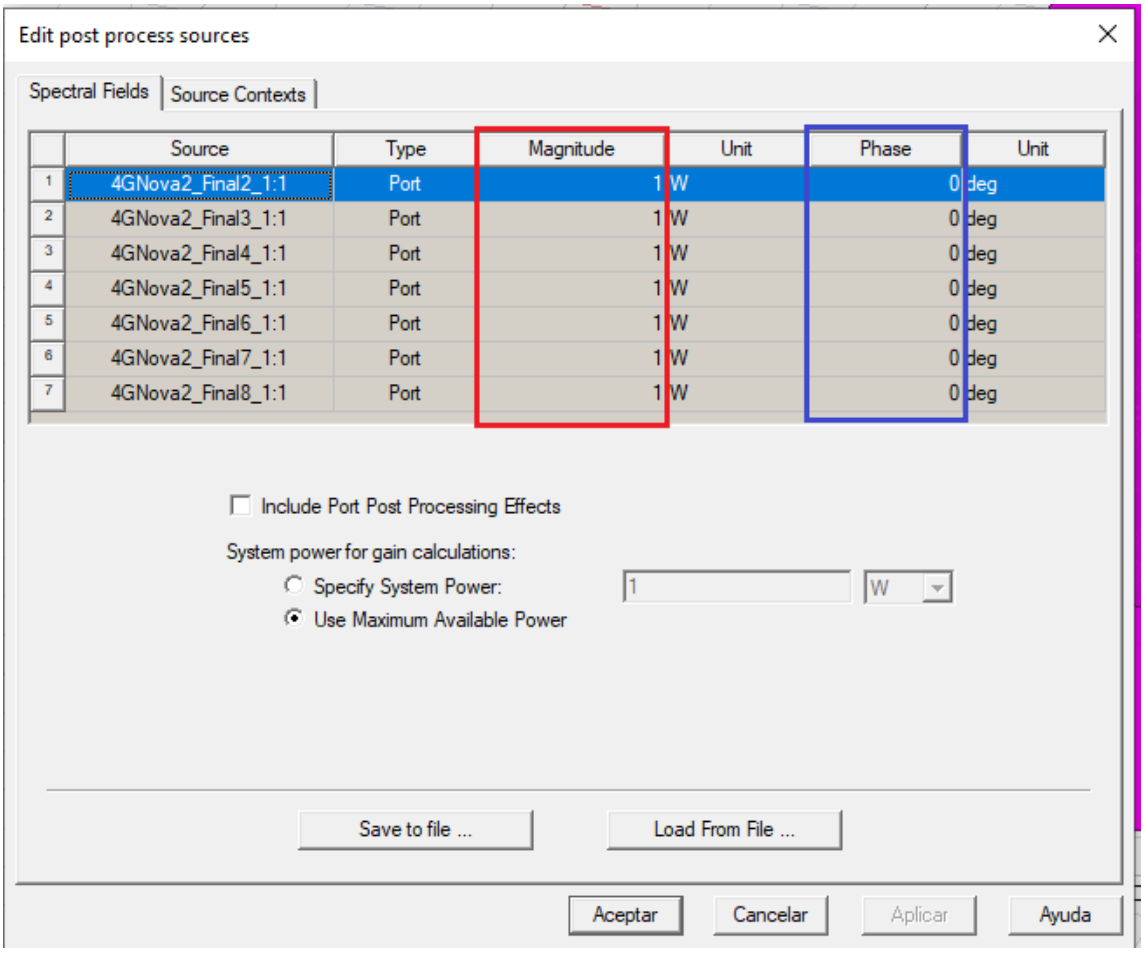


Fig. 4-9 Menu > Excitations > Edit Sources

La columna roja que marca la magnitud, la tendremos que poner a 1 en cada uno de los elementos. Mientras que la columna que determina la fase, la iremos modificando y viendo cómo afecta dependiendo de los valores que le apliquemos. Para determinar estos valores, primero tendremos que saber que ancho de haz tiene la antena, para posteriormente aplicarlo en el siguiente código de Matlab y así poder determinar las fases que tendrán cada uno de ellos.

```
%Desfases para apuntamiento de array con beamforming tradicional
freq=550e6;
N=7; %número de elementos del array
lambda=3e8/freq;
d=400e-3;%distancia entre antenas
apunt=20; %apuntamiento
dis=(-(N-1)/2:(N-1)/2)*d;
phase=-360/lambda.*dis.*sind(apunt)
```

Una vez realizado todo lo anterior, nos quedará el array de 7 elementos de la siguiente forma, a continuación, podremos ir haciendo el estudio del diagrama de ganancia en dB para los diferentes apuntamientos disponible.

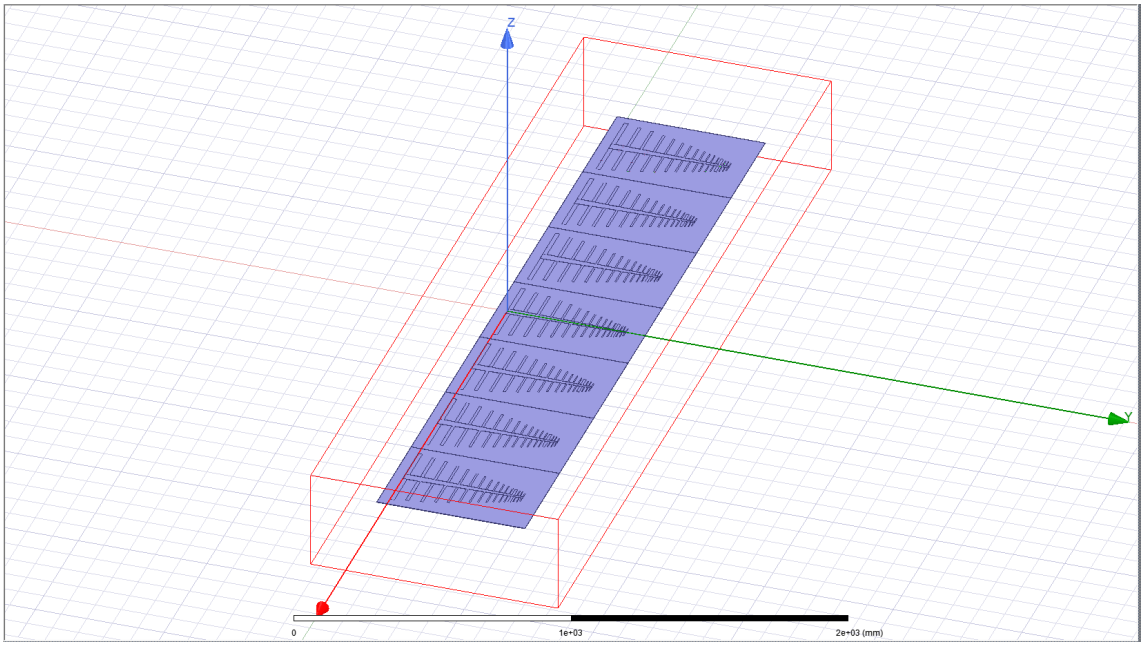


Fig. 4-10 Array de 7 elementos antena 4G Nova

Haremos primero el estudio del ancho de haz, para las últimas medidas que hemos obtenido de esta antena, solo se realiza el estudio para un solo elemento.

Como la antena está apuntando al eje y, tendremos que hacer el estudio para todo phi y theta=90.

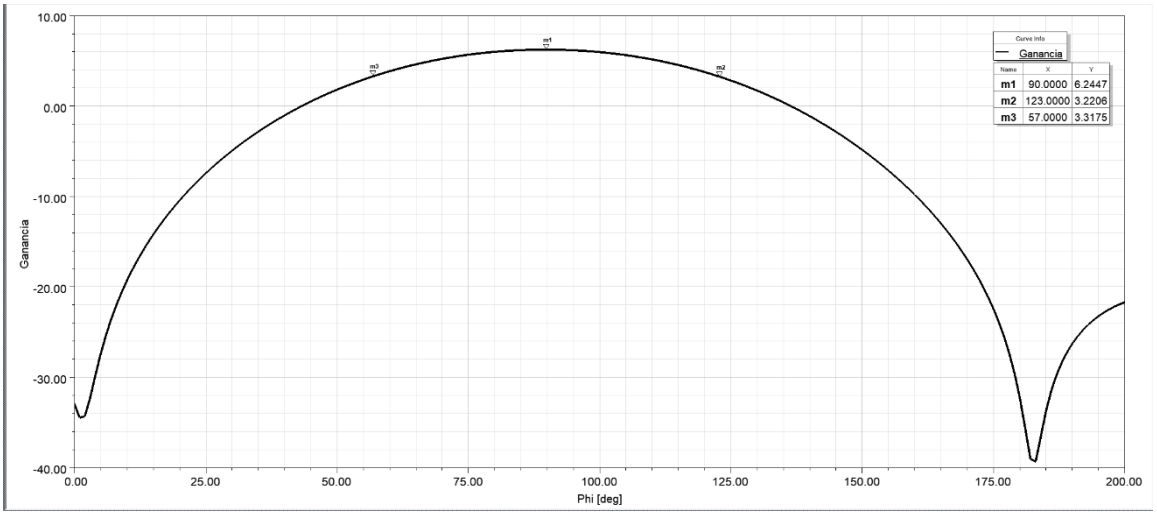


Fig. 4-11 Ancho de haz 4G Nova

En esta ilustración podemos observar que la ganancia de la antena está en 6.2447

dBi, que, a diferencia de la original, es inferior a los 6.5-7.5 dBi que teníamos anteriormente. Esto se debe a que para cumplir requisitos de tamaño para formar el array a la antena original se le eliminó el reflector. Para poder determinar el ancho de haz, tendremos que reducir a 3dB y obtenemos así en el eje Phi[deg], los valores de 123-57, obteniendo así un ancho de haz de 66º, por lo que aproximadamente deberíamos hacer el estudio de las diferentes fases hasta como mucho 33º, por lo que, en este caso, solo haremos el estudio hasta 30º.

Analizando el diagrama de radiación en ganancia para apuntamiento 0º, 10º, 20º y 30º sobre el broadside del array. Tendremos que hacer el estudio cuando Phi toma todos los valores y Theta vale 90º [Figure 4-12].

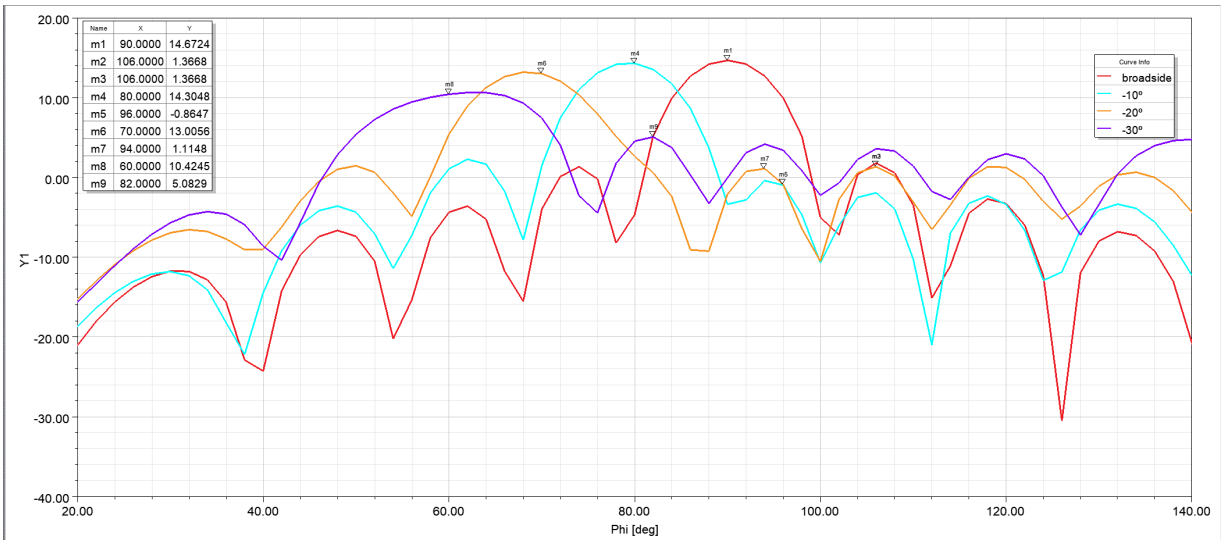


Fig. 4-12 Ancho de haz antena 4G Nova

Obtenemos los siguientes resultados:

Phi (deg)	Ganancia (dBi)	Diferencia entre lóbulo principal y el lóbulo secundario (SLL)
90	14.6724	13.3056 dB
80	14.3048	13.4410 dB
70	14.0056	11.8908 dB
60	10.4245	5.3416 dB

Para saber con cual nos quedamos, si nos referimos a la diferencia entre el lóbulo principal y el lóbulo secundario, elegiremos el que menos sea, es decir cuando Phi(deg)=60º, pero si nos tenemos que referir a la ganancia máxima, nos quedaremos

con el valor más grande, que, en este caso, es el broadside, en el que la ganancia vale 14.6724 dBi.

Antena tipo E

Esta tecnología se usa para aplicaciones que necesiten ancho de banda amplio.

Esta antena utiliza la tecnología microstrip o de parche, teniendo esta forma de E, con un substrato grueso de aire. Esta antena es apta, para la operación en array con señales de polarización vertical, por el tamaño de la misma. Tras las modificaciones llevadas a cabo en este TFG se consigue la posibilidad de integración en array para ambas polarizaciones. En España, la TDT tiene polarización horizontal, pero haremos el estudio para ambas polarizaciones.

Partimos de la disposición mostrada en la figura 4-13, de un elemento de radiación para la televisión digital terrestre que se implementa en un array para el radar pasivo. Cuando actuamos con un solo elemento, operaremos a 700MHz con un ancho de banda relativo del 19%.

Esta disposición se trata de un prototipo realizado por la Universidad de Alcalá que antes de construir el prototipo y probarse en una cámara anecoica, es simulado en ANSYS HFSS para ver el rendimiento de los parámetros.

Una vez construido el prototipo se demostró el correcto funcionamiento para un radar biestático pasivo (PBR) basado en televisión digital terrestre DVB-T [5].

Lo que observaremos en la figura 4-14 es el ancho de banda que obtenemos al formar el array. Podemos apuntar que el ancho de banda es directamente proporcional al espesor del sustrato e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su dieléctrico, como ventaja de usar el aire tenemos el Ɛr más bajo. Para modificar el ancho de banda, podemos cambiar la forma del parche, de esta forma se puede tener antenas con forma de C, E o H.

La antena original que posteriormente se modificará para adaptarla a la nueva banda de trabajo de la Televisión Digital Terrestre se representa en la figura 4-13.

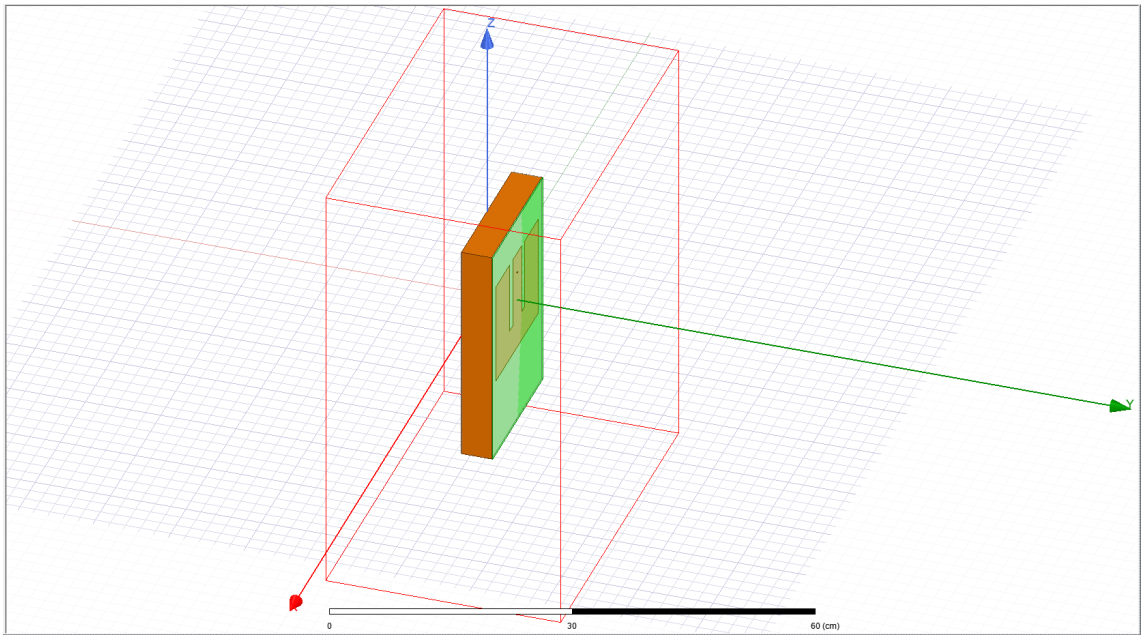


Fig. 4-13 Antena E

Estas son las dimensiones originales y que después de la optimización se cambiarán los valores:

Parámetro	Dimensiones
l_patch2	14 cm
w_patch2	17 cm
w_slot3	61 mm
w2	35 mm
l2	14 cm
l	98 mm

Con estos valores, obtenemos así la siguiente gráfica donde se representa el parámetro S11 y podremos ver en que banda de frecuencia trabaja.

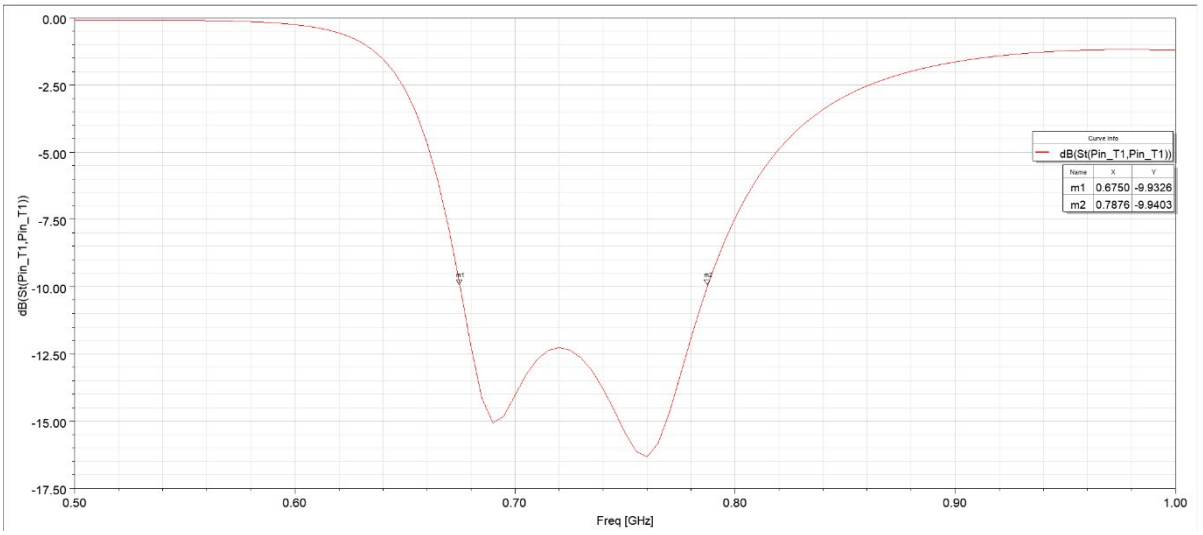


Fig. 4-14 Parámetros S11 Antena E

Vemos que con estas dimensiones podemos operar aproximadamente entre 675-787MHz. Obtenemos así el siguiente ancho de banda relativo.

$$BW(^0/_0) = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \cdot 100$$

BW (%) = 15.32%

Como en la antena anterior, ahora se realizará una optimización de los parámetros que se van a modificar para conseguir trabajar en la banda de trabajo que nos ofrece el segundo dividendo digital, que son las frecuencias entre 694 y 740 MHz (banda 700 MHz).

Para ello, con esta ilustración vemos la estructura que tiene esta antena y qué parámetros vamos a ir variando.

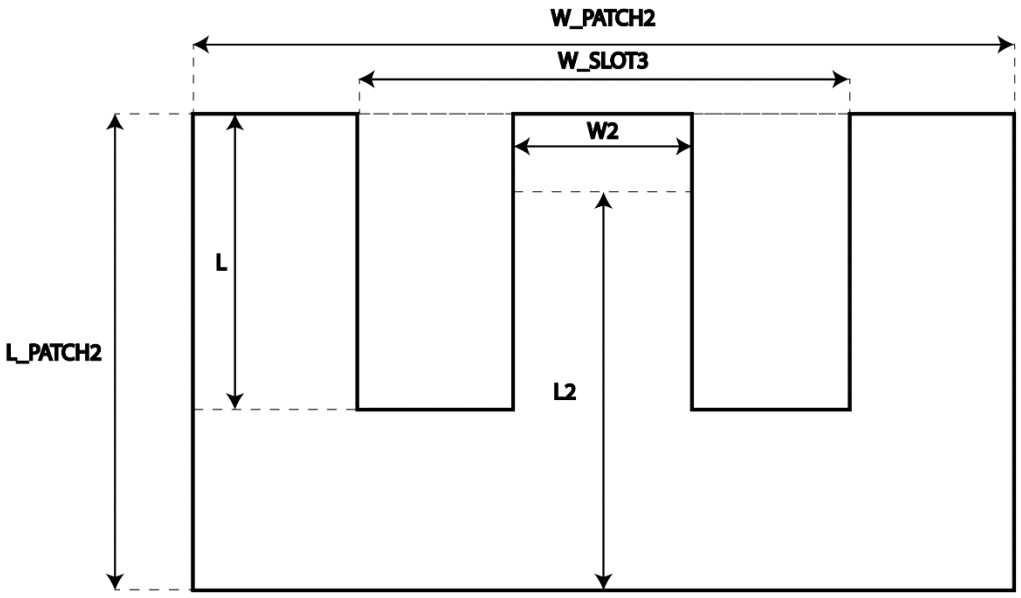


Fig. 4-15 Antena E

Adquirimos estos resultados

Parámetro	Dimensiones
l_patch2	18.027 cm
w_patch2	24 cm
w_slot3	60.007 mm
w2	49.998 mm
l2	16.824 cm
l	130.032 mm

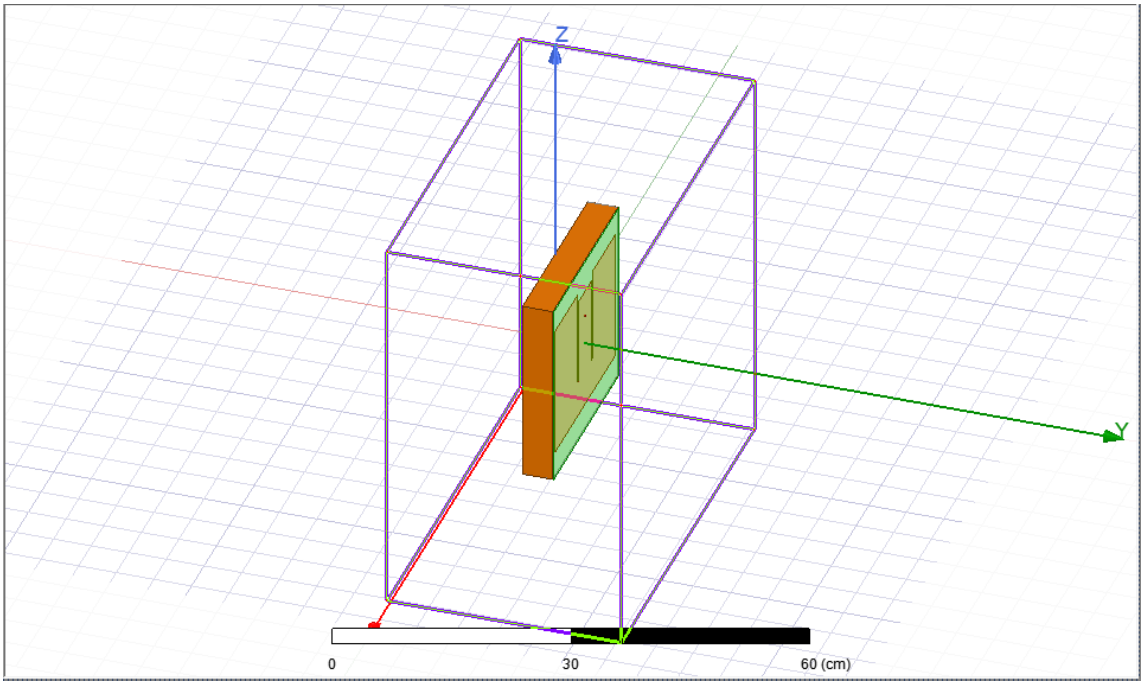


Fig. 4-16 Antena E dimensiones finales

A partir de aquí, volveremos a hacer la simulación y comprobar que hayamos conseguido lo deseado.

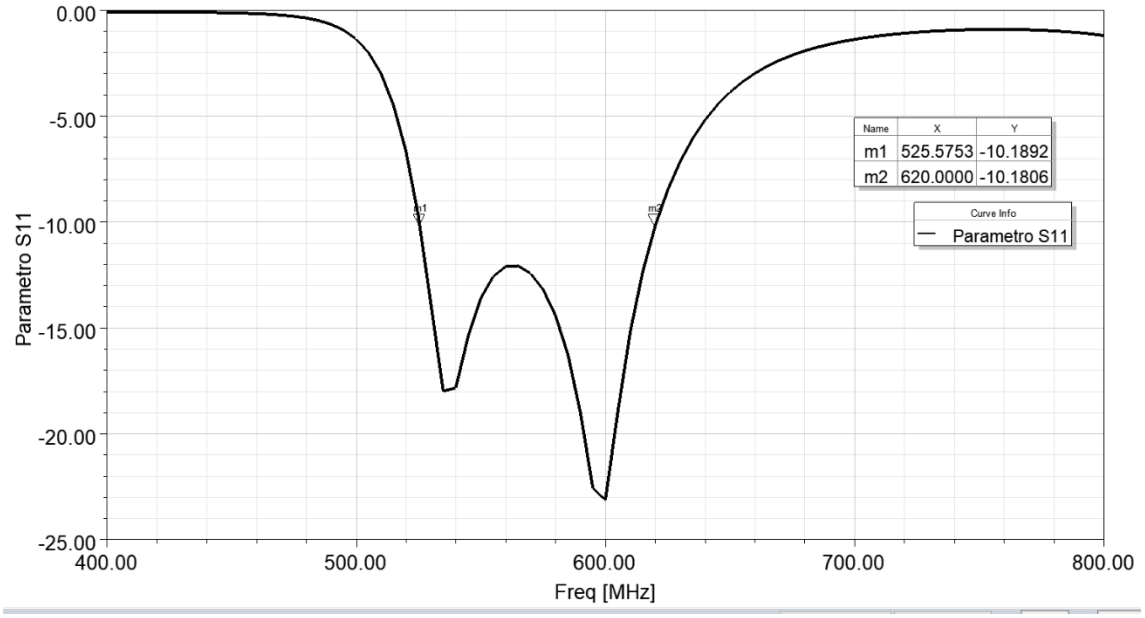


Fig. 4-17 Parámetro S11 E final

Con estas dimensiones podremos trabajar entre 525 y 620 MHz, obteniendo así el siguiente ancho de banda relativo. Es un resultado bastante óptimo.

$$BW(^0/_0) = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \cdot 100$$

BW (%) = 16.6%

Dimensiones	Ancho de banda relativo
Medida original referida a la figura 4-13	15.32%
Medida optimizada referida a la figura 4-16	16.6%

A partir de estas últimas medidas, realizaremos el componente 3D y con esto procederemos a la creación del array de 7 elementos, como se explicó anteriormente, el estudio se ha realizado tanto en polarización vertical como en polarización horizontal.

Al igual que en la antena 4G Nova, para realizar la disposición del array en polarización vertical, se siguió el mismo método.

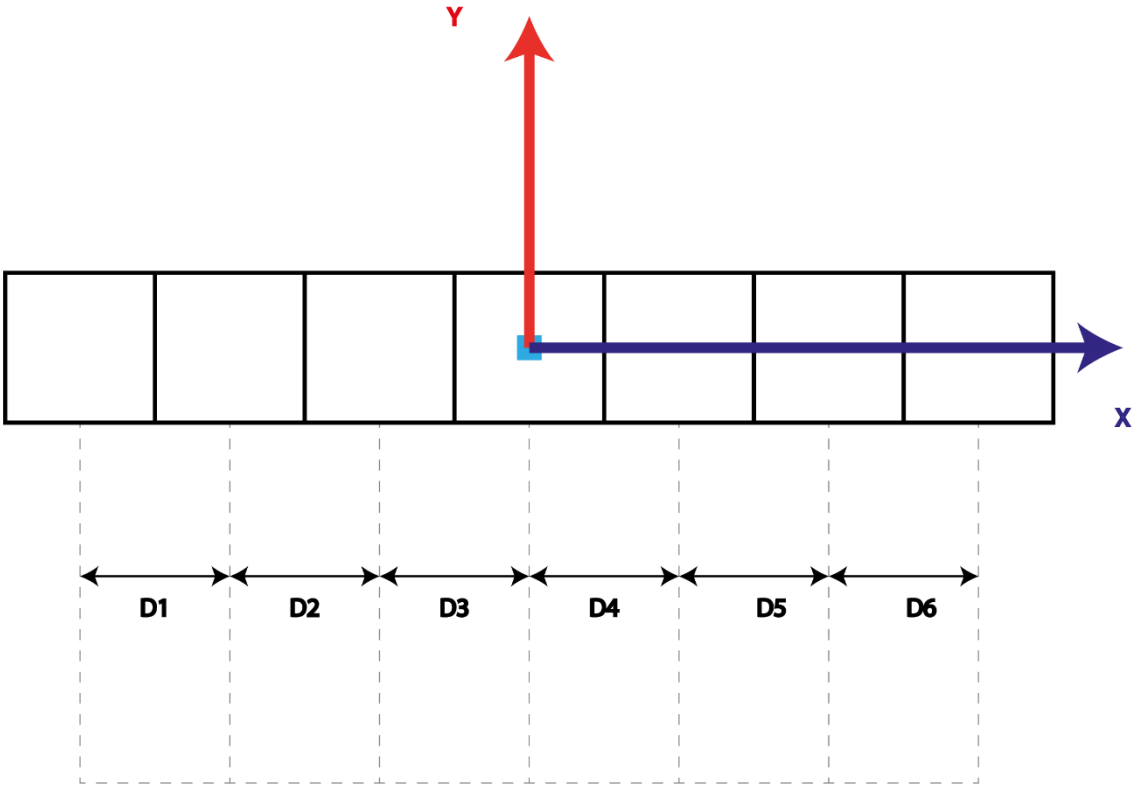


Fig. 4-18 Disposición array de 7 elementos antena E polarización vertical

Recordamos que la polarización que usamos en España es horizontal. Pero como en otras zonas de la Unión Europea se usa la vertical, haremos el estudio para las dos polarizaciones.

Antes que nada, vamos a realizar la simulación de la Antena E que usaremos para la creación del array. Como esta antena está apuntando en el eje z, para realizar la

simulación haremos el estudio para todos los valores de Theta y para Phi=90º.

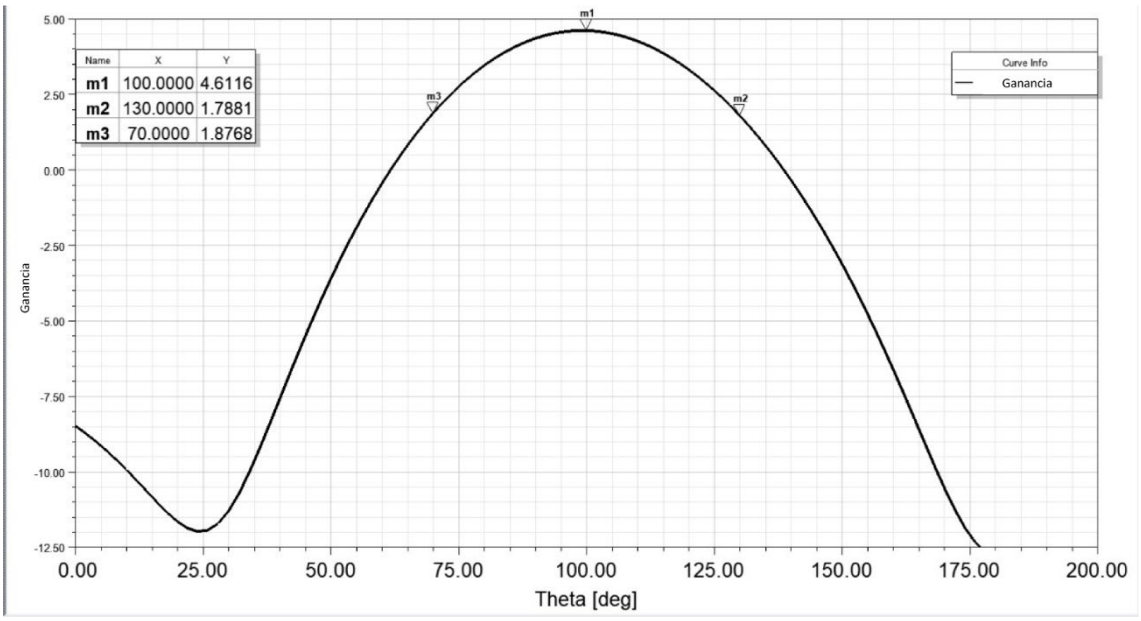


Fig. 4-19 Ancho de haz antena E optimizada

En esta ilustración vemos el ancho de haz. Para calcularlo primero tendremos que situar el punto máximo es la ganancia de la adaptación de la antena es de 4.6116dBi, a partir de aquí, reducimos 3 dB y obtenemos los puntos en el eje Theta, 130 y 70, teniendo así un ancho de haz de 60º. Como mucho, el estudio para diferentes fases se deberá hacer hasta su valor medio, que en este caso es 30º.

Polarización vertical

Primero vamos a realizar el estudio para la polarización vertical, una vez situados todos los elementos, crearemos la *Open region* y haber editado las *Edit sources* de Excitations, obtendremos el siguiente dispositivo.

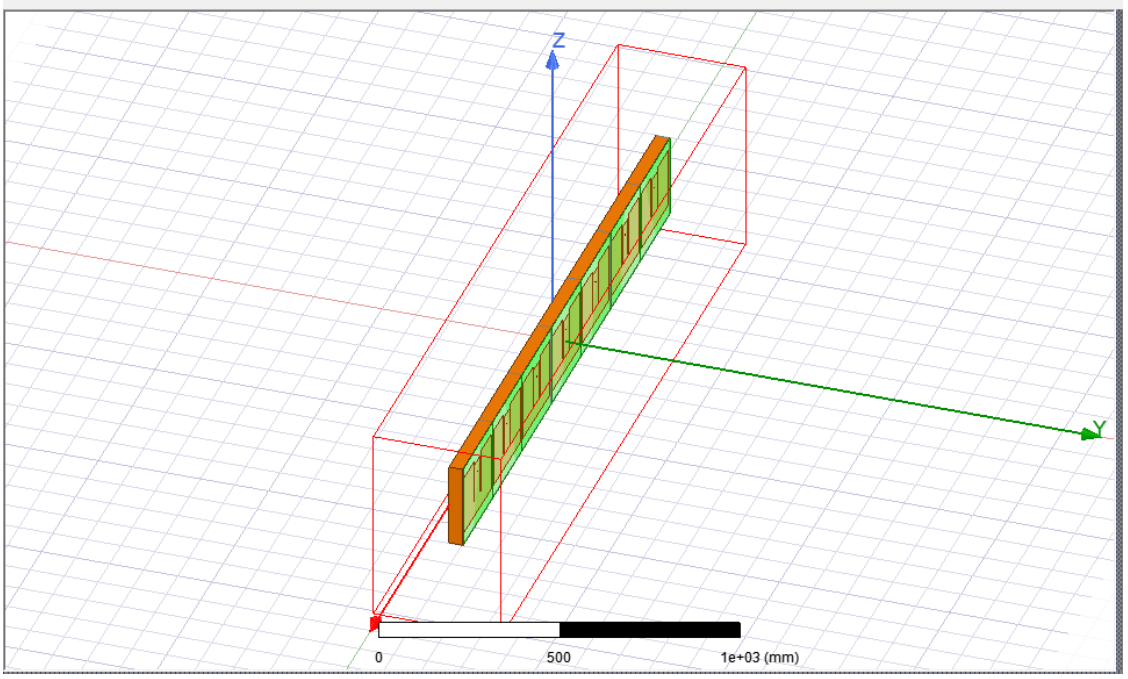


Fig. 4-20 Array de 7 elementos antena E polarización vertical

A partir de aquí, haremos el estudio de la ganancia los distintos apuntamientos, dependiendo del ancho de haz que tengamos. Así veremos cuál es la relación del lóbulo principal con los secundarios.

Al estar apuntando en dirección del eje z, haremos el estudio de la ganancia haciendo el recorrido por todo Theta y dejando el Phi fijo en 90º.

A partir del código de Matlab adjuntado en la antena anterior, vamos a determinar las fases para los diferentes apuntamientos.

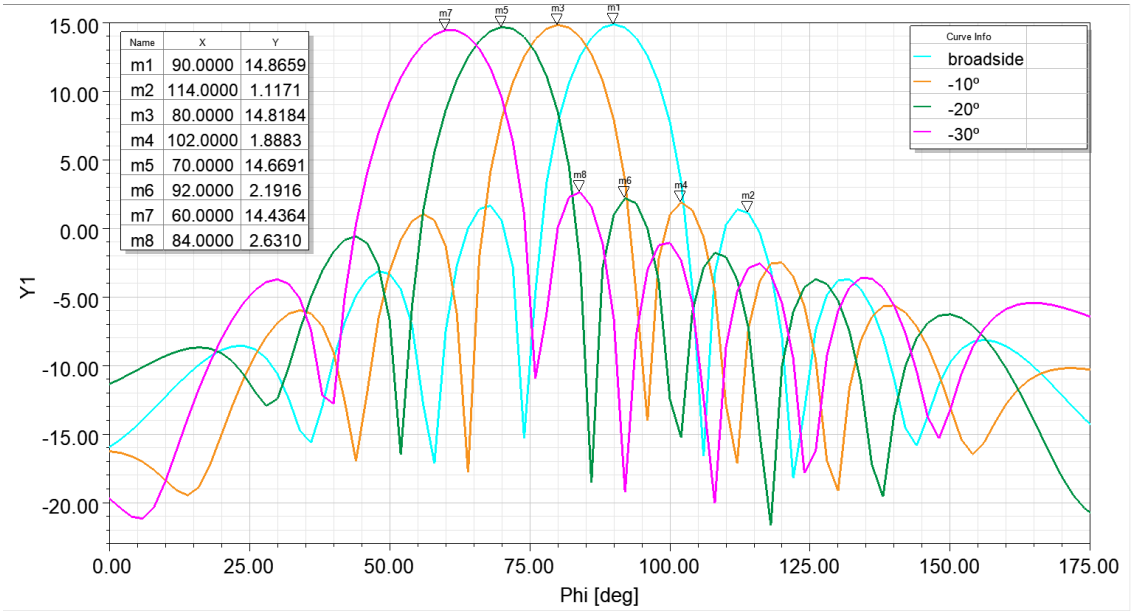


Fig. 4-21 Ganancia array de 7 elementos antena E con polarización vertical

Apuntamiento	Ganancia (dB)	Diferencia entre lóbulo principal y el lóbulo secundario (SLL)
90	14.8659	13.7488 dB
80	14.8184	12.9301 dB
70	14.6691	12.4775 dB
60	14.4364	11.8054 dB

Como ya sabemos nos quedaremos con la que menor diferencia que haya entre el lóbulo principal y el secundario, pero si nos referimos a la ganancia nos quedaremos a la mayor.

Polarización horizontal

Esta sería la solución más acertada, puesto que en España la TDT trabaja en esta polarización. Para ello, como hemos visto en la introducción de este capítulo, situaremos cada elemento subiendo en el eje z, quedando el array de la siguiente manera. Se simula en esta configuración por sencillez pero realmente el array para polarización horizontal y apuntamiento en acimut operaría rotado 90º hacia el eje X.

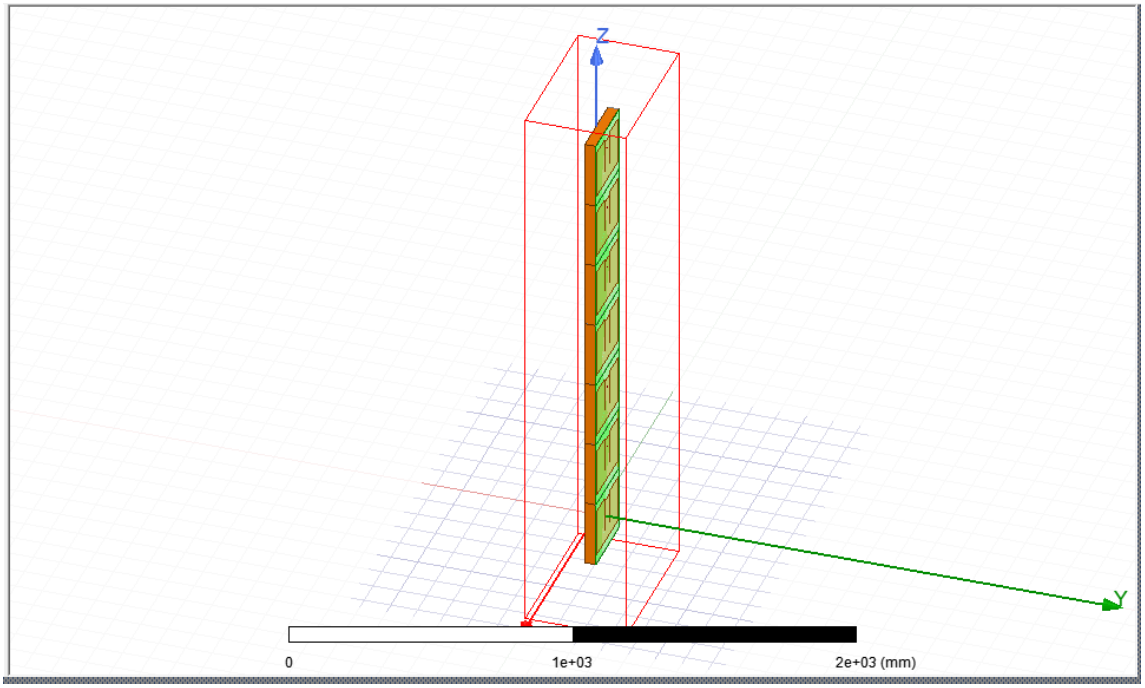


Fig. 4-22 Array de 7 elementos antena E con polarización horizontal [5]

Para obtener esta disposición, se realizó un boceto para saber a qué distancia debería colocarse cada antena al igual que se hizo en la polarización vertical.

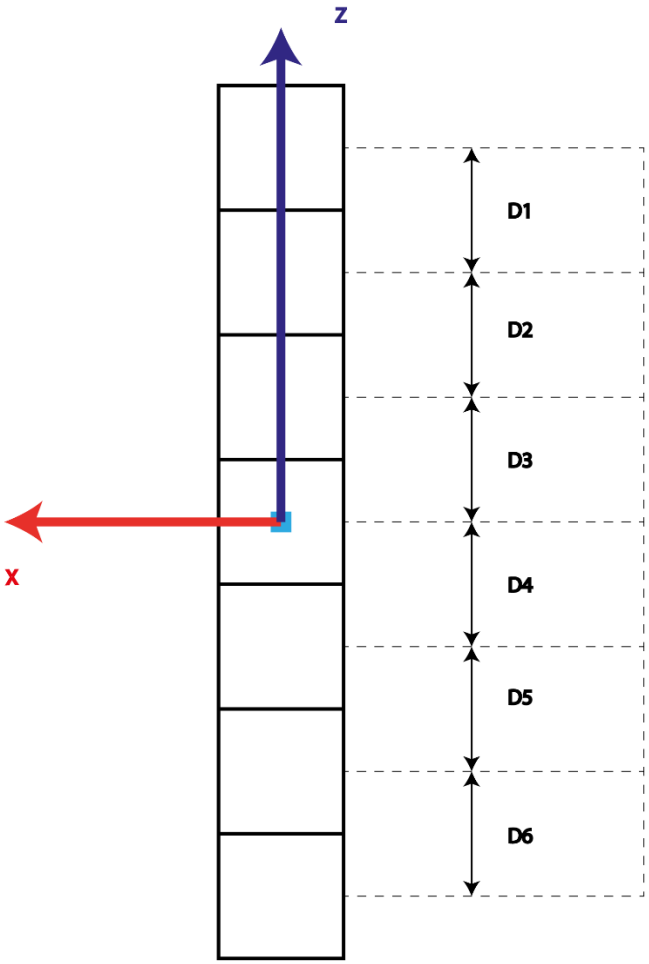


Fig. 4-23 Array de 7 elementos polarización horizontal

A continuación, realizaremos la simulación de la ganancia a partir de las diferentes fases, ya vimos que el ancho de haz es de 60º, por lo que haremos el estudio hasta los 30º.

A continuación, se adjunta la simulación de la ganancia para los diferentes apuntamientos.

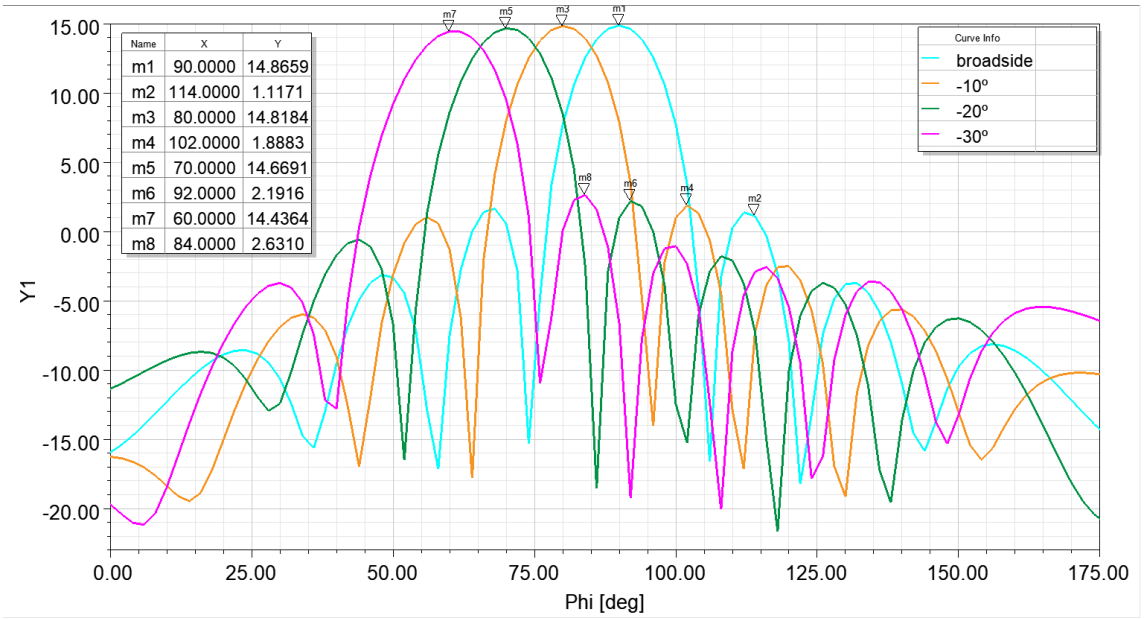


Fig. 4-24 Ganancia array 7 elementos antena E para diferentes fases polarización horizontal

Apuntamiento	Ganancia (dB)	Diferencia entre lóbulo principal y el lóbulo secundario (SLL)
90	14.2455	13.6167 dB
80	14.0164	13.1118 dB
70	13.7729	12.4941 dB
60	13.4923	12.0348 dB

Al igual que los anteriores, en cuanto a la diferencia entre el lóbulo principal y el secundario nos quedaremos con el que menor valor tenga (peor caso) y si nos tenemos que referir a la ganancia nos quedaremos con el de mayor valor.

CAPÍTULO 5:
CONCLUSIONES, LÍNES FUTURAS, PLIEGO DE CONDICIONES Y PRESUPUESTO

Conclusiones

Los objetivos del presente TFG consisten principalmente en la optimización de antenas de parche para espectro actualizado de la TDT como parte de un sistema radar pasivo. Para llevarlo a cabo ha sido necesario el estudio de manera teórica y práctica de los parámetros de las antenas que influyen a la hora de realizar la optimización.

Para la realización del análisis, aparte de buscar información y adquirir nuevos conocimientos, se ha tenido la oportunidad de poder realizar la adaptación de las antenas de parche en modelos de 3D a partir del software de simulación electromagnética ANSYS HFFS.

Para dar comienzo a las conclusiones, se ha de partir de los parámetros que debemos modificar, para ello haciendo las primeras pruebas, se pudo determinar que reduciendo las dimensiones de las antenas podremos trabajar en frecuencias más altas, puesto que nuestro objetivo esta trabajar en frecuencias bajas, obviamente se aumentaron las dimensiones.

Tras el estudio de la adaptación se realizó el diseño de un array de 7 elementos para cada una de las antenas de parche que hemos optimizado, se realizó el estudio para la polarización horizontal y vertical, pero el resultado que nos quedaremos es el de polarización horizontal, puesto que en España la TDT está en polarización horizontal.

Con el software pudimos realizar la simulación de la ganancia para las diferentes fases, estas las determinamos a partir del ancho de haz de la antena. Con esto realizaremos el estudio de la diferencia entre el lóbulo principal y el lóbulo secundario.

Líneas futuras

Seguramente posteriores actualizaciones u optimizaciones tendrán que ver con la misma decisión que la realización de este TFG, que se haya actualizado la banda de frecuencias en la que trabaja la TDT por la implantación de nuevas tecnologías.

También, otro de los posibles cambios que se podría realizar, es un cambio en el iluminador de oportunidad, para esto se podrían usar tanto analógicos como digitales, como podría ser UMTS.

Como seguramente en un futuro siga investigando en este tema, puesto que continuaré con mi formación, sería adecuado la creación de una antena de un diferente tipo. O de las mismas ya creadas, hacer un estudio de otras posibles geometrías.

Como sabemos por este TFG, la forma de estructurar el Array posteriormente de haber realizado las optimizaciones fue de que entre una antena y otra no hubiese separación, otra de las alternativas que se podría realizar, es cambiar la separación.

Cabe destacar que las antenas han ido evolucionando tanto en investigación como en interés comercial.

Al poder minimizar el tamaño de las antenas podemos contemplar el realizar que los arrays no sean tan aparatosos y así poder trabajar con frecuencias más altas, para esto deberíamos cambiar el iluminador de oportunidad utilizando otra tecnología.

Los radares destacan sobre todo en el ámbito militar y el civil, la tecnología radar pasivo se podría implementar en un futuro en estos campos, por ejemplo para la defensa de infraestructuras críticas o control de tráfico aéreo, marítimo o terrestre.

Pliego de condiciones

Para poder llevar a cabo este trabajo se han necesitado los siguientes materiales para poder realizarlo:

- Ordenador personal: AMD Ryzen 3600 3.6GHz, SSD 500Gb, HDD 4 Tb con tarjeta gráfica nvidia gerforce 660
- Matlab R2020b
- Ansys electronic
- Microsoft Office 2019

Presupuesto

Para este apartado se debe tener en cuenta el presupuesto de ejecución por material y los honorarios, este último irá en función de los datos recogidos en el boletín oficial del estado publicado en el BOE el 3 de julio de 2020 es de 1340,91€. Como para realizar este proyecto se han trabajado durante 6 meses, teniendo en cuenta la seguridad social y las retenciones del IRPF, vamos a tener en cuenta que trabaja media jornada.

Presupuesto de ejecución por material			
Concepto	Cantidad	Precio unitario	Coste total
Ordenador personal	1	1500,00€	1500,00€
Material oficina	1	100,00€	100,00€
Windows 10 Pro	1	225,00€	225,00€
Office 2019	1	125,01€	125,01€
Matlab R2020b	1	119,00€	119,00€
ANSYS	1	1299,00€	1299,00€

Total: 3368,01€

Honorarios				
Concepto	Nº personal	Tiempo (meses)	Precio unitario (€/mes)	Coste total
Ingeniería	1	6 (media jornada)	670,45€	4022,73€

Total: 4022,73€

Total (teniendo en cuenta el IVA): 8942,79€

CAPÍTULO 5

Capítulo 6 Bibliografía

[1] Amores, M. P., de la Mata Moya, D., del Rey Maeste, N., Gómez del Hoyo, P., & Rosado Sanz, J. (2019). IDEPAR, uso del radar pasivo para la detección de drones. *Boletín de Observación Tecnológica en Defensa nº61*, 11-15.

[2] *Ministerio de asuntos económicos y transformación digital.* (Febrero de 2021). Obtenido de Segundo dividendo digital: https://televisiondigital.mineco.gob.es/2DD-5G/Paginas/segundo-dividendo-digital.aspx

[3] Jarabo Amores, M., de la Mata Moya, D., Gómez del Hoyo, P., Rosado Sanz, J., & del Rey Maestre, N. (2021). Broadband modified-circle-shape patch antenna with H-aperture feeding for a passive radar array. *Aerospace Science and Technology*.

[4] Rosado Sanz, J., Jarabo Amores, M., de la Mata Moya, D., del Rey Maestre, N., & Gómez del Hoyo, P. (Junio de 2021). Design of a Broadband Patch Antenna for a DVB-T based Passive Radar Antenna Array. Universidad de Alcalá.

[5]*Televisión digital*. (abril de 2021). Obtenido de Ministerio de asuntos económicos y transformación digital: https://televisiondigital.mineco.gob.es/TelevisionDigital/TDT/Paginas/tdt.aspx

[6] *ANSYS*. (febrero de 2021). Obtenido de ANSYS electronics: https://www.ansys.com/products/electronics

[7] Wiley, J. (2005). *Anthenna Theory.* Constantine A. Balanis.

[8] Anguera, J., & Pérez, A. (Consultado febrero 2021). *Teoría de Antenas.* Universitat Ramon Llull.

[9] del Rey Maestre, N., de la Mata Moya, D., Jarabo Amores, P., Gómez del Hoyo, P. J., Bárcena Humanes, J. L., & Rosado Sanz, J. (2017). *Passive Radar Array Processing with Non-Uniform Linear Arrays for Ground Target's Detection and Localization.* Remote Sens. 2017, 9(7), 756; https://doi.org/10.3390/rs9070756.

[10] *Universidad Politécnica de Valencia*. (marzo de 2021). Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia:

http://www.upv.es/antenas/Tema_1/Directividad.htm#:~:text=La%20Directividad%20de%20una%20antena,igualdad%20de%20potencia%20total%20radiada.

[11] *Universidad Politécnica de Valencia*. (marzo de 2021). Obtenido de Universidad Politéctica de Valencia: http://www.upv.es/antenas/Tema_1/ganancia.htm#:~:text=La%20ganancia%20de%20una%20antena,potencias%20entregadas%20a%20la%20antena.

[12] Wolff, C. (marzo de 2021). *radartutorial*. Obtenido de https://www.radartutorial.eu/01.basics/Principio%20B%C3%A1sico%20de%20Funcionamiento.es.html

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Universidad
de Alcalá