

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y  
ELECTRÓNICA**



**TRABAJO FIN DE GRADO**

**ANÁLISIS DE *ARRAYS* DE ANTENAS EN FASE  
EN MATLAB PARA CONSTELACIONES DE  
SATÉLITES LEO**

<b>TITULACIÓN:</b>	Grado en Ingeniería en Tecnologías de la Telecomunicación
<b>MENCIÓN:</b>	Sistemas Electrónicos
<b>AUTOR:</b>	Pablo Medina Suárez
<b>TUTOR:</b>	Dr. Sunil Lalchand Khemchandani
<b>COTUTOR:</b>	Irene Merino Fernández
<b>FECHA:</b>	Julio 2023



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y  
ELECTRÓNICA**



**TRABAJO FIN DE GRADO**

**ANÁLISIS DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE  
EN MATLAB PARA CONSTELACIONES DE  
SATÉLITES LEO**

**HOJA DE FIRMAS**

**Alumno/a**

Fdo. Pablo Medina Suárez  
**Tutor/a**

**Cotutor**

Fdo. Dr. Sunil Lalchand Khemchandani

Fdo. Irene Merino Fernández



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN Y  
ELECTRÓNICA**



**TRABAJO FIN DE GRADO**

**ANÁLISIS DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE  
EN MATLAB PARA CONSTELACIONES DE  
SATÉLITES LEO**

**HOJA DE EVALUACIÓN**

**Calificación:** \_\_\_\_\_

**Presidente**

**Vocal**

**Secretario**

**Fecha:** Julio 2023



## Agradecimientos

En primer lugar, quería agradecer a mi tutor Sunil Lalchand Khemchandani y a mi cotutora Irene Merino Fernández por su gran ayuda para que este proyecto saliese adelante. Me han asesorado en todo momento y me han brindado un apoyo constante.

Agradecer también a mi familia por darme ánimos cuando era necesario para poder llegar hasta el final de esta etapa. Sin ellos me hubiese quedado en el camino.

Agradecer también a mis compañeros, aquellos que se marcharon, y a aquellos que compartieron mis estudios, con los que estudié sin parar para aquellos exámenes y con los que compartí varios cafés y muchas risas, momentos que hoy recuerdo como el primer día.

Finalmente quería agradecer a mi tía, quien era mi segunda madre y me dio fuerzas en todo momento, y le quitaba hierro al asunto cuando las cosas no salían como yo esperaba.

Tras mucho esfuerzo que parecía que no iba a dar sus frutos, finalmente así ha sido. Gracias a todas aquellas personas que en mayor o menor medida han conseguido que llegue al final del camino.





## Resumen

En este proyecto se realiza un análisis y diseño de *array* de antenas en fase en las bandas de 17,8 – 20,2 GHz para recepción y 27,5 – 30 GHz para transmisión, con el fin de aplicarlas a las comunicaciones satelitales de órbita baja.

En primer lugar, se realiza un estudio previo donde se ahonda en el concepto de *phased array* y sus principales características, donde se refleja su gran utilidad e importancia para las comunicaciones en la actualidad. Posteriormente se realiza el diseño de una antena para transmisión. Para el diseño de la antena se han investigado los materiales disponibles para el sustrato, buscando opciones realistas que sean adecuadas en este rango de frecuencias. Una vez seleccionada la tecnología utilizada, se procedió a realizar el diseño de la antena haciendo uso del *software* MATLAB. Se realizaron varias simulaciones empleando diferentes sustratos para determinar con cuál de ellos se obtenía mayor ganancia. Tras analizar los resultados y haber finalizado con el diseño, se procedió a utilizar la antena diseñada para estimar el número de elementos requeridos para un *array* de transmisión para cuatro constelaciones de órbita baja que ya se encuentran activas: OneWeb, Amazon, Telesat y SpaceX.

En el caso de recepción se ha seguido el mismo flujo de trabajo que para transmisión, se ha diseñado la antena haciendo simulaciones con varios sustratos y se ha estimado el número de elementos radiantes necesarios para las constelaciones mencionadas anteriormente.

Finalmente, se han extraído las conclusiones más relevantes en función de los resultados obtenidos y se han incluido las líneas futuras donde se reflejan opciones de mejora o alternativas para extender la continuidad del proyecto.



# Abstract

This project analyses and designs phased *arrays* in the 17.8 - 20.2 GHz bands for reception and 27.5 - 30 GHz for transmission, with the aim of applying them to low orbit satellite communications.

First of all, a preliminary study is carried out where the concept of phased *array* and its main characteristics are studied in depth, reflecting its great usefulness and importance for communications today. Subsequently, the design of an antenna for transmission is carried out. For the design of the antenna, the materials available for the substrate have been investigated, looking for realistic options that are suitable in this frequency range. Once the technology was selected, the antenna design was carried out using MATLAB software. Several simulations were carried out using different substrates to determine which of them provided the highest gain. After analysing the results, the patch antennas design was finished. Then, these results were used to design the phased array, estimating the number of elements required for a transmission *array* for four low orbit constellations that are already active: OneWeb, Amazon, Telesat and SpaceX.

In case of reception, the same workflow has been followed as for transmission, the antenna has been designed by simulating several substrates and the number of radiating elements required for the constellations mentioned above has been estimated.

Finally, the most relevant conclusions have been drawn on the basis of the results obtained. Moreover, future lines have been included, showing options for improvement or alternatives to extend the continuity of the project.



# Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción .....	1
1.1    Satélites LEO .....	1
1.2    Array de antenas en fase .....	2
1.3    Objetivos .....	4
1.4    Peticiónario .....	4
1.5    Estructura de la memoria .....	5
Capítulo 2: Parámetros de las antenas .....	7
2.1    Introducción .....	7
2.2    Parámetros de un <i>array</i> de antenas en fase .....	7
2.2.1    Elevación y azimut .....	7
2.2.2    Beam Squint .....	9
2.3    Parámetros de las antenas .....	11
2.3.1    Diagrama de radiación .....	11
2.3.2    Directividad .....	13
2.3.3    Ganancia .....	13
2.3.4    Eficiencia .....	14
2.3.5    Polarización. ....	14
2.3.6    Campo lejano .....	15
2.3.7    Ancho de banda .....	15
2.3.8    VSWR .....	16
2.3.9    Parámetros S .....	17
2.3.10    Pérdidas de retorno .....	17
2.3.11    Área efectiva .....	17
2.3.12    EIRP .....	18
2.3.13    Sensibilidad .....	18
2.3.14    G/T .....	18

2.4	Influencia los elementos radiantes sobre el <i>array</i> de antenas .....	19
2.5	Conclusiones.....	20
Capítulo 3: Software MATLAB .....		21
3.1	Introducción .....	21
3.2	Antenna Toolbox .....	21
3.3	Phased Array Toolbox.....	22
3.4	Satellite Communication Toolbox .....	23
Capítulo 4: Selección de la tecnología .....		25
4.1	Introducción .....	25
4.2	Frecuencias de transmisión y recepción .....	25
4.3	Elección del sustrato.....	29
4.4	Conclusiones.....	30
Capítulo 5: Diseño de las antenas tipo parche en Matlab.....		31
5.1	Introducción .....	31
5.2	Caracterización de las antenas .....	31
5.3	Métodos de alimentación .....	32
5.3.1	Métodos de alimentación directa .....	33
5.3.2	Métodos de alimentación indirecta .....	34
5.4	Antena de transmisión .....	36
5.4.1	Dimensionado de la antena.....	36
5.4.2	Simulación en MATLAB de la antena.....	36
5.5	Antena de recepción .....	40
5.5.1	Dimensionado de la antena.....	40
5.5.2	Simulación en MATLAB de la antena de recepción.....	41
5.6	Conclusiones.....	43
Capítulo 6: Diseño de <i>arrays</i> .....		45
6.1	Introducción .....	45
6.2	<i>Array</i> de transmisión .....	46

6.3	Array de recepción .....	52
6.4	Simulación de una conexión satelital .....	57
Capítulo 7: Conclusiones y líneas futuras .....		65
7.1	Conclusiones.....	65
7.2	Líneas futuras .....	67
Presupuesto.....		74
P.1	Trabajo tarifado por tiempo empleado.....	74
P.2	Recursos hardware .....	74
P.3	Recursos software .....	74
P.4	Redacción de la memoria .....	75
P.5	Derechos de visado del COITT .....	76
P.6	Material fungible .....	77
P.7	Aplicación de impuestos y coste total.....	77





# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Satélites LEO [2].	1
Figura 2. Array de antenas en fase [6].	3
Figura 3. Elevación y azimut [9].	8
Figura 4. Beam Squint [10].	9
Figura 5. Beam squint en función de la elevación ( $\theta$ ) y de la frecuencia [11].	10
Figura 6. Desviación del haz en función de la frecuencia.	11
Figura 7. Diagrama de radiación para un dipolo de media onda [14].	12
Figura 8: Dipolo de media onda [14].	12
Figura 9. Radiación isotrópica [17].	13
Figura 10. Componentes del campo eléctrico de una onda plana [17].	15
Figura 11. Línea de transmisión [22].	16
Figura 12. Parámetros S [24].	17
<i>Figura 13. Ganancia vs número de elementos radiantes.</i>	20
Figura 14: Esquema de transmisión y recepción.	27
Figura 15. Esquema de la antena [40].	29
Figura 16. Catálogo dieléctricos MATLAB.	30
Figura 17. Técnica de alimentación con línea de microstrip.	33
Figura 18. Técnica de alimentación con sonda coaxial.	34
Figura 19. Alimentación por proximidad [43].	34
Figura 20. Alimentación por ranura [43].	35
Figura 21. Definición de una antena tipo parche MATLAB [44].	37
Figura 22. Antena transmisora tipo parche en MATLAB.	39
Figura 23. Diagrama de radiación en MATLAB.	40
Figura 24. Antena receptora tipo parche en MATLAB.	42
Figura 25. Diagrama de radiación antena receptora.	42
Figura 26. Array cuadrado.	45
Figura 27. Patrón de radiación para la constelación OneWeb.	48

Figura 28. Patrón de radiación para la constelación Amazon. ....	48
Figura 29. EIRP en función del número de elementos para transmisión. ....	50
Figura 30. Diagrama de radiación con elevación a 0° para transmisión. ....	51
Figura 31. Diagrama de radiación con elevación a 15° para transmisión. ....	52
Figura 32. Diagrama de radiación con elevación a 45° transmisión. ....	52
Figura 33. Ganancia en función del número de elementos para recepción. ....	54
Figura 34. Diagrama de radiación a 0° para recepción.....	56
Figura 35. Diagrama de radiación a 15° para recepción. ....	56
Figura 36. Diagrama de radiación a 45° para recepción. ....	56
Figura 37. Elementos orbitales [48].....	58
Figura 38. Conexión satélite gateway.....	62
Figura 39. Array circular conformado.....	68
Figura 40. Presupuesto y amortizaciones COITT. ....	76

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Relación entre elementos radiantes y la ganancia. ....	19
Tabla II. Frecuencias Ku y Ka más utilizadas [28].....	25
Tabla III. Rangos de frecuencias designados por la ITU [30] .....	26
Tabla IV. Constelaciones LEO activas.....	28
Tabla V. Dimensiones de la antena transmisora. ....	36
Tabla VI. Ganancia antena transmisora para cada grosor y tipo de sustrato. ....	38
Tabla VII. Dimensiones de la antena receptora.....	41
Tabla VIII. Ganancia antena receptora para cada grosor y tipo de sustrato. ....	43
Tabla IX. Datos de referencia para el diseño de arrays. ....	45
Tabla X. Cálculos teóricos de las constelaciones en función del número de elementos. ....	46
Tabla XI. Ganancia en función del número de elementos para transmisión. ....	49
Tabla XII. EIRP en función del número de elementos de cada constelación para transmisión. ....	51
Tabla XIII. Cálculos teóricos de las constelaciones en función del número de elementos para recepción.....	53
Tabla XIV. Ganancia en función del número de elementos para recepción. ....	54
Tabla XV. Ganancia en función del número de elementos por constelación para recepción.. ....	55
Tabla XVI. Características orbitales iniciales [49]. ....	63
Tabla XVII. Planes futuros de constelaciones [49].....	64
Tabla XVIII. Rangos de operación de las constelaciones [49].....	64
Tabla XIX. Tabla resumen resultados obtenidos para transmisión. ....	66
Tabla XX. Tabla resumen resultados obtenidos para recepción. ....	66
Tabla XXI. Coste recursos hardware. ....	74
Tabla XXII. Coste recursos software. ....	75
Tabla XXIII. Presupuesto del trabajo tarifado y amortización de los recursos hardware y software. ....	75
Tabla XXIV. Coste material fungible. ....	77
Tabla XXV. Presupuesto total del Trabajo de Fin de Grado.....	77



# ACRÓNIMOS

2D	<i>2 Dimensions</i>
3D	<i>3 Dimensions</i>
5G	Quinta Generación
EIRP	<i>Effective Radiation Power</i>
EITE	<i>Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica</i>
FSS	<i>Fixed Satellite Service</i>
G/T	<i>Gain-to-noise-temperature</i>
GEO	<i>Geostationary Orbit</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>
RF	<i>Radiofrecuencia</i>
TFG	<i>Trabajo Fin de Grado</i>
ULPGC	<i>Universidad de Las Palmas de Gran Canaria</i>
URA	<i>Uniform Rectangular Array</i>
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>



## Capítulo 1: Introducción

En el presente capítulo se expone el planteamiento del problema a abordar con la realización de este Trabajo de Fin de Grado (TFG), así como los objetivos a alcanzar durante su elaboración. Además, se realiza una breve introducción sobre los satélites LEO y los *phased array*. En última instancia se incluye el peticionario y se desglosa la estructura global del documento.

### 1.1 Satélites LEO

En primer lugar, y a modo de introducción, se define el concepto de satélites LEO (*Low Earth Orbit*) y por qué resultan de gran utilidad. Los satélites LEO son aquellos que orbitan a una baja altitud de la superficie terrestre. Son capaces de completar una órbita entre 40 y 100 minutos. Se sitúan en altitudes entre los 500 y 2000 km [1]. Estos satélites roorbitan siguiendo siempre la misma ruta, tal como se ilustra en la Figura 1. De esta manera, existe un mayor número de rutas disponibles [1]. Además, la proximidad de los satélites a la superficie ofrece ventajas sobre otros satélites, pudiendo recopilar información sobre la tierra y tomar imágenes satelitales de la misma con baja latencia.

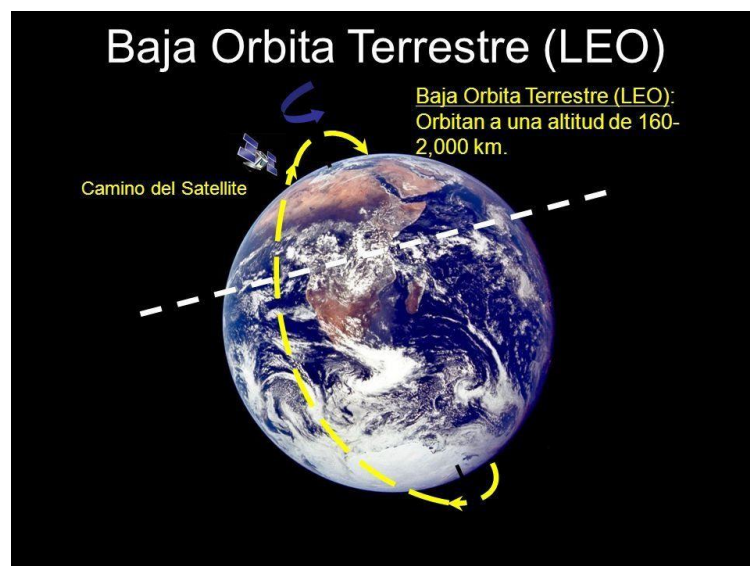


Figura 1. Satélites LEO [2].

La velocidad de los satélites LEO resulta de gran utilidad para las telecomunicaciones. De hecho, debido a su baja altitud, LEO se presenta como un añadido a las comunicaciones de quinta generación (5G), mejorando el ancho de banda

de las comunicaciones móviles otorgando una cobertura global, y permitiendo una amplia gama de aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT) [3].

La constelación de satélites Starlink de SpaceX es un ejemplo destacado de una constelación LEO en desarrollo. Esta constelación tiene como objetivo proporcionar conectividad global de Internet de alta velocidad a áreas remotas y rurales mediante una red de miles de satélites en órbita LEO.

No obstante, al situarse relativamente cerca de la Tierra, debido a su baja altitud, los satélites LEO tienen una cobertura limitada en comparación con los satélites en órbita geoestacionaria. Para proporcionar una cobertura global, se requiere una constelación de satélites LEO, donde múltiples satélites trabajan en conjunto para cubrir diferentes áreas de la Tierra.

En los últimos años, ha habido un aumento significativo en la cantidad de satélites en órbita LEO ya que son satélites relativamente pequeños, por lo que su producción es mucho más rápida y económica que la de sus hermanos mayores. Estos satélites se mueven rápidamente alrededor de la Tierra y, por lo tanto, pueden proporcionar mayor cobertura y transmisión de datos más rápida que los satélites geoestacionarios (GEO). Para poder lograr una cobertura mundial, serían necesarios unos 40 satélites, incluyendo una antena orientable para receptores/transmisores de alta potencia y bajo ruido [3][4].

## 1.2 Array de antenas en fase

Para realizar la comunicación con los satélites LEO, se utilizan *array* de antenas en fase, también conocidos como *phased array*. A diferencia de las antenas convencionales, donde la dirección de radiación se logra mediante la orientación mecánica de la antena, el funcionamiento de los *phased array* se basa en una agrupación de antenas donde las fases relativas de las señales que alimentan a cada antena varían con el objetivo de obtener un diagrama de radiación predefinido. De esta manera, y como se ilustra en la Figura 2, se concentra toda la potencia en una dirección concreta. Para el resto de las direcciones, el vector suma de las ondas radiadas desde todos los elementos de la antena se ve mermado, pudiendo llegar a suprimirse por completo. Esto permite variar de forma dinámica la dirección del haz, sin necesidad de movimientos mecánicos. Esto resulta de gran utilidad para realizar el seguimiento rápido de un



objetivo, como en radares de defensa aérea, sistemas de comunicación de satélites y radares meteorológicos [5].

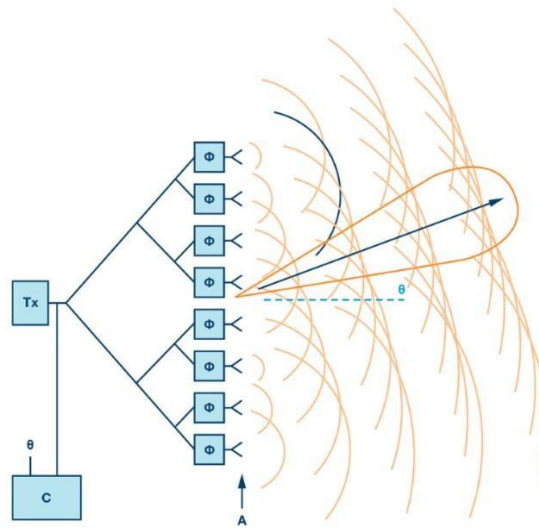


Figura 2. Array de antenas en fase [6].

Este tipo de antenas, en comparación con las antenas parabólicas convencionales, son de gran interés gracias a su bajo coste, tamaño, ganancia y reducción de interferencias, además de mejorar el apuntamiento [7].

Además de la capacidad de formar haces direccionales, los *phased array* también ofrecen la posibilidad de ajustar la forma del patrón de radiación, lo que permite un control preciso de la cobertura y la forma del haz. Otra ventaja clave de los *phased array* es su capacidad de recibir y transmitir señales simultáneamente en múltiples direcciones. Esto es posible gracias a la capacidad de los elementos radiantes para funcionar como antenas de doble uso, lo que permite la transmisión y recepción en el mismo *array*.

Es importante destacar que los *arrays* de antenas juegan un papel fundamental en sistemas de radar, comunicaciones satelitales y redes móviles 5G. Por ejemplo, las redes móviles 5G requieren de antenas direccionales que cambien la dirección apuntada de forma dinámica [1].

En la elaboración de este TFG se realiza el correspondiente análisis de *arrays* de antenas en fase en MATLAB para las constelaciones LEO. Anteriormente se han utilizado otros métodos, como un flujo de trabajo basado en herramientas de Keysight. Con MATLAB pretendemos reducir el tiempo de simulación, con la finalidad de poder estimar

el número de elementos de un *array* de antenas.

### 1.3 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado consiste realizar un análisis sobre el funcionamiento de los *arrays* de antenas en fase para constelaciones LEO en MATLAB. Para llevarlo a cabo esta tarea empezaremos realizando un estudio previo sobre la materia, y finalizaremos diseñando un *array* de antenas para transmisión y recepción haciendo uso de MATLAB. A continuación, se desglosan los objetivos del proyecto:

- **O1: Realizar un estudio de los *arrays* de antenas.** Se realiza un análisis para definir el diseño del sistema, así como los componentes necesarios de la antena para poder cumplir con las especificaciones planteadas.
- **O2: Realizar la selección de la tecnología para el diseño de la antena.** Se realizará una búsqueda centrada en un sustrato que sea capaz de cumplir con las especificaciones planteadas para la fabricación y estructura física de la antena. De todas maneras, se tendrá en cuenta la compatibilidad de la tecnología seleccionada para tener un compromiso entre costes y viabilidad.
- **O3: Simulación del funcionamiento de la antena.** Se definen los parámetros de diseño de la antena. Se validarán los resultados obtenidos mediante simulaciones realizadas en MATLAB.
- **O4: Documentación y memoria.** Realización la memoria pertinente que contenga información detallada sobre la elaboración del proyecto.

### 1.4 Peticionario

La realización de este Trabajo de Fin de Grado viene motivada por la Escuela de Ingeniería de Telecomunicación y Electrónica (EITE) de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), como requisito fundamental para la obtención del título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías Telecomunicación y obtener los créditos correspondientes a la asignatura Trabajo de Fin de Grado.

## 1.5 Estructura de la memoria

La memoria está estructurada en 7 capítulos. A continuación, se exhibe un resumen sobre el contenido de cada capítulo:

En el capítulo 1, se presenta la motivación que ha impulsado la realización de este Trabajo de Fin de Grado. En el capítulo 2 se profundiza en los aspectos teóricos más relevantes relacionados con la temática del proyecto, necesarios para comprender el contexto en el que se desarrolla el proyecto.

En el capítulo 3, se explican las principales características del software MATLAB, así como las herramientas específicas utilizadas durante la elaboración del proyecto.

El capítulo 4 se centra en el estudio de la tecnología empleada en el proyecto. Se realiza un análisis exhaustivo de los diferentes componentes de una antena, examinando sus características y funcionalidades con el objetivo de comprender su papel en el proyecto.

En el capítulo 5 se lleva a cabo una estimación del número de elementos radiantes en MATLAB para un array de transmisión en la banda de 27,5 - 30 GHz, considerando diversas constelaciones. Se exploran las variables y los parámetros involucrados en este proceso de estimación. Posteriormente en el capítulo 6 se estima el número de elementos radiantes en MATLAB para un array de recepción en la banda de 17,8 - 20,2 GHz, también considerando diferentes constelaciones. En ambos capítulos se examinan los resultados obtenidos y se analizan las implicaciones de estas estimaciones.

Para concluir, en el capítulo 7 se evalúan los resultados obtenidos en el proyecto y extraer las conclusiones más significativas. Además, se presentan posibles mejoras o sugerencias para la ampliación del proyecto.



## Capítulo 2: Parámetros de las antenas

### 2.1 Introducción

Tras haber definido los objetivos del proyecto en el Capítulo 1, en este capítulo vamos a definir los conceptos y parámetros clave para la realización del proyecto. En primer lugar, explicaremos el funcionamiento de los *arrays* de antenas en fase, así como los parámetros característicos de las antenas.

También veremos la relación existente entre los elementos radiantes o antenas en el desempeño del sistema.

### 2.2 Parámetros de un *array* de antenas en fase

En ese apartado se abordan en detalle los parámetros característicos de un *array* de antenas en fase. Estos parámetros resultan de vital importancia ya que influyen en el funcionamiento y desempeño de la antena.

#### 2.2.1 Elevación y azimut

Para poder variar el ángulo de apuntamiento de un *array* debemos considerar las dimensiones con las que se desee trabajar. Existen *arrays* de una, dos y tres dimensiones. Para un *array* unidimensional, el ángulo de apuntamiento es variable únicamente para el eje x. El desfase ( $\Delta\phi$ ) entre cada elemento radiante viene dado por la Ecuación (1) [8]

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta \quad (1)$$

donde:

- $\Delta\phi$ : desfase entre cada elemento radiante
- $\lambda$ : longitud de onda
- $d$ : distancia entre antenas
- $\theta$ : ángulo de apuntamiento

Por otro lado, para *arrays* de dos dimensiones, el ángulo es variable tanto para el plano vertical, es decir el eje y, como para el plano horizontal, correspondiente al eje x.

El ángulo azimut ( $\phi$ ) indicia el punto exacto de colocación de la antenna para el plano horizontal. Por otra parte, la elevación ( $\theta$ ) hace referencia al plano vertical. En la

Figura 3 podemos observar la representación de ambos ángulos. El desfase entre antenas para un *array* de dos dimensiones viene dado por las Ecuaciones (2) y (3) [8]

$$\Delta\phi_x = \frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin\theta \cos\phi \quad (2)$$

$$\Delta\phi_y = \frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin\theta \sin\phi \quad (3)$$

donde:

- $\Delta\phi_x$ : desfase en el eje x
- $\Delta\phi_y$ : desfase en el eje y
- $\lambda$ : longitud de onda
- $d$ : distancia entre antenas
- $\theta$ : ángulo de elevación
- $\phi$ : ángulo azimut

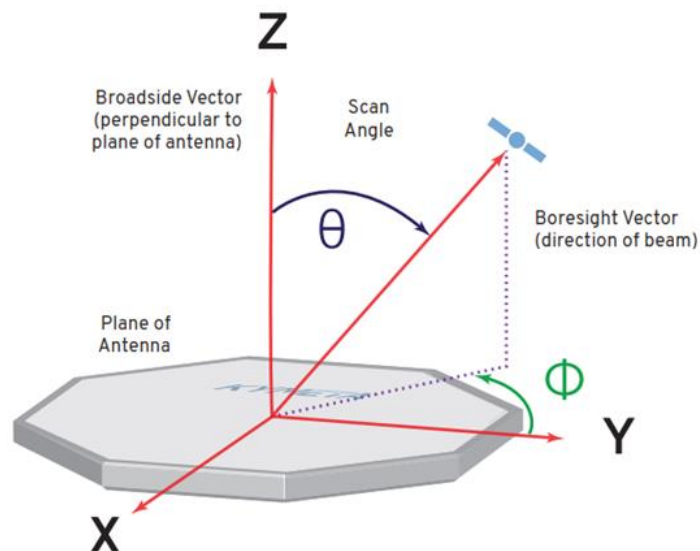


Figura 3. Elevación y azimut [9].

### 2.2.2 Beam Squint

Es el cambio producido en la dirección del haz en función de la frecuencia de operación, polarización u orientación de la antenna. Esta diferencia aumenta al operar con un amplio ancho de banda, ya que la orientación del haz se produce por un desfase, así que el haz es variable en función de la frecuencia. Sin embargo, esta desviación del haz puede producirse por otros factores como la frecuencia de operación, la configuración física de la antenna o la forma en que se alimenta, pudiendo provocar errores en el apuntamiento medida que más nos acercamos a los límites del ancho de banda. En la Figura 4 se ilustra el concepto de *beam squint*.

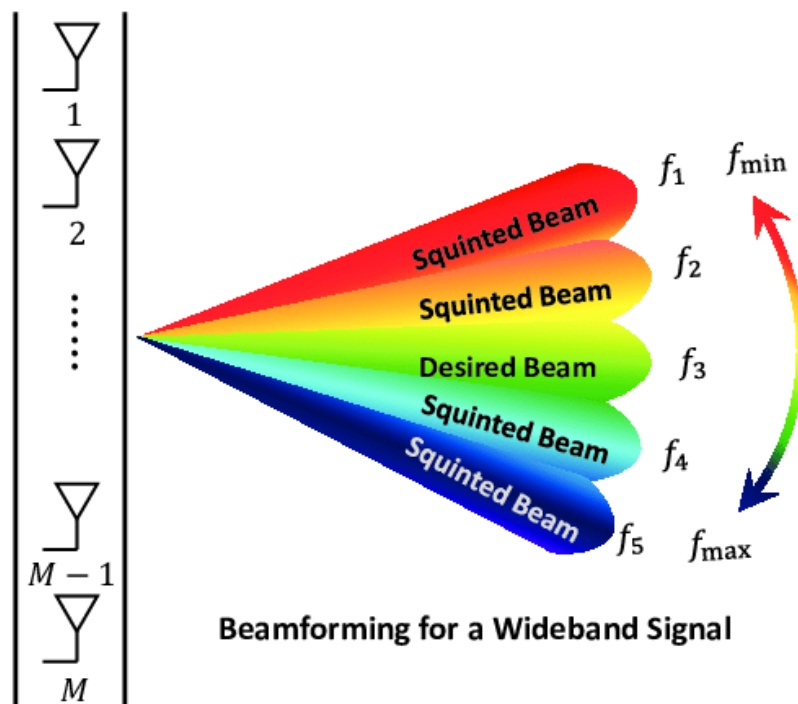


Figura 4. Beam Squint [10].

El *beam squint* se puede calcular a partir de la Ecuación (4):

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{f_0}{f} \sin\theta_0\right) - \theta_0 \quad (4)$$

Cabe destacar que en el punto  $\theta = 0$  no existe desfase entre los elementos y por tanto no hay *beam squint* [11]. En consecuencia, la cantidad de *beam squint* viene dada en función del ángulo  $\theta$  y de la variación de la frecuencia, como se ilustra en la Figura 5.

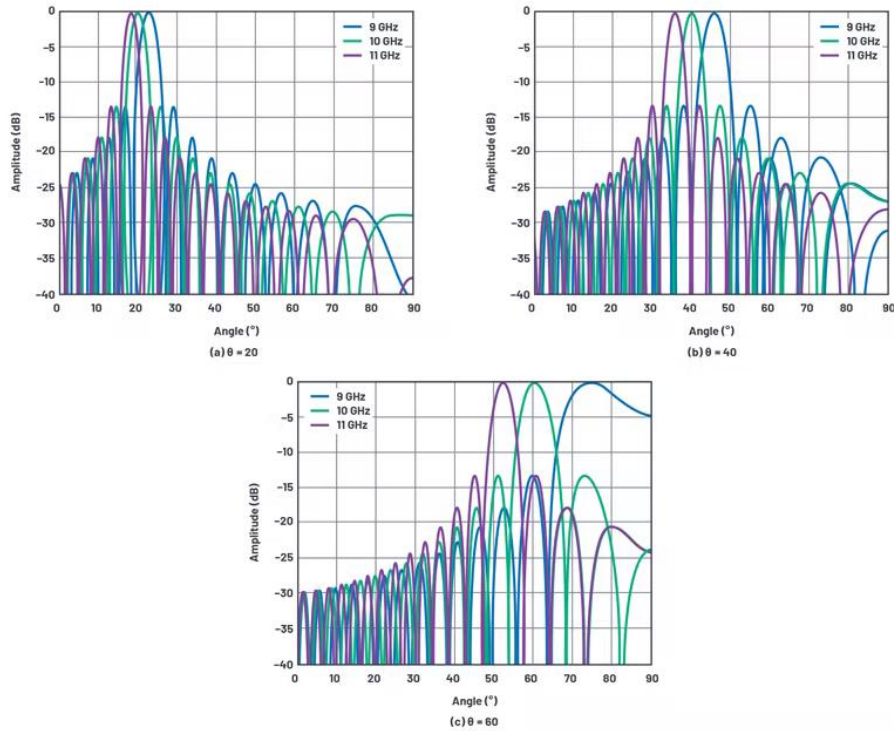


Figura 5. Beam squint en función de la elevación ( $\theta$ ) y de la frecuencia [11].

En este ejemplo, la frecuencia central es de 10 GHz, el ancho de banda de modulación es de 2 GHz, y es apreciable que el haz cambia de dirección en función tanto de la frecuencia como del ángulo inicial del haz. A medida que el ángulo del haz se aleja del punto de mira, también aumenta la desviación del ángulo del haz en función de la frecuencia. Es importante resaltar que una frecuencia por debajo de la frecuencia central provoca una desviación mayor que una frecuencia por encima de la frecuencia central, tal como se ilustra en la Figura 6.



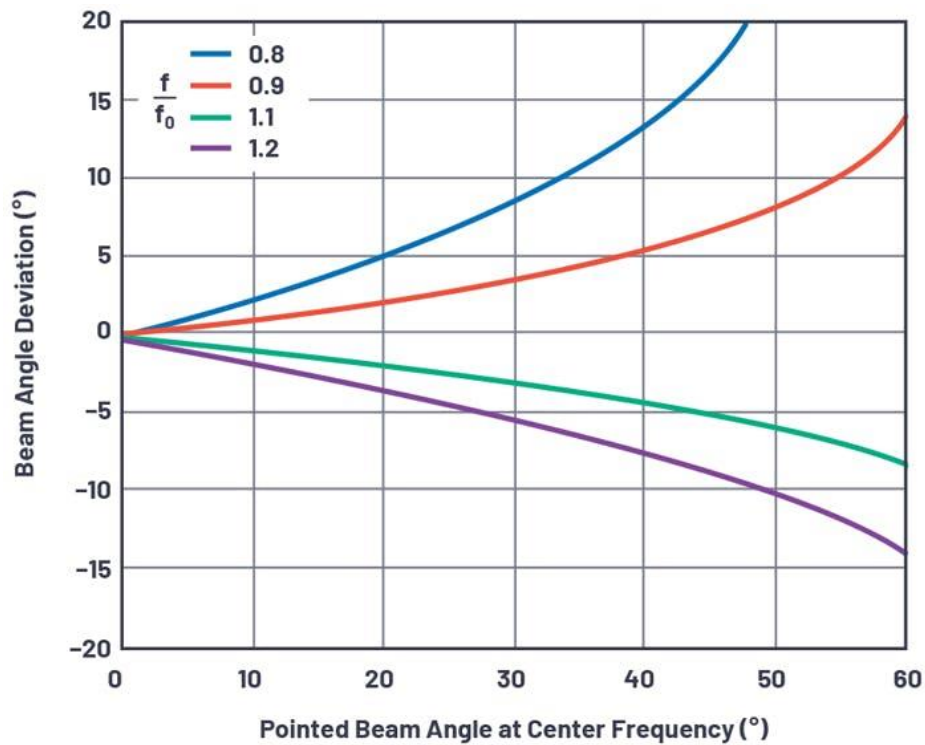


Figura 6. Desviación del haz en función de la frecuencia.

El objetivo de los *arrays* de antenas en fase es poder trabajar con el mayor ancho de banda posible y reducir al mínimo el *beam squint* [12]. Un *array* de antenas en fase puede generar un haz de radiación que se mantiene alineado y estable en una dirección específica, incluso a diferentes frecuencias de operación. Al ajustar las fases y amplitudes de la señal de cada elemento de antena dentro del *array*, se puede lograr un preciso apuntamiento del haz, minimizando así el *beam squint* y maximizando la directividad y eficiencia del sistema de antenas.

## 2.3 Parámetros de las antenas

### 2.3.1 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación consiste en una representación gráfica de la distribución espacial de la radiación electromagnética de una antena [13]. Se puede representar en tres dimensiones, como se ilustra en la Figura 7.

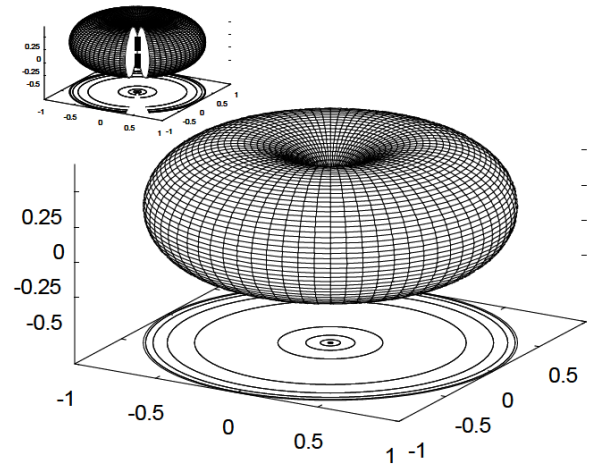


Figura 7. Diagrama de radiación para un dipolo de media onda [14].

Dada la dificultad de representar gráficamente el diagrama tridimensional se opta por representar cortes del diagrama utilizando coordenadas polares o cartesianas. En la Figura 8 se pueden apreciar los cortes para el dipolo de media onda, tanto en coordenadas cartesianas como en coordenadas polares.

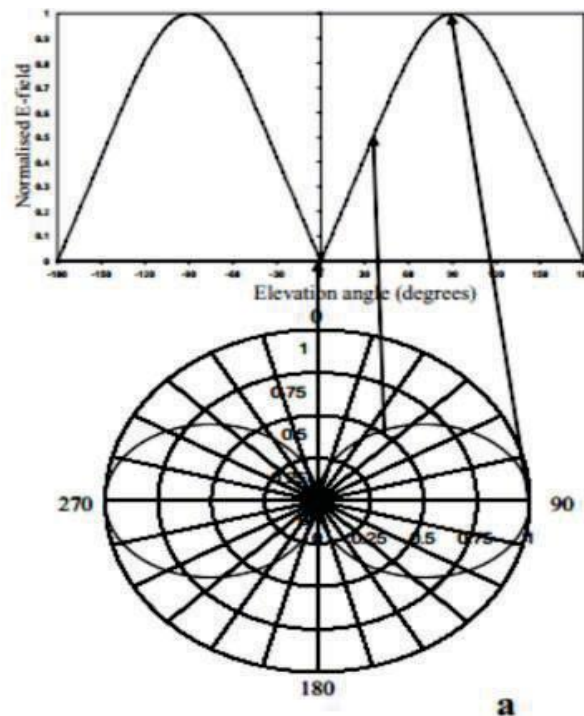


Figura 8: Dipolo de media onda [14].

En función del diagrama de radiación, se puede realizar una clasificación de los tipos de antenas y definir su directividad [15].

### 2.3.2 Directividad

La directividad de una antena se define como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección concreta ( $\theta, \phi$ ) a una distancia dada, y la densidad de potencia que radiaría a la misma distancia una antena isotrópica, que radia uniformemente en todas las direcciones, como se muestra en Figura 9 [16].

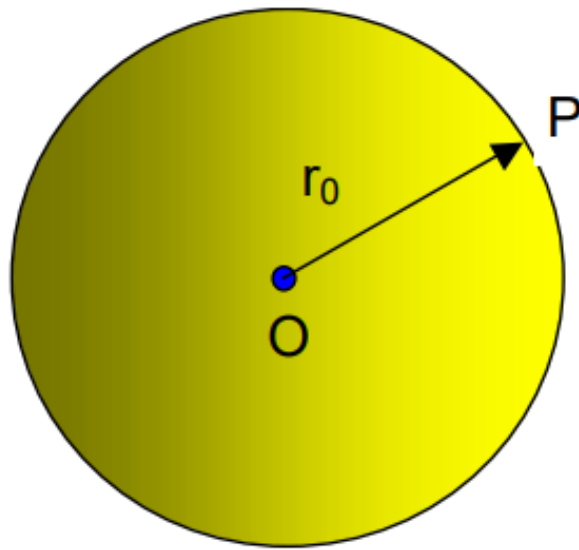


Figura 9. Radiación isotrópica [17].

En la Ecuación (5) se muestra la expresión de la directividad ( $D(\vartheta, \varphi)$ ), donde  $P(\vartheta, \varphi)$  representa la potencia radiada por la antena en una dirección concreta y  $P_T$  la potencia radiada por una antena isotrópica [14].

$$D(\vartheta, \varphi) = \frac{P(\vartheta, \varphi)}{P_T/4\pi} \quad (5)$$

### 2.3.3 Ganancia

La ganancia es un parámetro similar al parámetro de directividad. Sin embargo, la ganancia no tiene en cuenta la potencia radiada por la antena, sino la potencia que se le entrega a la misma, es decir,  $P_{IN}$ . La ganancia ( $G(\vartheta, \varphi)$ ) se calcula empleando la Ecuación (6)[14]

$$G(\vartheta, \varphi) = \frac{P(\vartheta, \varphi)}{P_{IN}/4\pi} \quad (6)$$

#### 2.3.4 Eficiencia.

La eficiencia ( $n$ ) mide la potencia que es capaz radiar la antena en comparación con la potencia entregada a la misma. También se puede definir como la relación entre ganancia ( $G(\vartheta, \varphi)$ ) y directividad ( $D(\vartheta, \varphi)$ ) [18]. Su valor está comprendido entre 0 y 1 y viene dado por la Ecuación (7), donde  $P_T$  representa la potencia que es capaz de radiar la antena y  $P_{IN}$  la potencia que es entregada a la antena.

$$n = \frac{G}{D} = \frac{P_T}{P_{IN}} \quad (7)$$

Si analizamos la ecuación apreciamos que la ganancia tiene en cuenta las pérdidas. Si la eficiencia es de valor 1, es decir, que toda la potencia radiada se entrega, la ganancia y la directividad son equivalentes. Además, cuando se trabaja a altas frecuencias, ambos parámetros también son equivalentes, ya que la antena no posee pérdidas [19].

#### 2.3.5 Polarización.

Las antenas crean campos electromagnéticos radiados. La polarización de una onda electromagnética se define como la orientación del vector del campo eléctrico  $E$  [17]. El vector del campo en ese plano puede descomponerse en dos componentes ortogonales,  $E_\theta$  y  $E_\phi$ , cuya amplitud puede ser variable en el tiempo y en el espacio. En función de la diferencia de fases de dichas componentes, se clasifica la polarización de las antenas [20]. La polarización puede ser:

- Polarización elíptica: Describe una elipse en el plano ( $\theta, \phi$ ).
- Polarización lineal: Las componentes tienen la misma amplitud y hay una diferencia de fase de  $\pm 90^\circ$ .
- Polarización circular: La diferencia de fase es de  $0^\circ$  o  $180^\circ$ .

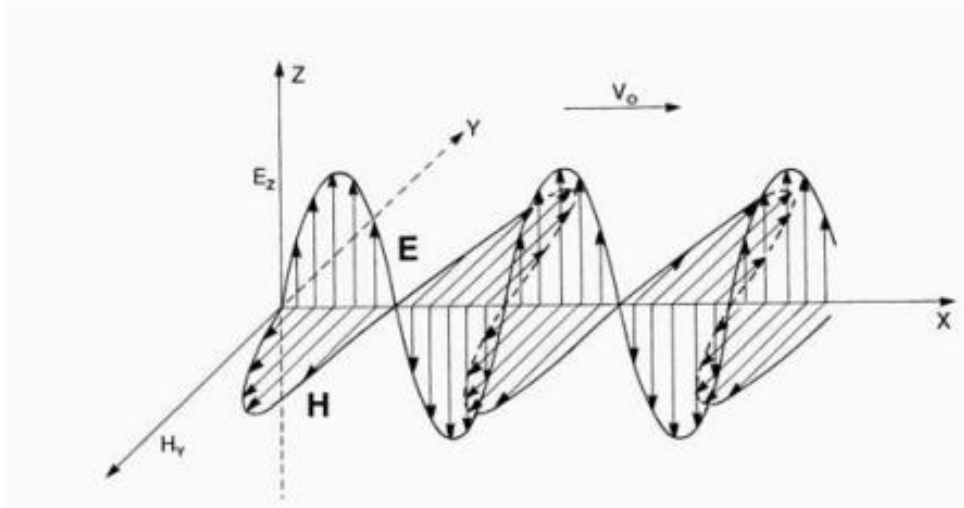


Figura 10. Componentes del campo eléctrico de una onda plana [17].

En el caso de la Figura 10, el vector  $E$  está en el plano  $yz$ , siempre en la dirección  $z$ , de modo que la onda está polarizada verticalmente. Si  $E$  estuviera en el plano  $xy$ , en la dirección  $y$ , la polarización sería horizontal [17].

### 2.3.6 Campo lejano

El campo lejano se define como la región del espacio donde la distancia entre el elemento radiante, en este caso la antena, es lo suficientemente grande como para considerar que el campo eléctrico ( $E$ ) y magnético ( $B$ ) son ortogonales entre sí, describiendo ondas planas. En consecuencia, la amplitud y la fase de la onda son constantes en cualquier punto en un plano perpendicular a la dirección de propagación. En la zona de campo lejano se pueden determinar fácilmente características de las ondas, como la dirección de propagación o el diagrama de radiación [21].

### 2.3.7 Ancho de banda

El ancho de banda de la antena se define como el rango de frecuencias sobre las cuales la antena es capaz de funcionar de forma eficiente. Si suponemos que la frecuencia máxima es  $f_H$  la frecuencia mínima es  $f_L$  y la frecuencia central es  $f_c$ , podemos definir el ancho de banda ( $BW$ ) como se muestra en la Ecuación (8) [20]:

$$BW = 100 * \frac{f_H - f_L}{f_c} \quad (8)$$

### 2.3.8 VSWR

El VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) o coeficiente de onda estacionaria se define como la relación entre las ondas de tensión transmitidas y reflejadas en un sistema de comunicación. En un sistema de comunicación ideal el VSWR es 1, ya que toda la energía es transmitida a la carga. Sin embargo, en los sistemas reales existe un desajuste de impedancias entre la fuente y la carga ( $Z_L$ ), provocando que parte de la energía transmitida sea reflejada. Estas reflexiones de la señal causan interferencias y cambios bruscos en la señal de tensión. A continuación, en la Figura 11 se detalla mejor dicho concepto [22].

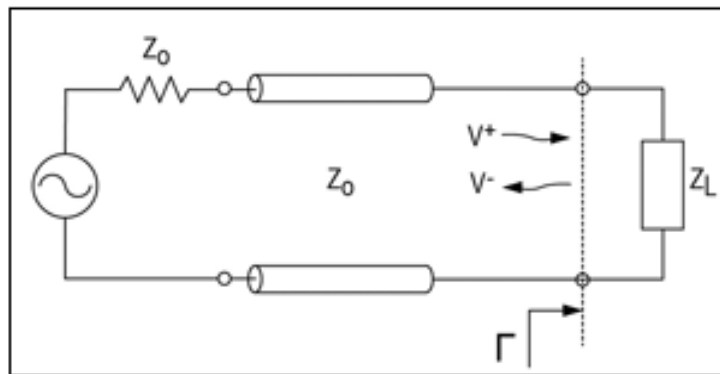


Figura 11. Línea de transmisión [22].

En la Figura 11 la  $V^+$  representa la señal incidente y la  $V^-$  la señal reflejada. La reflexión ocurre en el punto definido como  $r$ .

De esta manera, el VSWR es una medida de la eficacia con la que se transmite la potencia de radiofrecuencia (RF) desde la fuente de alimentación, a través de una línea de transmisión, hasta la carga[22].

Se puede representar como la relación entre el valor máximo y mínimo de voltaje de la antena, como se ilustra en la Ecuación (9)[20]:

$$VSWR = \frac{V^+}{V^-} \quad (9)$$

### 2.3.9 Parámetros S

Las antenas, al igual que otros circuitos, pueden caracterizarse como una red de dos puertos. Los parámetros S describen la respuesta de una red de N puertos para una señal o señales de entrada hacia los otros puertos. Para calcular dicha respuesta, la red se sintetiza a partir de una matriz cuadrada de números complejos, llamada matriz de parámetros S [23].

Los parámetros S se representan como  $S_{ij}$ , donde i y j son los índices de los puertos. El primer número corresponde al puerto de respuesta, mientras que el segundo corresponde al puerto de incidencia [24]. En la Figura 12 se representa una red de dos puertos.

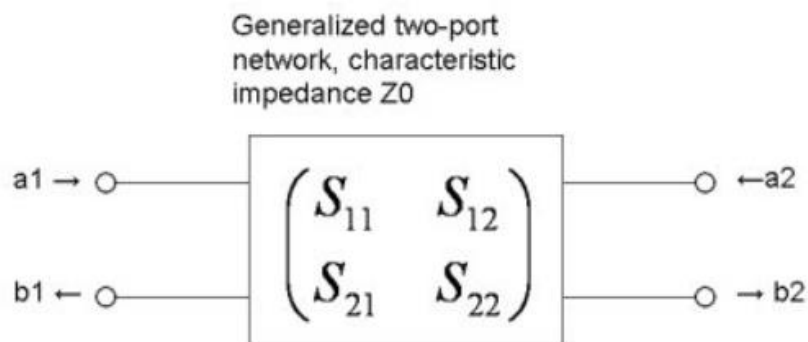


Figura 12. Parámetros S [24].

Los parámetros S se pueden clasificar como:

- $S_{11}$ : coeficiente de reflexión del puerto de entrada.
- $S_{12}$ : ganancia de tensión en reversa.
- $S_{21}$ : ganancia de tensión en directa.
- $S_{22}$ : coeficiente de reflexión de la tensión del puerto de salida.

### 2.3.10 Pérdidas de retorno.

Las pérdidas de retorno corresponden a la reflexión de potencia de una señal cuando entra en una línea de transmisión. Corresponde al parámetro  $S_{11}$ [20].

### 2.3.11 Área efectiva

En una antena receptora, se define como el área útil ( $A_{ef}$ ) de la antena para recibir onda incidente. Matemáticamente, se define como la relación entre la potencia

recibida (S) y la densidad de potencia incidente ( $P_i$ ) en una antena (Ecuación(10)). La antena debe estar adaptada a la carga, de forma que la potencia transferida sea la máxima [14].

$$A_{ef} = \frac{S}{P_i} \quad (10)$$

#### 2.3.12 EIRP.

El EIRP (*Effective Isotropic Radiation Power*) se define como la potencia que debe ser radiada por una antena isotrópica hipotética para lograr el mismo nivel de señal en la dirección de máxima radiación de una antena [25]. Esta medida responde a la Ecuación (11), donde  $G_T$  es la ganancia de la antena transmisora, y  $P_T$  es la potencia total transmitida.

$$EIRP = G_T P_T \quad (11)$$

#### 2.3.13 Sensibilidad.

Para hallar la sensibilidad ( $P_{EL}$ ) del receptor se emplea la Ecuación (12):

$$P_{EL} = EIRP + 10 \log \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 - L_{TM} + G_e \quad (12)$$

donde:

- $P_{EL}$ : sensibilidad del receptor.
- $L_{TM}$ : representa las pérdidas debido a al medio de transmisión.
- $G_e$ : la ganancia de cada elemento radiante.
- $\lambda$ : longitud de onda.
- EIRP.

#### 2.3.14 G/T

La G/T (*gain-to-noise-temperature*) de una antena es la figura de mérito que representa la calidad de un satélite en un receptor de una estación terrena. Viene dada por la ganancia de la antena (G) en dB en una dirección específica y el ruido térmico (T), en Kelvin, que se recibe en esa misma dirección [12].



Debido a las potencias extremadamente bajas de la portadora de recepción que normalmente se experimentan en los sistemas satelitales, se añade un LNA (*Low Noise Amplifier*) en el punto de alimentación de la antena.

#### 2.4 Influencia los elementos radiantes sobre el *array* de antenas

Un *array* de antenas en fase dispone de múltiples antenas. Suponiendo que número de antenas de antenas de define como  $N$ , la ganancia total del *array* de antenas viene dado por la Ecuación (13):

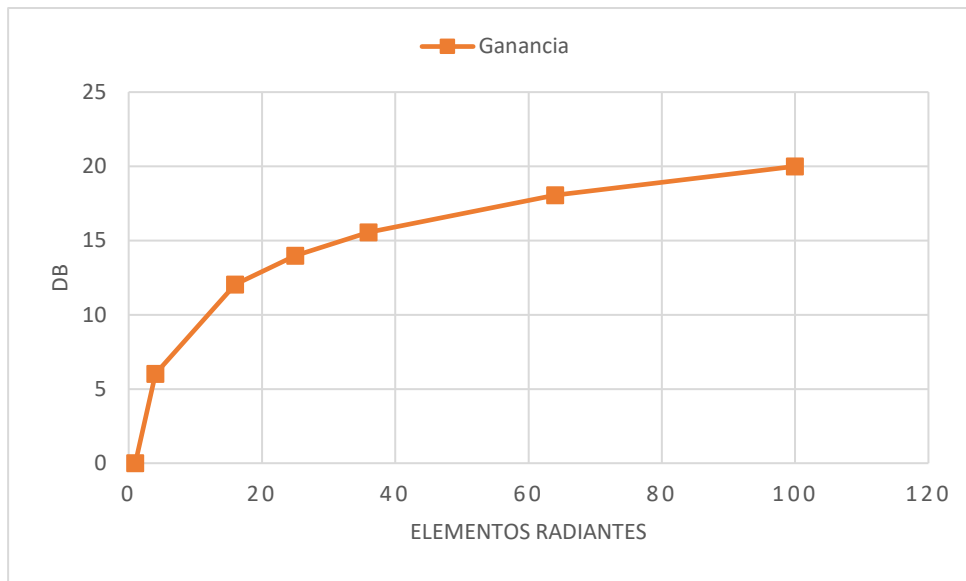
$$\text{Array antenna gain} = 10 \log_{10} N + G_E + 10 \log_{10}(1 - |\Gamma|^2) \quad (13)$$

donde  $G_E$  representa la ganancia de cada antena y  $\Gamma$  representa el coeficiente de onda estacionaria.

A continuación, en la Figura 13 se muestra una gráfica realizada con antenas isotrópicas, esto es, ganancia ideal individual igual a 0, donde se observa la relación logarítmica de la ganancia del *array*, en función del número de elementos radiantes. Para realizar dicha gráfica se ha partido de los datos que se muestran en la Tabla I.

Tabla I. Relación entre elementos radiantes y la ganancia.

Array	Elementos radiantes	Ganancia teórica (dB)	Ganancia en Matlab
10	100	20	20
8	64	18	18
6	36	15,563	15,563
5	25	13,9794	13,9794
4	16	12,0412	12,0412
2	4	6,0206	6,0206
1	1	0	0



*Figura 13. Ganancia vs número de elementos radiantes.*

## 2.5 Conclusiones

En ese capítulo hemos visto los parámetros característicos de los *arrays* de antenas en fase. A partir de dichos parámetros, podemos definir las especificaciones con las que debe cumplir la antena.

Además, también hemos visto la relación que existe entre el número de elementos radiantes que conforman el *array* y la ganancia. La relación, es directamente proporcional, es decir, a mayor número de elementos radiante, mayor es la ganancia.

Tras haber definido estos parámetros, vamos a realizar una búsqueda relacionada con el material y tecnología a utilizar para cumplir con las especificaciones de la antena.

## Capítulo 3: Software MATLAB

### 3.1 Introducción

En este capítulo se explicarán los principios básicos del software MATLAB y sus principales usos. Adicionalmente, se explicarán las funciones o *toolboxes* utilizados en el desarrollo del proyecto.

MATLAB es una abreviatura del término ‘Laboratorio de matrices’. Se trata de un *software* creado por la empresa Mathworks y es considerada como una de las herramientas más potentes a la hora de realizar cálculos y representaciones gráficas de problemas complejos.

Este programa se caracteriza por tener su propio lenguaje de programación, con lo cual dispone de su propia extensión de archivos (.m). Como consecuencia, resulta de vital importancia conocer los comandos disponibles, así como las normas de uso del programa. Las funciones del programa varían en función del *toolbox* utilizado. Los *toolboxes* se definen como paquetes adicionales que permiten al usuario realizar funciones y acciones específicas que no se encuentran por defecto en el programa.

Otra de las grandes funcionalidades de MATLAB, reside en la capacidad que posee para representar gráficamente modelos en 2D (*Two Dimensions*) y 3D (*Three Dimensions*). Este aspecto resulta fundamental para poder interpretar los resultados obtenidos y para poner en contexto los conceptos teóricos.

A continuación, se explicarán en detalle cada uno de los *toolboxes* utilizados.

### 3.2 Antenna Toolbox

*Antenna Toolbox* ofrece una variedad de funciones y aplicaciones para el diseño, análisis y visualización de elementos y matrices de antenas. Esta herramienta permite diseñar antenas individuales y crear matrices de antenas utilizando elementos predefinidos. Además, brinda la posibilidad de visualizar los resultados tanto en dos dimensiones (2D) como en tres dimensiones (3D). De esta manera se puede apreciar de forma gráfica el diseño de la antena y su comportamiento.

Dentro de este *toolbox* hemos utilizado las siguientes funciones:

- ❖ *PatchMicrostrip*: permite crear una antena tipo parche.
- ❖ *dielectric*: para especificar las características del material dieléctrico utilizado como sustrato.
- ❖ *Show*: para mostrar gráficamente el diseño de la antena.
- ❖ *Pattern*: muestra el patrón de radiación tridimensional de la antena.
- ❖ *PatternAzimuth*: muestra el patrón de azimut de la antena.

Estas funciones se explicarán más en profundidad en los capítulos posteriores, ya que serán utilizadas recurrentemente.

### 3.3 Phased Array Toolbox

Este *toolbox* se utiliza para diseñar y simular sistemas de matrices de sensores y *beamforming* en diferentes aplicaciones, como comunicaciones inalámbricas, radar, sonar y acústica. En el ámbito de las comunicaciones, se pueden diseñar antenas con múltiples haces y orientación electrónica para sistemas como la telefonía móvil 5G, por ejemplo.

Dentro de este *toolbox* hemos utilizado principalmente el sistema de objeto *phased.URA*. Este sistema nos permite crear un *array* rectangular uniforme, *Uniform Rectangular Array* (URA), constituido por antenas en fase isotrópicas. Los elementos del *array* están contenidos en el plano yz en una disposición rectangular. La dirección de apuntamiento del *array* corresponde con el eje x positivo. Para poder caracterizar al URA los parámetros más relevantes son:

- ❖ *Element*: antena en fase, especificada a partir del *Antenna toolbox*.
- ❖ *Size*: tamaño del *array*. Por defecto, crea un *array* de 2x2. Para una URA, los elementos del arreglo se sitúan de arriba hacia abajo a lo largo de una columna y continúan en las columnas siguientes de izquierda a derecha.
- ❖ *ElementSpacing*: espaciado entre elementos, especificado como un escalar positivo o un vector de 1x2 de valores positivos. Si el espaciado entre elementos es un vector de 1x2, tiene la forma [EspaciadoEntreFilas, EspaciadoEntreColumnas]. Si es un escalar, los espaciados entre filas y columnas son iguales.

Dentro de este sistema de objetos hemos utilizado las funciones de *directivity*, que calcula la directividad del *array* en dBi y *getNumElements* para obtener el número de elementos que constituye al *array*.

### 3.4 Satellite Communication Toolbox

*Satellite Communications Toolbox* ofrece herramientas basadas para diseñar, simular y verificar enlaces y sistemas de comunicación satelital. Brinda la posibilidad de medir y configurar enlaces satelitales de extremo a extremo. Dentro de este *toolbox* las funciones que hemos aplicado han sido las que pertenecen a la creación y visualización de una conexión satelital. Se distinguen las siguientes funciones:

- ❖ *satelliteScenario*: representa en 3D los satélites, las estaciones terrestres y su interacción entre ambos.
- ❖ *satelliteScenarioViewer*: permite la visualización del objeto *satelliteScenario*.
- ❖ *Satellite*: para la creación de un satélite y definir sus características orbitales como excentricidad, inclinación, anomalía verdadera...etc.
- ❖ *GroundStation*: para la creación de la estación terrestre. Para definir sus características hemos utilizados los parámetros de latitud y longitud.
- ❖ *Transmitter*: para definir un transmisor. En este caso hemos utilizado los parámetros de potencia y frecuencia.
- ❖ *Receptor*: para definir un receptor. En este caso el receptor es la estación terrestre. Además, debemos especificar la antena asociada al receptor, así como la orientación del receptor. Para especificar la orientación aplicamos la función de *MountingAngles*, especificado como un vector de fila de tres elementos de números positivos. Los elementos del vector corresponden a los ejes z,y y x respectivamente.
- ❖ *Pattern*: para definir un patrón de radiación al transmisor y receptor. Dicha función se ha caracterizado con el parámetro *size*, el cual define la longitud del patrón de radiación desde la antena hasta el punto de máxima ganancia.
- ❖ *Access*: para crear un análisis de acceso entre los satélites del escenario de simulación y la estación terrestre.
- ❖ *Link*: define el enlace entre los satélites y el receptor.



## Capítulo 4: Selección de la tecnología

### 4.1 Introducción

En este capítulo vamos a definir el rango de frecuencias en el que va a operar la antena, tanto para transmisión como para recepción. Tras haber definido el ancho de banda en el que va a trabajar la antena, también exploraremos en detalle la tecnología y los materiales utilizados en el diseño del *array* de antenas.

### 4.2 Frecuencias de transmisión y recepción

Antes de seleccionar el material necesario para realizar el diseño de la antena, es fundamental escoger la frecuencia de transmisión y recepción que se va a emplear. Para la elección de dicha frecuencia, disponemos de dos opciones, la banda Ku y la banda Ka. La diferencia fundamental entre ambas bandas reside en su rango de frecuencias. Por un lado, la banda Ku emplea frecuencias de 12 hasta 18 GHz, mientras que la banda Ka usa frecuencias de 26,5 hasta 40 GHz. Al aumentar la frecuencia en un sistema Ka disponemos de un mayor ancho de banda, lo que se traduce en una mayor tasa de transferencia de datos [26]. Por otro lado, la banda Ku es capaz de cubrir un área mayor que la banda Ka, y es menos susceptible a presentar interferencias en caso de lluvia. Además, requiere de antenas y equipamiento relativamente pequeño, reduciendo su complejidad y costes[26]. El problema de la banda Ku es que es una banda que está saturada, ya que la mayoría de los satélites GEO ya utilizan esta banda. La ventaja de la banda Ka es que es capaz de reutilizar la misma banda de frecuencias, haciendo uso de *spot beams*, cubriendo por ende un área mayor [27].

A continuación, en la Tabla II se muestran las frecuencias más utilizadas en la actualidad para ambas bandas.

Tabla II. Frecuencias Ku y Ka más utilizadas [28].

Conexión y polarización	Ku-band (GHz)	Ka-band (Ghz)
Tierra al espacio	13,75 - 14,5	29 - 30 o 29,5 - 30
Espacio a la Tierra	10,7 - 12,75	12,7 - 20,2
Polarización	Lineal ortogonal	Circular ortogonal

Para poder elegir la frecuencia correcta, hay que tener en cuenta las regulaciones de la ITU (*International Telecommunications Union*), que permite la coexistencia de satélites GEO y LEO. El principal objetivo de la ITU es regular el uso del espectro de RF en el espacio y evitar las interferencias entre satélites que ya se encuentran en órbita [29]. Cabe destacar que en el 2022 se dio lugar una conferencia de radiocomunicaciones de la ITU donde se realizó el estudio correspondiente para facilitar y regular el uso de bandas de frecuencias para transmisiones desde el espacio hacia la Tierra y viceversa para órbitas no geoestacionarias [29]. A continuación, en la Tabla III se muestran los rangos de frecuencias establecidos por la ITU para satélites GEO y no GEO.

Tabla III. Rangos de frecuencias designados por la ITU [30]

FSS frequency bands		No hard-limits for protection of GSO	Coordination between Non-GSO	Coordination between Non-GSO and GSO	Article 22 EPFD hard-limits are applicable
Earth-space	space-Earth				
	3400-4200 MHz	22.2			Yes (3700-4200)
5725-6700 MHz		22.2			Yes (5925-6700)
6700-7075 MHz		22.2	9.12		Yes (6700-6725)
7250-7750 MHz		22.2			
7900-8400 MHz		22.2			
	10.7-12.95 GHz	22.2	9.12		Yes
	11.2-11.45 GHz	22.2	9.12		Yes
	11.7-12.75 GHz	22.2	9.12		Yes
12.75-13.25 GHz		22.2	9.12		Yes
13.75-14.0 GHz		22.2	9.12		Yes
	17.8-18.6 GHz	22.2	9.12		Yes
	18.6-18.8 GHz	22.2			
	18.8-19.3 GHz		9.12	9.12A	
	19.3-19.7 GHz (MSS FL)		9.12	9.12A	
	19.3-19.7 GHz	22.2			
	19.7-20.2 GHz	22.2	9.12		Yes
	20.2-21.2 GHz	22.2			
27.5-28.6 GHz		22.2	9.12		Yes
28.6-29.1 GHz			9.12	9.12A	
29.5-30.0 GHz		22.2	9.12		Yes
V-band FSS	V-band FSS	22.2	9.12		Yes Single/Aggregate

Como se puede apreciar en la Tabla III, los rangos de frecuencias mostrados sirven para coordinar las transmisiones con los satélites no GEO. Dichas medidas, vienen motivadas por las normas 9.12 y 9.12 A. De esta manera se asegura un uso ecuaníme del espectro. Las frecuencias que protegen las conexiones satelitales se denominan banda de frecuencia FSS (*Fixed-Satellite Service*).

Por otra parte, estableciendo esos rangos de frecuencias se protegen las conexiones satelitales con los satélites geoestacionarios. En la Figura 14 se muestra un esquema de funcionamiento de los satélites LEO para transmisión y recepción.



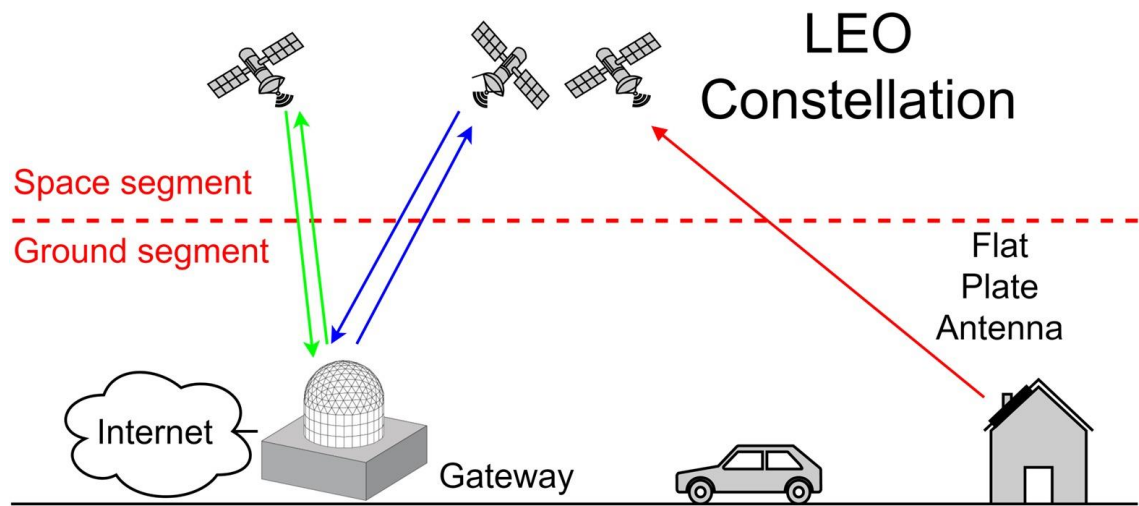


Figura 14: Esquema de transmisión y recepción.

En primer lugar, el satélite recibe la solicitud de conexión del usuario. Los satélites que conforman la constelación LEO se comunican entre ellos para localizar el *gateway* más cercano. A través del *gateway* se realiza la conexión a internet. Para una conexión desde el satélite al usuario, el *gateway* se conecta con el satélite más cercano. Los satélites se comunican entre ellos hasta llegar al usuario. Cuando el *gateway* se conecta al satélite se denomina *uplink*, cuando el satélite se conecta el *gateway* se denomina *downlink*.

A continuación, en la Tabla IV se muestran algunas de las constelaciones LEO existentes hasta día de hoy.

Tabla IV. Constelaciones LEO activas.

Constelaciones LEO	Uplink (GHz)	Downlink (GHz)
Starlink SpaceX [31]	14 - 14,5	10,7 - 12,7
	27,5 - 29,1	17,8 - 18,6
	29,5 - 30	18,8 - 19,3
	47,2 - 52,4	37,5 - 42,5
Telesat [32]	27,5 - 29,1	17,8 - 18,6
	29,5 - 30	18,8 - 19,3
		19,7 - 20,2
OneWeb[33]	14 - 14,5	10,7 - 12,7
	27,5 - 29,1	17,8 - 18,6
	29,5 - 30	18,8 - 19,3
Iridium Next [34]	29,1 - 29,3	19,1 19,6
LeoSat [35]	27,5 - 29,1	17,8 - 18,6
	29,5 - 30	18,8 - 19,3
		19,7 - 20,2
Kepler [36]	14 - 14,5	10,7 - 12,7

Como podemos observar, la mayoría de las costelaciones LEO activas funcionan en la banda de Ka (26.5-40 GHz) para *uplink* y en la banda Ku (12 - 18 GHz) para *downlink*.

Hay otras compañías, como Amazon, que también planean lanzar su propia constelación de satélites LEO gracias a su proyecto Kuiper [37].

Además, también se encuentra en desarrollo una constelación española llamada Startical. El objetivo principal del proyecto es el despliegue de más de 200 nanosatélites en la órbita LEO que cubrirán toda la Tierra para mejorar la gestión del tráfico aéreo [38]. Un factor clave del proyecto es que los aviones no necesitarán equipamiento

adicional para beneficiarse del servicio. Se espera que esta tecnología sea aplicable a otros medios de transporte [39].

Tras haber analizado las ventajas e inconvenientes de cada una de las bandas de frecuencias, para la realización de este TFG se ha decidido trabajar en la banda de frecuencia de 27,5 GHz a 30 GHz para transmisión y 17,8 a 20,2 GHz para recepción.

#### 4.3 Elección del sustrato

Tanto para transmisión como recepción hemos definido un sustrato conformado por una única capa. Además, ambas antenas usarán el mismo esquema de funcionamiento a nivel de sustrato, el cual se muestra en la Figura 15.

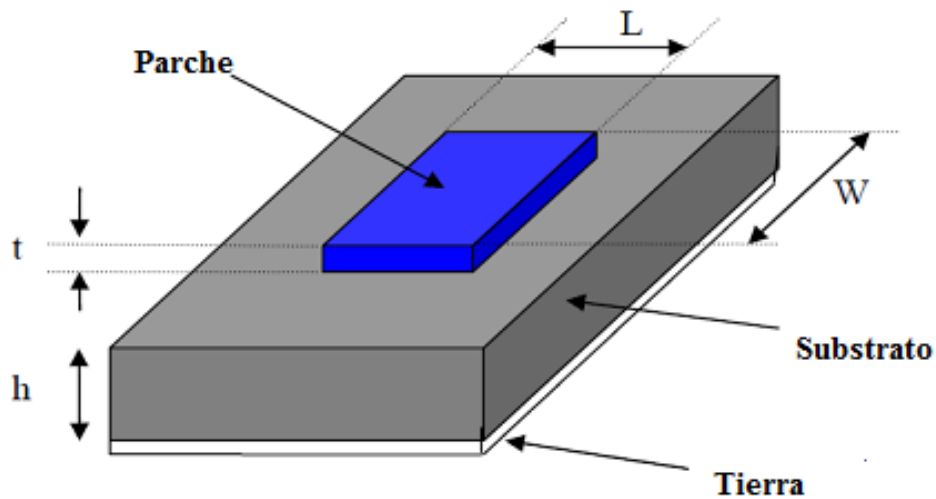


Figura 15. Esquema de la antena [40].

En la Figura 15,  $h$  representa el grosor del sustrato,  $W$  el ancho de la antena,  $L$  su longitud y  $t$  el grosor del parche conductor. Las características del sustrato afectan directamente al rendimiento de la antena. De tal modo, la eficiencia y el ancho de banda disminuyen a medida que la constante dieléctrica aumenta. Por otro lado, a mayor permitividad relativa del dieléctrico, más pequeño es el tamaño del parche. La constante dieléctrica está comprendida habitualmente entre  $1 < \epsilon_r < 10$ .

MATLAB también dispone de un catálogo con varios dieléctricos ya predefinidos. En la Figura 16 vemos dicho catálogo al cual podemos acceder mediante el comando de *openDielectricCatalog*.

	Name	Relative_Permittivity	Loss_Tangent	Frequency
1	Air	1	0	1.0000e+009
2	FR4	4.8000	0.0260	100.0000e+006
3	Teflon	2.1000	2.0000e-04	100.0000e+006
4	Foam	1.0300	1.5000e-04	50.0000e+006
5	Polystyrene	2.5500	1.0000e-04	100.0000e+006
6	Plexiglas	2.5900	0.0068	10.0000e+009
7	Fused quartz	3.7800	1.0000e-04	10.0000e+009
8	E glass	6.2200	0.0023	100.0000e+006
9	RO4725JXR	2.5500	0.0022	2.5000e+009
10	RO4730JXR	3	0.0023	2.5000e+009
11	TMM3	3.4500	0.0020	10.0000e+009
12	TMM4	4.7000	0.0020	10.0000e+009
13	TMM6	6.3000	0.0023	10.0000e+009
14	TMM10	9.8000	0.0022	10.0000e+009
15	TMM10i	9.9000	0.0020	10.0000e+009
16	Taconic RF-35	3.5000	0.0018	1.9000e+009

Figura 16. Catálogo dieléctricos MATLAB.

Hemos escogido como núcleo el material ROGERS 5880. Para la elección del dieléctrico hemos tenido en cuenta su grosor y su constante dieléctrica. Se barajaron otras opciones de sustrato como el Taconic TDSM3 y el Taconic TLX8. En el transcurso del próximo capítulo realizamos diversas simulaciones en MATLAB para comprobar el nivel de ganancia obtenido en función del sustrato utilizado. Como vamos a trabajar con una única capa, no vamos a utilizar material preimpregnado. El sustrato escogido dispone de varias aplicaciones, como, por ejemplo, el diseño de antenas de microondas.

#### 4.4 Conclusiones

En este capítulo hemos determinado el rango de frecuencias de las antenas, tanto para transmisión como para recepción. Para ello hemos analizado las distintas frecuencias utilizadas por las constelaciones LEO que se encuentran en funcionamiento actualmente. Adicionalmente hemos escogido el sustrato de la antena y definido su estructura. En el siguiente capítulo se realiza el diseño de las antenas en la herramienta MATLAB.

## Capítulo 5: Diseño de las antenas tipo parche en Matlab

### 5.1 Introducción

En este apartado nos centraremos en el desarrollo del diseño de las antenas de transmisión y recepción como elementos individuales. Tras haber seleccionado las frecuencias de transmisión y recepción y determinado el material dieléctrico adecuado, procederemos al diseño de una antena cuadrada tipo parche. Basándonos en los parámetros previamente establecidos, calcularemos el tamaño óptimo para estas antenas. Posteriormente, utilizaremos MATLAB para realizar pruebas y verificar el funcionamiento de las antenas diseñadas, permitiéndonos visualizar y analizar sus respectivos patrones de radiación.

### 5.2 Caracterización de las antenas

En primer lugar, debemos caracterizar la antena. Para ello, debemos calcular las dimensiones de esta en base a la frecuencia y a las características del sustrato. Para hallar el ancho de la antena empleamos la Ecuación (14) [41]:

$$w = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (14)$$

donde:

- w: ancho de la antena.
- c: velocidad de la luz.
- f: frecuencia de trabajo.
- $\epsilon_r$ : constante dieléctrica del sustrato.

La frecuencia de trabajo (f) viene dada por la media de los límites de la banda de frecuencia escogida para transmisión (27,5 GHz a 30 GHz) como se ilustra en la Ecuación (15). De esta manera, el valor de la frecuencia de trabajo para la antena transmisora se ha fijado a un valor de 28,75 GHz.

$$f = \frac{f_{min} + f_{máx}}{2} \quad (15)$$

Para hallar la longitud de la antena se emplean las siguientes Ecuaciones (16),(17),(18) y (19) [41]:

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (16)$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (17)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3) \left( \frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{eff} - 0.258) \left( \frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (19)$$

donde:

- w: ancho de la antena.
- c: velocidad de la luz.
- f: frecuencia de trabajo.
- $\epsilon_r$ : constante dieléctrica del sustrato.
- $\epsilon_{eff}$ : constante dieléctrica efectiva.
- h: grosor del sustrato.
- L: longitud de la antena.
- $L_{eff}$ : longitud efectiva.
- $\Delta L$ : extensión de longitud.

### 5.3 Métodos de alimentación

El método de alimentación de una antena de *microstrip* es de gran importancia, ya que puede influir directamente en su rendimiento y características. Existen diversos métodos de alimentación de una antena de *microstrip*. Dichos métodos se pueden

clasificar en dos grupos: métodos de alimentación directa o por contacto y métodos de alimentación indirecta o sin contacto [42].

#### 5.3.1 Métodos de alimentación directa

En este tipo de métodos es necesario un contacto físico entre la alimentación y el elemento radiante. Dentro de este grupo los métodos más habituales son por conector coaxial o por la línea de transmisión.

##### Línea Microstrip

Este método consiste en utilizar una línea de *microstrip* que conecta directamente la fuente de señal a la antena de *microstrip*. Esta línea de transmisión puede estar conectada en diferentes puntos de la antena, ya sea en el borde del parche o en el punto de alimentación central. Este método resulta de fácil aplicación, ya que tanto el parche como la línea se ubican en el mismo sustrato. Sin embargo, requiere de un estudio conjunto ya que la línea provocará la aparición de lóbulos secundarios indeseados en el diagrama de radiación. En la Figura 17 se ilustra este método.

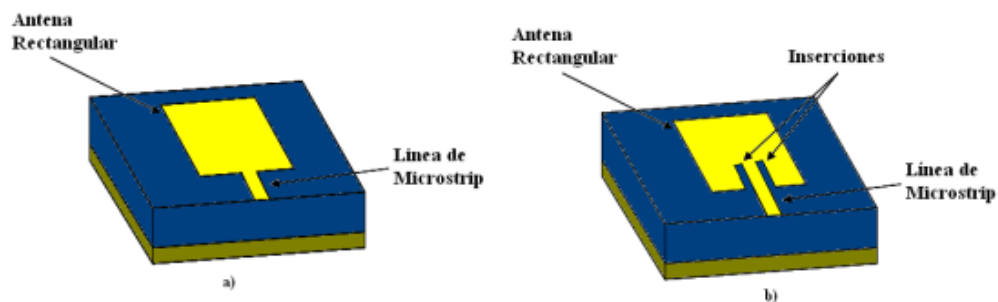


Figura 17. Técnica de alimentación con línea de microstrip.

##### Sonda coaxial

Se trata de un conductor interno que se pasa a través de un sustrato, y se conecta directamente a la antena para hacerla irradiar, tal como vemos en la Figura 18 [41]. La impedancia de entrada varía en función de la posición de la alimentación. En comparación con la técnica anterior, esta estructura presenta cierto grado de complejidad ya que el conductor debe perforar el sustrato y estar soldado a la antena para funcionar de manera óptima.

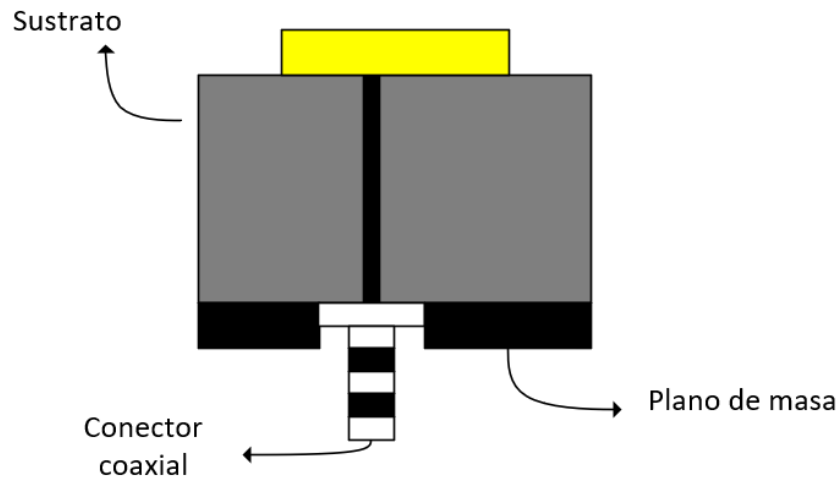


Figura 18. Técnica de alimentación con sonda coaxial.

### 5.3.2 Métodos de alimentación indirecta

En este tipo de métodos no existe un contacto físico entre la alimentación y el elemento radiante. Permiten diseñar la alimentación y el parche por separado, ya que se ubican en distintos sustratos. Dentro de este grupo encontramos dos técnicas de alimentación: por proximidad y por apertura.

#### Alimentación por proximidad

En este tipo de alimentación, el elemento radiante se encuentra en el sustrato superior. En la parte inferior encontramos una línea de alimentación sobre otro dieléctrico con un plano de tierra. En la Figura 19 se ilustra esta técnica:

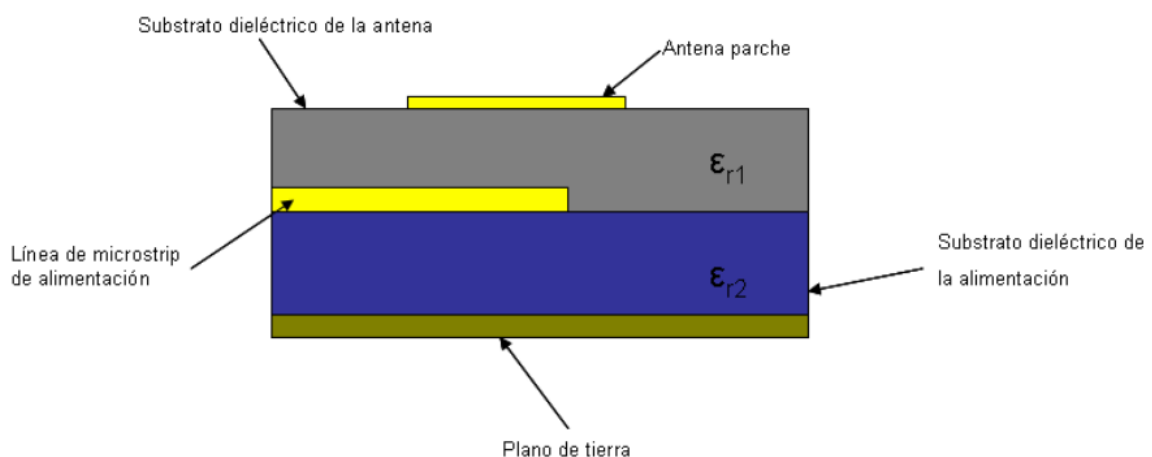


Figura 19. Alimentación por proximidad [43].



### Alimentación por apertura

Muy similar al anterior ya que contamos con dos sustratos. En este caso la línea de alimentación se encuentra en la base y el plano de tierra separa ambos sustratos. Cabe mencionar que el plano de tierra tiene una ranura, cuyas dimensiones afecta directamente al acoplamiento de la antenna. La fuente de señal se conecta a través de esta apertura y se acopla con el parche *microstrip*. En la Figura 20 se ilustra esta técnica de alimentación.

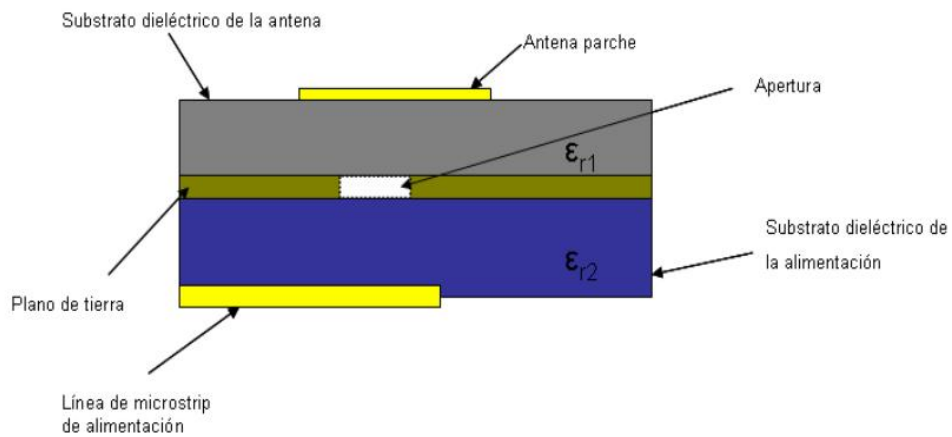


Figura 20. Alimentación por ranura [43].

En este caso, la antenna se alimentará haciendo uso de una sonda coaxial. Para poder calcular el punto de alimentación de la antenna, empleamos las Ecuaciones (20) y (21) [41]

$$X_f = \frac{L}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (20)$$

$$Y_f = \frac{w}{2} \quad (21)$$

donde  $X_f$  y  $Y_f$  son los puntos de alimentación,  $L$  es la longitud de la antenna,  $w$  el ancho de la misma y  $\epsilon_{eff}$  la constante dieléctrica efectiva del material, cuyo valor es muy similar a la  $\epsilon_r$ .

## 5.4 Antena de transmisión

En este apartado realizamos el diseño de la antena de transmisión. En primer lugar, aplicamos las ecuaciones vistas en el apartado anterior para obtener las dimensiones de la antena. Posteriormente comprobamos el funcionamiento de la antena a través de una simulación en MATLAB.

### 5.4.1 Dimensionado de la antena

Tras haber aplicado las ecuaciones mostradas, obtenemos las dimensiones de la antena. Dichas dimensiones se reflejan en la Tabla V.

*Tabla V. Dimensiones de la antena transmisora.*

Datos		Cálculos (mm)	
C: velocidad de la luz (m/s)	300000000	W: ancho de la antena	4,1247
$\epsilon_r$ : constante dieléctrica	2,2	$L_{\text{eef}}$ : longitud efectiva	3,7072
		$\Delta L$ : extensión	0,2614
$\epsilon_{\text{eff}}$ : constante efectiva	1,9807	L: longitud	3,1844
		$X_f$	2,2626
f: frecuencia (GHz)	28,75	$Y_f$	2,0624
		$L_g$	6,2444
h(mm)	0,51	$W_g$	7,1847

Tras haber obtenido los datos correspondientes para la antena transmisora, comprobaremos los resultados simulando los parámetros de la antena en MATLAB. En primer lugar, obtendremos el diseño de la antena y posteriormente obtendremos su correspondiente diagrama de radiación.

### 5.4.2 Simulación en MATLAB de la antena

En primer lugar, debemos definir las características del dieléctrico. Matlab dispone de una función propia llamada *dielectric* para especificar las características del material. Dicha función se puede caracterizar a través de los siguientes parámetros:

- *Name*: nombre del sustrato.
- *EpsilonR*: constante dieléctrica del sustrato ( $\epsilon_r$ ).
- *LossTangent*: representación de las pérdidas.
- *Thickness*: grosor del sustrato ( $h$ ).

Para definir las dimensiones de la antena utilizamos la función *patchMicrostrip*. Dicha función crea una antena tipo parche en función de los parámetros que se definan. El parche por defecto está centrado en el origen. El punto de alimentación se encuentra a lo largo de la antena. En la Figura 21 se muestra una representación de una antena tipo parche en Matlab [44].

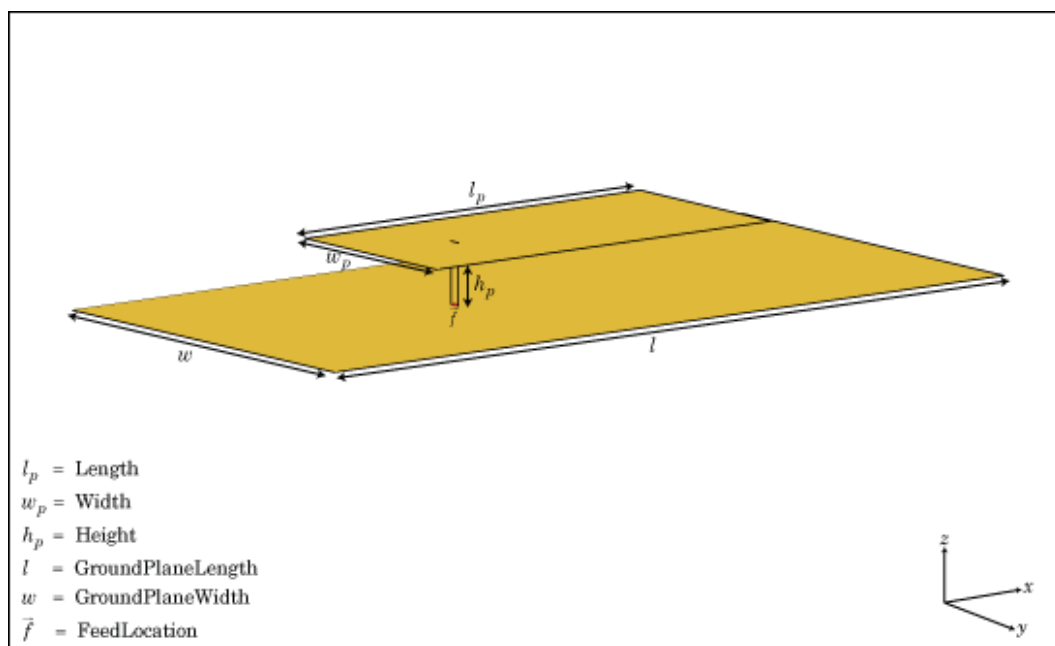


Figura 21. Definición de una antena tipo parche MATLAB [44].

Dicha función viene definida por los siguientes parámetros:

- *Length*: longitud de la antena ( $L$ ).
- *Width*: ancho de la antena.
- *Height*: altura de la antena ( $h$ ).
- *Substrate*: sustrato a utilizar.
- *GroundPlaneLength*: longitud del plano de masa ( $L_g$ ).
- *GroundPlaneWidth*: ancho del plano de masa ( $W_g$ ).
- *Feedoffset*: coordenadas para la alimentación.

A continuación, se muestra un ejemplo de diseño donde se aplican las funciones explicadas anteriormente.

```

grosor=0.51e-3;
longitud= 3.1844e-3;
Xf=2.2626e-4;
Yf=2.0624e-4;
LongGround=6.2444e-3;
AnchGround=7.1847e-3;

d3=dielectric('Name','ROGERS 5880','EpsilonR',2.2,'Thickness',grosor);
pm3 = patchMicrostrip('Length',longitud,'Width',4.1247e-3, 'Height',grosor ,
...
    'GroundPlaneLength',LongGround,'GroundPlaneWidth',AnchGround, ...
    'Substrate',d3, 'FeedOffset',[Xf Yf])
show(pm3)
figure
pattern(pm3,28.75e9,'Type','gain')

```

En primer lugar, definimos las variables necesarias para caracterizar a las funciones *dielectric* y *patchMicrostrip*, es decir, el grosor del sustrato (h), la longitud de la antena (L), los puntos de alimentación  $X_f$  e  $Y_f$  y las dimensiones del plano de masa.

A continuación, realizamos distintas simulaciones para diferentes tipos de sustrato donde iremos variando el grosor de éstos. Concretamente, para cada material realizamos 3 simulaciones diferentes. Cabe destacar que el valor del grosor del sustrato (h) aplicado a cada material está estandarizado por los fabricantes. Los sustratos utilizados son el Taconic TSM-DS3[45],[45] Taconic TLX8 [46] y ROGERS 5880[47]. Estos materiales se utilizan específicamente para el diseño de antenas, además el material Taconic TSM-DS3 se utiliza especialmente para el diseño de *arrays* de antenas en fase.

A modo de resumen, en la Tabla VI se muestra una comparativa de las ganancias obtenidas para cada sustrato y su grosor correspondiente.

Tabla VI. Ganancia antena transmisora para cada grosor y tipo de sustrato.

Grosor sustrato (mm)	Taconic TDSM3	Taconic TLX8	ROGERS 5880
h=0,13	5,29 dBi	6,14 dBi	6,71 dBi
h=0,25	4,42 dBi	6,35 dBi	6,25 dBi
h=0,51	5,44 dBi	5,89 dBi	5,52 dBi

Analizando la Tabla VI concluimos que, con los sustratos Taconic\_TLX8 y ROGERS 5880 obtenemos mayor ganancia. Por otra parte, con el sustrato Taconic\_TDSM3 obtenemos una ganancia media de 5 dBi. En la Figura 22 se muestra la representación física de la antena de transmisión.

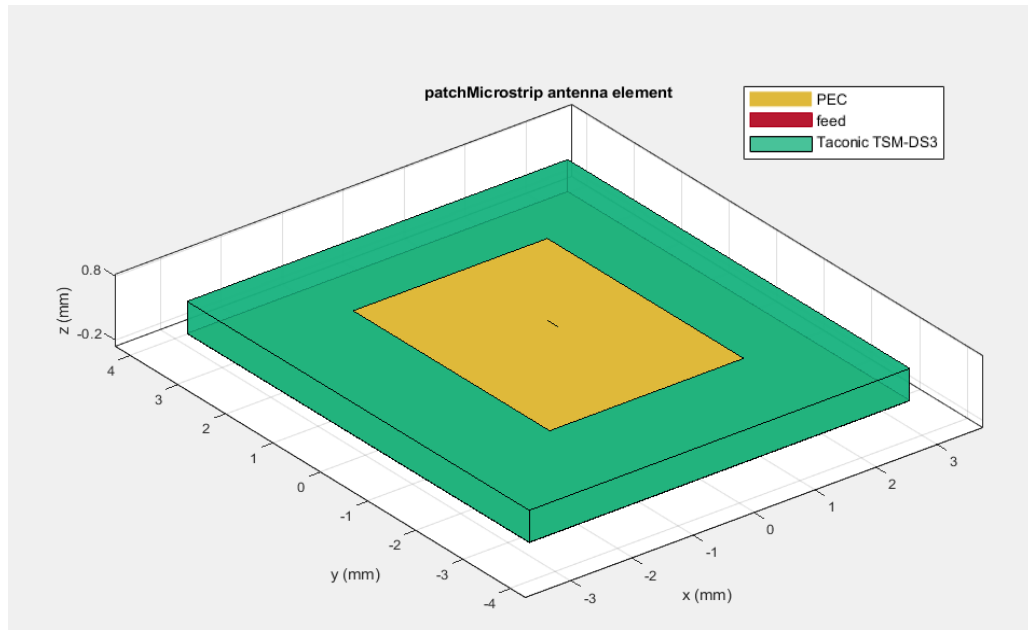


Figura 22. Antena transmisora tipo parche en MATLAB.

Para representar el diagrama de radiación en MATLAB utilizamos la función *pattern(object, frequency)*. Esta función traza el diagrama de radiación tridimensional de la antena o del objeto del *array* especificado en *object* para una frecuencia determinada. En este caso simulamos para una frecuencia de transmisión de 28,75 GHz. Por defecto el radio de campo lejano se fija en  $100\lambda$ . En la Figura 23 se muestra el diagrama de radiación para la antena tipo de parche de la Figura 22.

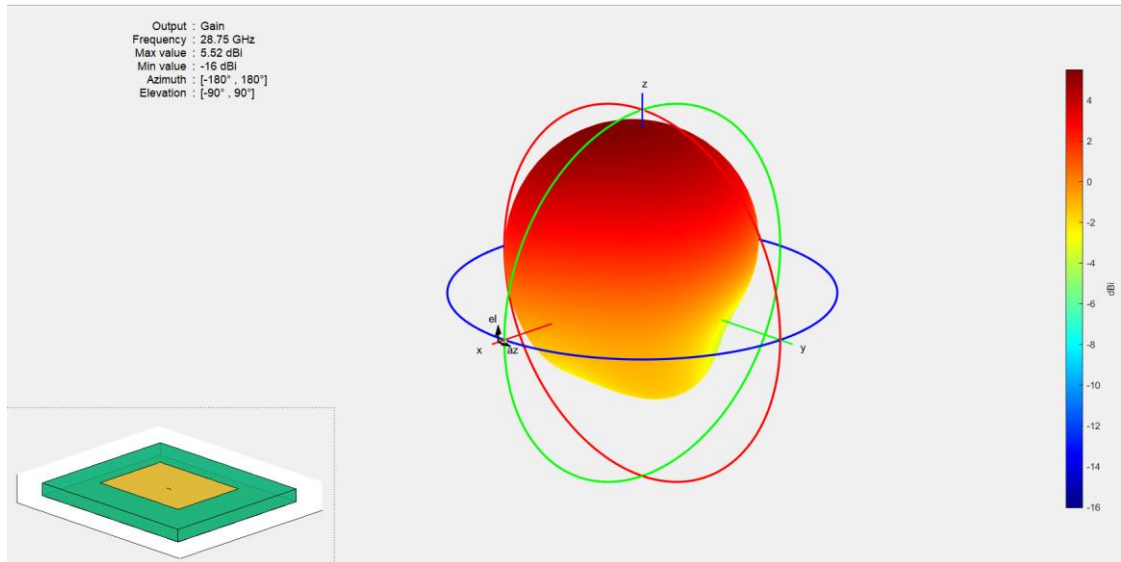


Figura 23. Diagrama de radiación en MATLAB.

En la Figura 23 se aprecia que el valor máximo de directividad, y por ende la ganancia es de 5.52 dBi a la frecuencia de 28,75 GHz.

## 5.5 Antena de recepción

En este apartado, y siguiendo el mismo procedimiento que para la antena de transmisión, calculamos las dimensiones de la antena y comprobamos su funcionamiento en MATLAB.

### 5.5.1 Dimensionado de la antena

En este apartado se realiza el diseño de la antena receptora en MATLAB. Para llevar a cabo esta tarea, seguimos el mismo procedimiento que para la antena receptora, es decir, empleamos las mismas ecuaciones para hallar las dimensiones de la antena y los mismos comandos para realizar las simulaciones en MATLAB.

En este caso la frecuencia de trabajo ( $f_r$ ) viene dada por la media de los límites de la banda de frecuencia escogida para recepción (17,8 GHz a 20,2GHz) como se ilustra en la Ecuación (22). De esta manera, el valor de la frecuencia de trabajo para la antena receptora se ha fijado a un valor de 19 GHz.

$$f_r = \frac{f_{minr} + f_{máxr}}{2} \quad (22)$$

Tras haber aplicado las Ecuaciones (14),(16),(17),(18) y (19) obtenemos las dimensiones reflejadas en la Tabla VII.

Tabla VII. Dimensiones de la antena receptora.

Datos		Cálculos(mm)	
C: velocidad de la luz (m/s)	300000000	W: ancho de la antena	6,2413
$\epsilon_r$ : constante dieléctrica	2,2	$L_{eef}$ : longitud efectiva	5,546
		$\Delta L$ : extensión	0,2651
$\epsilon_{eff}$ : constante efectiva	2,0263	L: longitud	5,0159
		$X_f$	3,5236
f: frecuencia (GHz)	19	$Y_f$	3,1207
		$L_g$	8,0759
h(mm)	0,51	$W_g$	9,3013

### 5.5.2 Simulación en MATLAB de la antena de recepción

En la Figura 24 se aprecia el diseño de la antena receptora, el cual ha sido generado a partir del código que se muestra a continuación.

```

grosor=0.51e-3;
longitud=5.0159e-3;
Xf=3.5236e-4;
Yf=3.1207e-4;
LongGround=8.0759e-3;
AnchGround=9.3013e-3;

d6=dielectric('Name','ROGERS 5880','EpsilonR',2.2,'Thickness',grosor);
pm6 = patchMicrostrip('Length',longitud,'Width',6.2413e-3, 'Height',grosor ,
...
    'GroundPlaneLength',LongGround,'GroundPlaneWidth',AnchGround, ...
    'Substrate',d6, 'FeedOffset',[Xf Yf])
show(pm6)
figure
pattern(pm6,19e9, 'Type', 'gain')
```

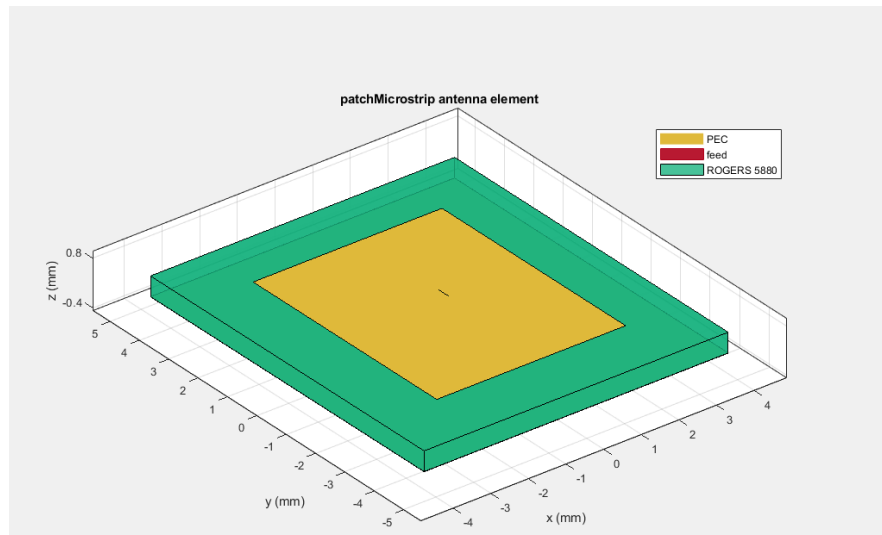


Figura 24. Antena receptora tipo parche en MATLAB.

En la Figura 25 se aprecia el diagrama de radiación de la antena receptora. Observamos que la ganancia para el material, es decir el valor máxima de directividad, es de 6.02 dBi a la frecuencia de 19 GHz.

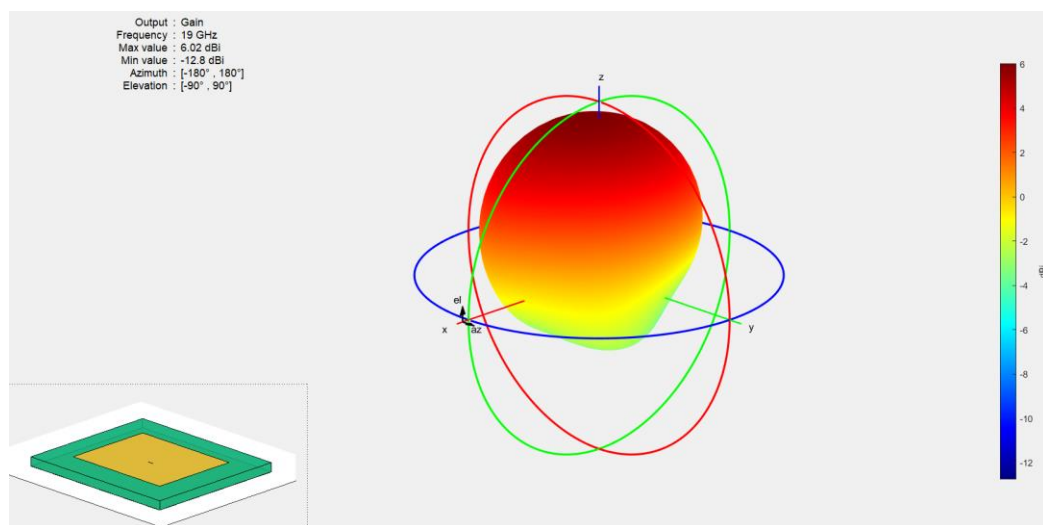


Figura 25. Diagrama de radiación antena receptora.

Siguiendo el mismo flujo de trabajo que para la antena de transmisión, realizamos 3 simulaciones diferentes para cada sustrato donde variamos el grosor del sustrato. En la Tabla VIII se establece una comparativa con las ganancias obtenidas para cada grosor de sustrato.



*Tabla VIII. Ganancia antena receptora para cada grosor y tipo de sustrato.*

Grosor sustrato (mm)	Taconic TDSM3	Taconic TLX8	ROGERS 5880
h=0,13	5,97 dBi	6,46 dBi	6,88 dBi
h=0,25	4,95 dBi	5,96 dBi	6,57 dBi
h=0,51	4,68 dBi	6,29 dBi	6,02 dBi

Del mismo modo que para la antena receptora, con el Taconic TDSM3 obtenemos menor ganancia. Por otro lado, con el material ROGERS 5880 obtenemos de media una mayor ganancia, por lo que será el material escogido.

## 5.6 Conclusiones

En este capítulo, hemos llevado a cabo el dimensionamiento de las antenas de recepción y transmisión. Para llevar a cabo esta tarea, hemos realizado pruebas con tres sustratos diferentes, cada uno con una constante dieléctrica distinta. Hemos simulado el patrón de radiación de las antenas, variando el grosor de cada sustrato. Finalmente, hemos realizado una comparativa para transmisión y recepción para determinar qué sustrato y grosor proporcionan una mayor ganancia en la antena.



# Capítulo 6: Diseño de *arrays*

## 6.1 Introducción

En este capítulo, nos enfocaremos en el diseño de *arrays* cuadrados para la transmisión y recepción de cuatro satélites LEO: Amazon, OneWeb, SpaceX y Telesat. En la Figura 26 se aprecia gráficamente la geometría de un *array* cuadrado.

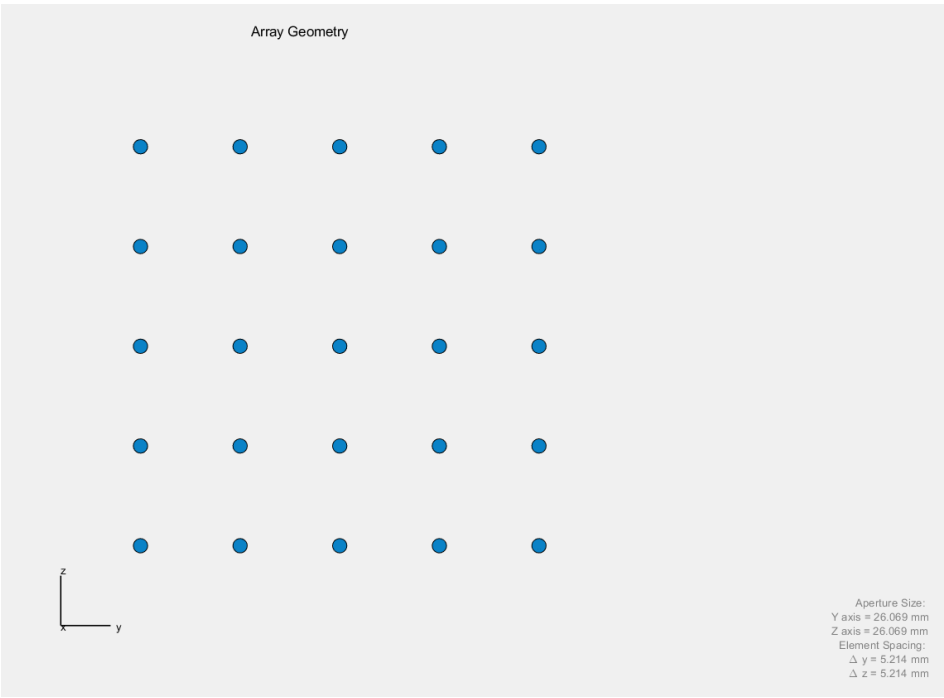


Figura 26. Array cuadrado.

En este caso el *array* de la figura consta de 25 elementos. Se puede apreciar que el espacio entre elementos es simétrico, tanto en el eje y como en el eje x.

Para cada *array* realizaremos las simulaciones correspondientes. Para llevar a cabo esta tarea partimos de los datos de referencia mostrados en la Tabla IX.

Tabla IX. Datos de referencia para el diseño de *arrays*.

Constelación	Transmisión EIRP (dBW)	Recepción Ganancia (dBi)
SpaceX	68,4	46,9
Telesat	75,9	46,5
OneWeb	63,2	51,5
Amazon	62,3	50,2

## 6.2 Array de transmisión

A partir de estos datos realizaremos una estimación del número de elementos necesarios para cumplir con las especificaciones de cada una de las constelaciones. Para poder realizar una estimación de los elementos para el *array* de transmisión partimos de la Ecuaciones (23) y (24):

$$EIRP = G_{array} + P_{inarray} \quad (23)$$

$$P_{inarray} = P_{in} + 10\log N \quad (24)$$

donde  $G_{array}$  es la ganancia del *array* y  $P_{inarray}$  es la potencia de entrada del *array*. A su vez la  $P_{inarray}$  viene dada por la potencia de entrada  $P_{in}$  y  $N$  número de elementos, que son los que debemos estimar.  $P_{in}$  corresponde con 20dBm. En la se muestra la ganancia obtenida para cada constelación a partir del número de elementos estimados. En este caso, la ganancia individual de la antena de transmisión  $G_i$  es de 6.71 dB.

Tabla X. Cálculos teóricos de las constelaciones en función del número de elementos.

Constelación	OneWeb	Telesat	Amazon	SpaceX
$G_i$ (dB)	6,71	6,71	6,71	6,71
$G_{array}$ (dB)	39,96	46,36	39,58	42,56
Nº elementos teóricos	2116	9216	1936	3844

Para poder obtener la representación gráfica del azimut en MATLAB hay que crear el *array* a simular. Para llevar a cabo esta tarea utilizamos el objeto *phased.URA*, el cual crea un *array* rectangular uniforme (URA). Para definir las características del *array*, debemos especificar la antena que se utiliza para formar el *array*, el tamaño de este, el *array* uniforme, está conformado por el mismo número de filas que de columnas. Por otra parte, el espaciado entre elementos es un factor clave, porque afecta directamente a la directividad y ganancia de la antena. Por lo general, un espaciado más estrecho entre elementos conduce a una mayor directividad y ganancia.

En la Figura 27 y Figura 28 se aprecia la representación gráfica en dos dimensiones del patrón de radiación. En este caso, el corte lo hemos realizado para un ángulo de elevación de  $0^\circ$ . En este corte veremos el valor de la ganancia de la antena para las constelaciones OneWeb y Amazon respectivamente. Concretamente para OneWeb la ganancia es de 40,02dB. Para obtener la gráfica contigua utilizamos el siguiente código en MATLAB:

```
c = physconst('LightSpeed');
fc = 28.75e9;
lambda = c/fc;
N = 55;
array=phased.URA('Element',pm,'Size',[N N],'ElementSpacing',[lambda*0.55
lambda*0.55] , 'ArrayNormal','x')
NxN=getNumElements(array)
pin = -10;
direct = directivity(array,fc,0)
eirp = direct + 10*log10(NxN) + pin
```

Con la función *directivity* obtenemos el valor de la directividad en dBi del *array*, a la frecuencia *fc* y con un ángulo de  $0^\circ$ . A partir del valor de la directividad obtenemos el valor del EIRP necesario para cumplir con las especificaciones planteadas. En este caso el *array* está formado por 55 filas y 55 columnas. El espaciado entre elementos viene dado por  $0.55 \cdot \lambda$ , donde  $\lambda$  a su vez viene dado por el cociente de la velocidad de la luz y la frecuencia de transmisión *fc*.

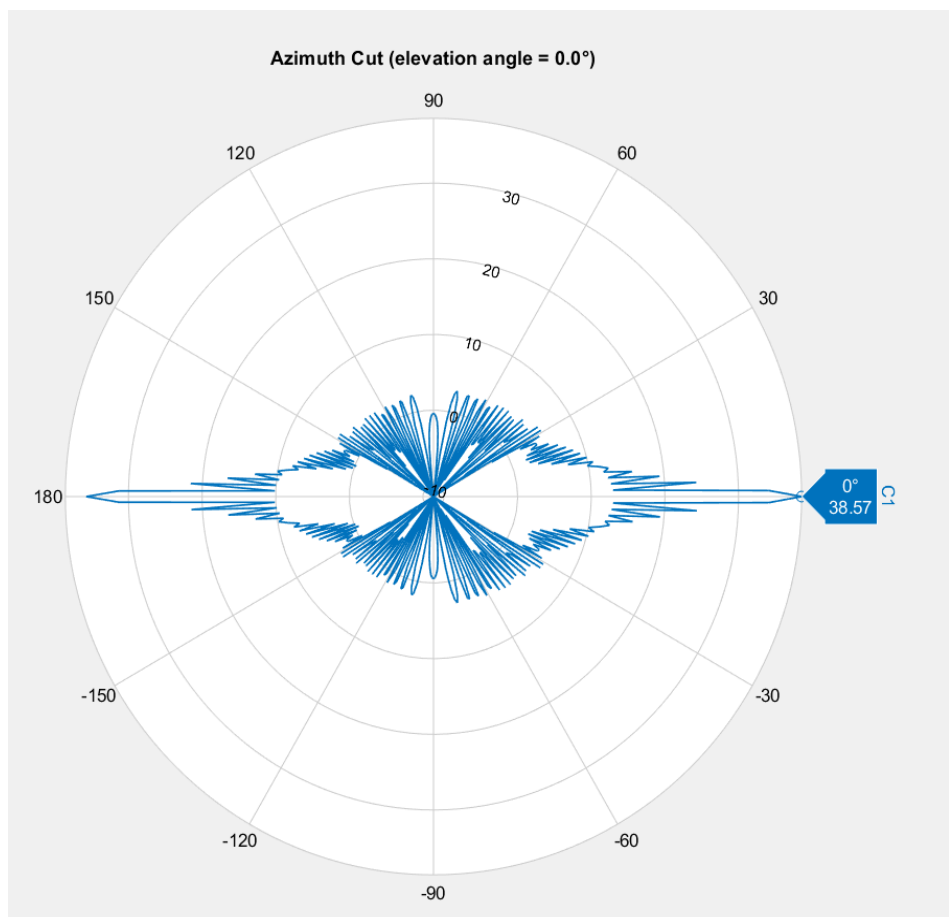


Figura 27. Patrón de radiación para la constelación OneWeb.

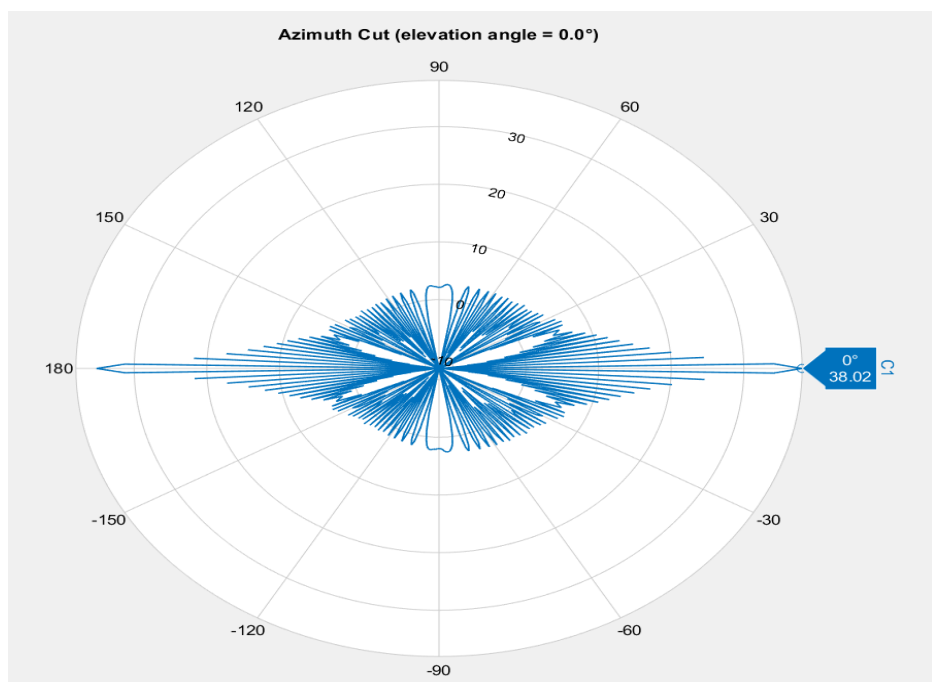


Figura 28. Patrón de radiación para la constelación Amazon.

Para cumplir las con las especificaciones de ganancia de las constelaciones de Telesat y SpaceX obtuvimos un número de elementos superior a 5000. Sin embargo, simular más de 5000 elementos en MATLAB puede demorarse mucho en el tiempo, por lo que se decidió realizar una estimación en Excel. Siguiendo el mismo flujo de trabajo, simulamos en MATLAB hasta 4900 elementos, y anotando el valor de EIRP obtenido. En la Tabla XI se muestra como varía el EIRP al aumentar el número de elementos. Los datos comparten una relación logarítmica, de forma que a medida que aumenta la ganancia, mayor será el número de elementos que deben conformar el *array* de transmisión para que el EIRP aumente 0,1 dB.

*Tabla XI. Ganancia en función del número de elementos para transmisión.*

N elementos	EIRP (dBW)
25	19,52
100	32,67
225	40,33
400	45,47
625	49,34
900	52,61
1225	55,42
1600	57,77
2025	59,8
2500	61,66
3025	63,38
3600	64,90
4225	66,28
4900	67,59

Posteriormente hicimos uso del gráfico de dispersión de Excel para representar los datos y agregamos una línea de tendencia con el objetivo de obtener una ecuación que nos permita determinar la ganancia para cualquier número de antenas a la

frecuencia de operación de 28.75 GHz. En la Figura 29 se observa la representación gráfica en cuestión.

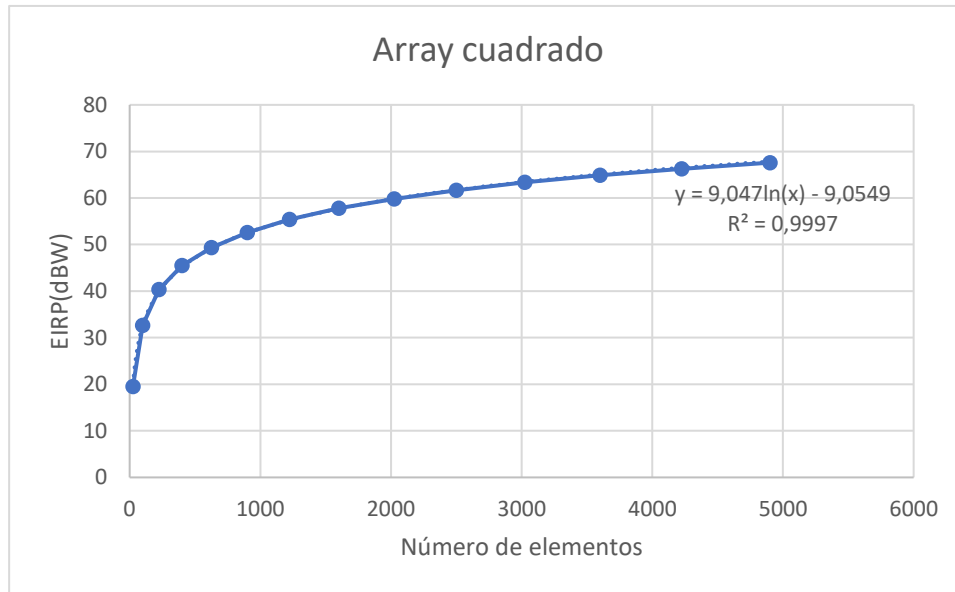


Figura 29. EIRP en función del número de elementos para transmisión.

Debemos tener en cuenta que la ecuación se aplica para calcular N elementos de un *array* conformado por XxY elementos, donde X e Y son las filas y columnas del *array* respectivamente. La línea de tendencia responde a la Ecuación (25):

$$y = 9,047 \ln(x) - 9,0549. \quad (25)$$

donde y representa el EIRP del *array* y x el número de antenas.

En el gráfico de la Figura 29,  $R^2$  representa el coeficiente de determinación, es decir, indica la correlación de los datos de EIRP y N elementos. Este valor puede variar entre 0 y 1. Una correlación muy próxima a 1 indica que la estimación se ha realizado correctamente, ya que los datos se ajustan bien a la línea de tendencia, por lo que se considera que tenemos un modelo que hace estimaciones realistas del número de elementos. Finalmente, en la Tabla XII se establece una comparativa del número de elementos obtenidos en MATLAB y los que estimamos en un principio para transmisión.



Tabla XII. EIRP en función del número de elementos de cada constelación para transmisión.

Constelación	OneWeb	Telesat	Amazon	SpaceX
Gi (dB)	6,71	6,71	6,71	6,71
EIRP (dBW)	63,2	75,9	62,3	68,4
Nº elementos teóricos	2116	9216	1936	3844
Nº elementos obtenidos	3025	12100	2704	5329

Concluimos que, para cumplir con las especificaciones inicialmente planteadas, necesitamos 3025 antenas para la constelación de OneWeb, 12100 para Telesat, 2704 para Amazon y 5329 elementos para SpaceX. La diferencia entre los valores se debe a que, para las fórmulas teóricas, se considera una separación suficiente para no tener en cuenta las interacciones electromagnéticas entre elementos.

Con el objetivo de ver la propiedad del apuntamiento dinámico de los *phased array* realizamos diferentes pruebas variando la elevación. Concretamente distinguimos 3 casos: elevación a 0°, a 15° y 45° con respecto al eje X. En la Figura 30, Figura 31 y Figura 32 se observa la capacidad del *phased array* para adaptar y ajustar su patrón de radiación según la elevación del objetivo o la dirección deseada.

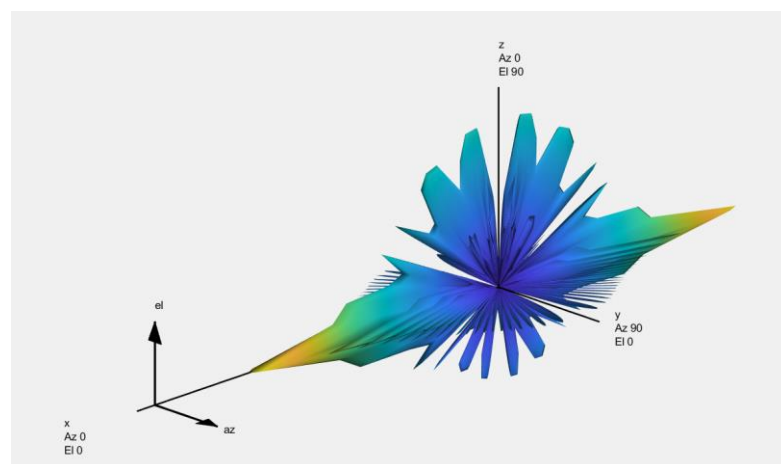


Figura 30. Diagrama de radiación con elevación a 0° para transmisión.

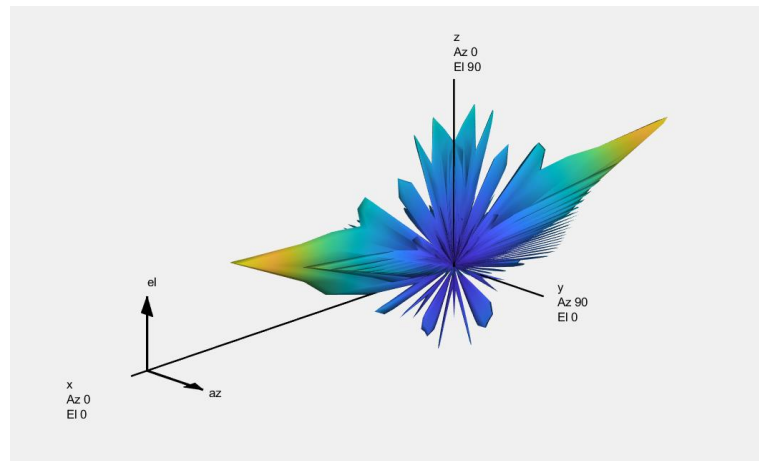


Figura 31. Diagrama de radiación con elevación a 15° para transmisión.

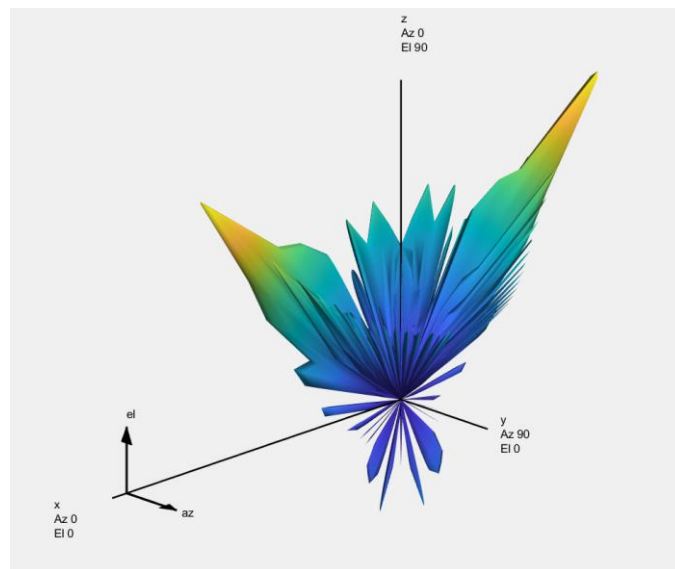


Figura 32. Diagrama de radiación con elevación a 45° transmisión.

### 6.3 Array de recepción

Una vez hemos creado el *array* de transmisión correspondiente para cada constelación, seguimos el mismo flujo de trabajo para crear el *array* de recepción para cada constelación. En la Tabla XIII se reflejan los cálculos teóricos obtenidos para cumplir con las especificaciones iniciales de ganancia de recepción.

*Tabla XIII. Cálculos teóricos de las constelaciones en función del número de elementos para recepción.*

Constelación	OneWeb	Telesat	Amazon	SpaceEx
Gi (dB)	6,88	6,88	6,88	6,88
Garray (dB)	51,5	46,5	50,2	46,9
Nº elementos teóricos	29241	9216	21609	10201

Analizando los datos, vemos que para cumplir con las especificaciones de ganancia hacen falta demasiados elementos, siendo por ende inviable calcular el número de elemento reales mediante simulación en MATLAB. En consecuencia, realizaremos una estimación del número de elementos necesarios, empleando el gráfico de dispersión de Excel, como ya hicimos anteriormente. En primer lugar, realizamos simulaciones en MATLAB variando el número de elementos y registramos el valor de ganancia correspondiente para posteriormente obtener la ecuación indicada por la línea de tendencia.

En la Tabla XIV se muestran los resultados obtenidos y en la Figura 33 se aprecia gráficamente la evolución de la ganancia en función del número de elementos que conforman el *array*.

Tabla XIV. Ganancia en función del número de elementos para recepción.

N elementos	Ganancia(dBm)
25	15,14
100	22,33
225	26,51
400	29,16
625	31,1
900	32,79
1225	34,27
1600	35,47
2025	36,47
2500	37,42
3025	38,32
3600	39,09
4225	38,77
4900	40,43

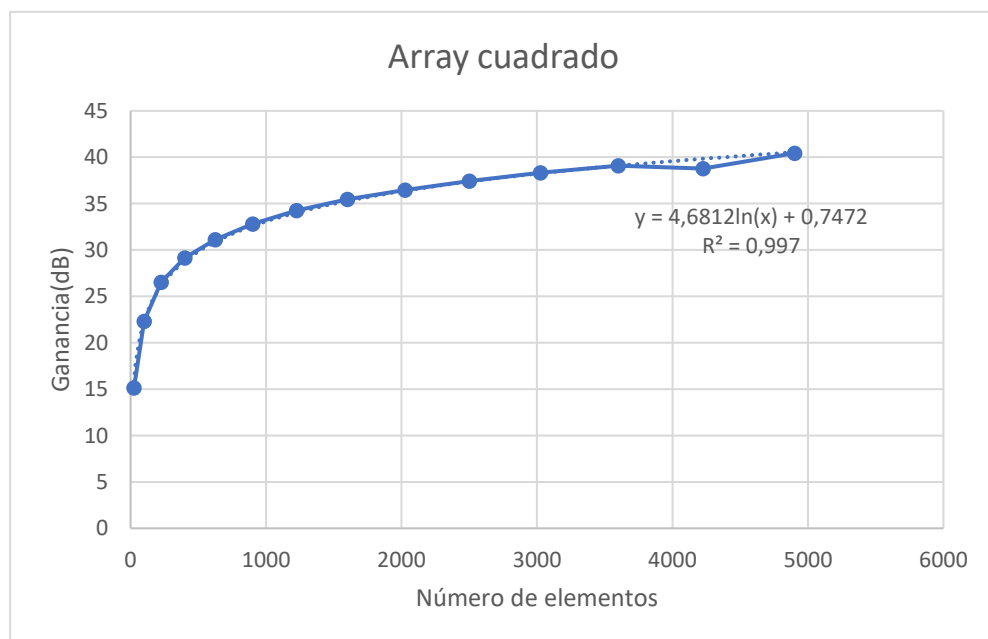


Figura 33. Ganancia en función del número de elementos para recepción.

La expresión que nos permite calcular la ganancia para cualquier número de elementos de recepción a la frecuencia de 19 GHz viene dada por la Ecuación (26):

$$y = 4,6812 \ln(x) + 0,7472 \quad (26)$$

donde  $y$  es la ganancia del *array* y  $x$  el número de elementos. Al igual que para transmisión el coeficiente de determinación es muy próximo a 1, así que los datos obtenidos se ajustan bien a la línea de tendencia y la estimación se ha realizado correctamente.

A modo de resumen, en la Tabla XV se expone una comparativa del número de elementos obtenidos en MATLAB y los que estimamos en un principio para transmisión.

*Tabla XV. Ganancia en función del número de elementos por constelación para recepción.*

Constelación	OneWeb	Telesat	Amazon	SpaceEx
Gi (dB)	6,88	6,88	6,88	6,88
Garray (dB)	51,54	46,5	50,2	46,9
Nº elementos teóricos	29241	9216	21609	10201
Nº elementos reales	47089	16129	35344	17689

Como los valores de ganancia son relativamente elevados en comparación con los valores de transmisión, la diferencia entre el número de elementos reales y teóricos es más significativa, al tratarse de una relación logarítmica entre elementos.

Siguiendo la misma dinámica que para el *array* de transmisión, en la Figura 34 Figura 35 y Figura 36 se muestra la variación del patrón de radiación al variar la elevación.

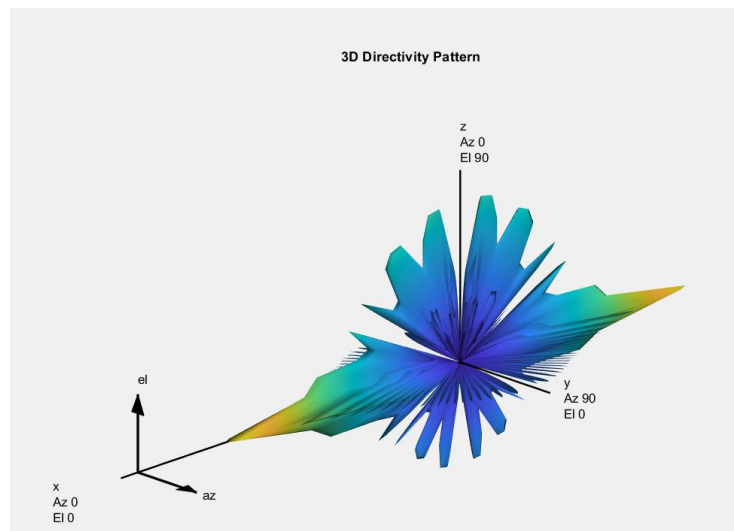


Figura 34. Diagrama de radiación a 0° para recepción.

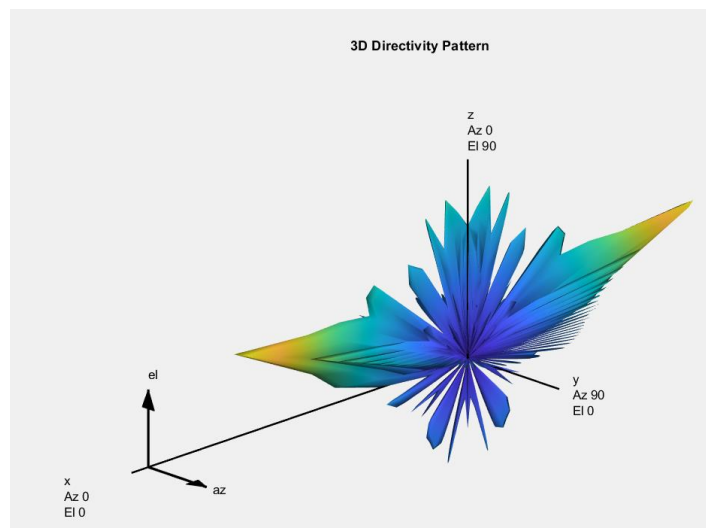


Figura 35. Diagrama de radiación a 15° para recepción.

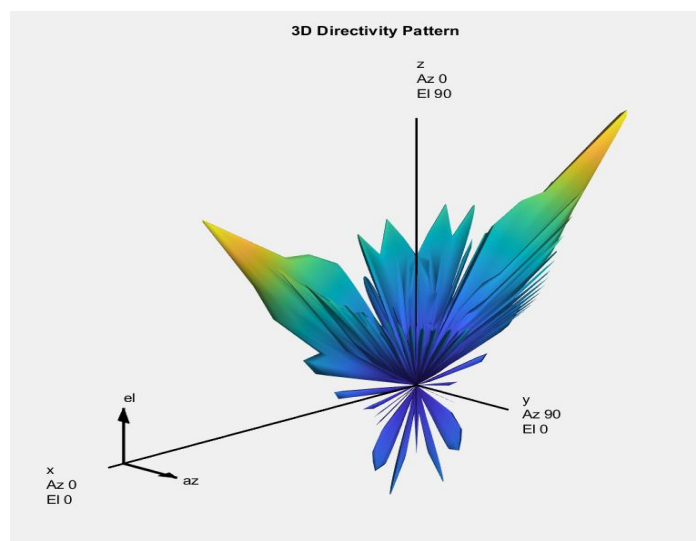


Figura 36. Diagrama de radiación a 45° para recepción.

## 6.4 Simulación de una conexión satelital

Con el objetivo de representar un sistema fiel a la realidad, se ha simulado un enlace entre un satélite y un *gateway*. Gracias a esta conexión se realiza la petición de usuario al *gateway*, que se conecta a internet, y se envía de vuelta la respuesta. A continuación, se muestra en detalle el código empleado para simular dicho enlace. En primer lugar, configuramos el escenario de simulación para un satélite.

```
startTime = datetime(2023,3,17,22,52,0);
stopTime = startTime + minutes(10);
sampleTime = 60; %Tiempo de muestreo de 60 seg

sc = satelliteScenario(startTime,stopTime,sampleTime);
```

Se define la variable *startTime* con un objeto de fecha y hora. En este caso, se establece la fecha y hora de inicio del escenario de simulación en el 17 de marzo de 2023 a las 22:52:00. Añadimos un satélite LEO especificando sus elementos orbitales. Desde este satélite se realiza la transmisión de datos.

```
semiMajorAxis = 6941000; % En metros
eccentricity = 0;
inclination = 70; % En grados
raan = 0;
argOfPeriapsis = 0; % En grados
trueAnomaly = 343.9391; % En grados
meoSat = satellite(sc, semiMajorAxis, ...
    eccentricity, ...
    inclination, ...
    raan, ...
    argOfPeriapsis, ...
    trueAnomaly, ...
    Name = "LEO Satellite", ...
    OrbitPropagator = "two-body-keplerian");
```

Definimos la variable *semiMajorAxis*, que representa el semieje mayor de la órbita en metros. Este semieje corresponde a la mitad del radio de la Tierra más la órbita de la constelación. En este caso, se establece un valor de 6.941.000 metros. La excentricidad de la órbita es 0 lo que indica una órbita circular. La inclinación de la órbita es de 70°. La periapsis representa el punto de la órbita donde la distancia entre el satélite y la Tierra es mínima. Al establecer *argOfPeriapsis* a 0 grados, el satélite alcanza su punto más cercano a la Tierra en el mismo punto donde cruza el plano de referencia. La

anomalía verdadera indica la posición del satélite en relación con la periapsis. Al establecer un valor en la variable *trueAnomaly* de  $343,9391^\circ$ , el satélite se encuentra cerca del periapsis. Si la variable tomara un valor de  $0^\circ$  significa que el satélite se encuentra justo en la periapsis [48]. En la Figura 37 se ilustran estos parámetros orbitales.

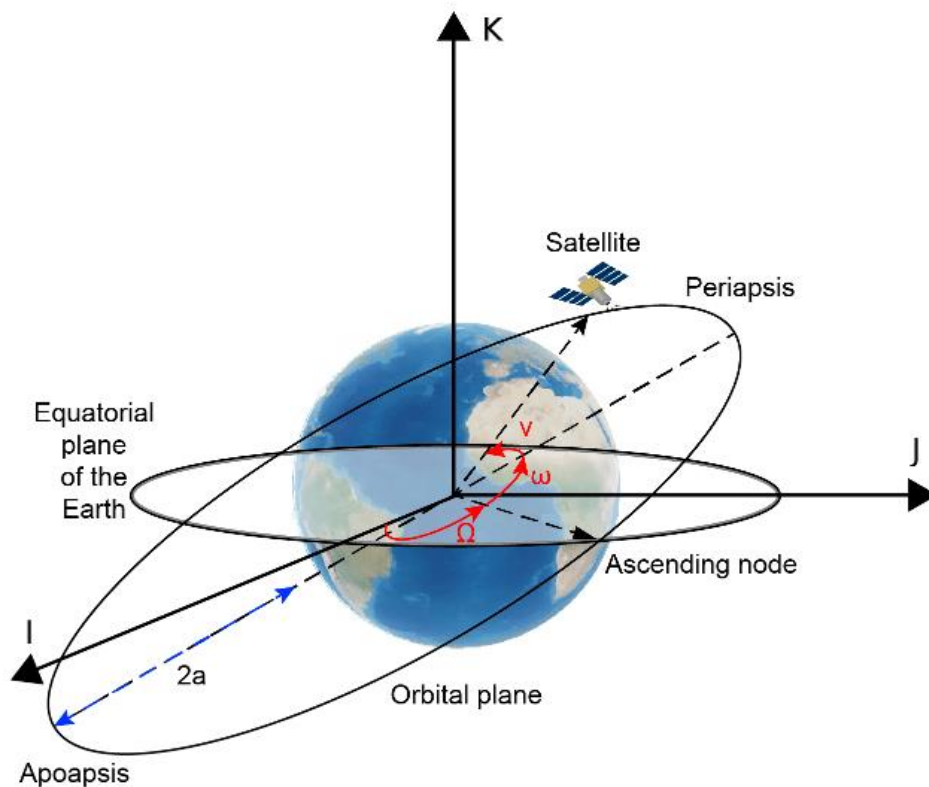


Figura 37. Elementos orbitales [48].

donde se distingue:

- Argumento de la periapsis ( $\omega$ ): Orientación de la elipse en el plano orbital, como ángulo medido desde el nodo ascendente a la periapsis.
- Anomalía verdadera ( $v$ ): Posición del satélite en órbita a lo largo de la elipse en un momento determinado. Se calcula con respecto al periapsis.
- Nodo ascendente ( $\Omega$ ): Orientación horizontal del nodo ascendente de la elipse con respecto al eje I del sistema de referencia.



El punto de la órbita en el que el satélite pasa por el ecuador en su ascenso se denomina nodo ascendente, y el punto en el que el satélite pasa por el ecuador en su descenso es el nodo descendente.

A continuación, con el objeto *interferingSat* añadimos las posibles interferencias causadas por el resto de los satélites LEO que se encuentren en órbita. Posteriormente, añadimos el transmisor al satélite LEO. Dicho transmisor se emplea para la establecer la comunicación *downlink*. Definimos la frecuencia de operación de 28,75 GHz.

```
interferingSat = satellite(sc,"leoSatelliteConstellation.tle");

txMEOFreq = 28.75e9; % En Hz
txMEOSat = transmitter(meoSat, ...
    Frequency = txMEOFreq, ... % En Hz
    Power = 11); % En dBW
gaussianAntenna(txMEOSat, ...
    DishDiameter = 1); % En metros
```

En la siguiente etapa añadimos un transmisor para cada satélite LEO de la constelación. Estos transmisores causarán interferencias con la comunicación *downlink* proveniente del satélite LEO. La frecuencia de interferencia se establece a 28,75 GHz. Por otro lado, la potencia de cada satélite interferente se asigna en un rango de 10 a 20 dBW.

```
interferenceFreq = 28.75e9; % In Hz
rng("default");
txInterferingSat = transmitter(interferingSat, ...
    Frequency = interferenceFreq, ... % In Hz
    Power = 10+10*rand(1,numel(interferingSat))); % In dBW
gaussianAntenna(txInterferingSat, ...
    DishDiameter = 0.2);
```

Finalmente definimos las características de la estación base especificando su latitud y longitud.

```
gs = groundStation(sc, ...
    0, ... % Latitud en grados
    180, ... % Longitud en grados
    Name = "Ground station");
```

Acto seguido añadimos un receptor a la estación terrestre. Para ello, escogemos un *array* rectangular uniforme y establecemos las especificaciones de la antena.

```

% Seleccionamos un URA

% Determinamos la longitud de onda de la señal downlink
c = physconst('LightSpeed');
lambda = c/txMEOFreq;

% Definimos tamaño del array
nrow = 8;
ncol = 8;

% Definimos el espacio entre columnas y filas del array
drow = lambda/2;
dcol = lambda/2;

grosor=0.13e-3;
longitud= 3.4538e-3;
Xf=2.3771e-4;
Yf=2.0624e-4;
LongGround=4.2338e-3;
AnchGround=4.9047e-3;

d=dielectric('Name','ROGERS 5880','EpsilonR',2.2,'Thickness',grosor);
pm = patchMicrostrip('Length',longitud,'Width',4.1247e-3, 'Height',grosor ,
...
    'GroundPlaneLength',LongGround,'GroundPlaneWidth',AnchGround, ...
    'Substrate',d, 'FeedOffset',[Xf Yf])

    % Creamos un array de 46x46 elementos
ant = phased.URA('Element',pm,'Size',[46 46],ElementSpacing=lambda/2)

% Create the receiver object and add it to the ground station
rxGs = receiver(gs, ...
    Antenna = ant, ...
    MountingAngles = [0;90;0]); % En grados

    Posteriormente, realizamos un análisis de acceso entre cada satélite de la
    constelación interferente y la estación terrestre. Este análisis permite visualizar las
    interferencias en el visor de escenarios de satélites que se lanzará más adelante. Cada
    vez que un satélite de la constelación es visible para la estación terrestre, existe algún
    nivel de interferencia procedente de ese satélite en particular. Además, configuramos
    los satélites para que los transmisores de cada satélite apunten a la estación terrestre.

    %Crea un análisis de acceso entre los satélites interferentes y la estación
    ac.LineColor = [1 1 0];

    %Apuntamos a los satélites interferentes
    pointAt([leoSat interferingSat],gs);

```

Finalmente se realiza la configuración de la comunicación entre los satélites interferentes y la estación terrestre y se asignan los pesos al *array*. Estos pesos indican el nivel de contribución que cada elemento tiene en el conjunto del *array*. Al ajustar los

pesos de los elementos, se puede lograr un enfoque o direccionamiento específico del haz de radiación, mejorar la ganancia en ciertas direcciones o suprimir interferencias no deseadas.

```
% Encuentra los satélites LEO que se encuentran en el campo de visión de la
estación terrestre.
currentInterferingSat = interferingSat(accessStatus(ac,sc.StartTime) ==
true);

% Calcula la dirección del satélite LEO con respecto al array
[azd,eld] = aer(rxGs,leoSat,sc.StartTime,CoordinateFrame='body');

% Calcula las direcciones de los satélites potencialmente interferentes
con respecto al array. Estas son las direcciones nulas.
[azn,eln] =
aer(rxGs,currentInterferingSat,sc.StartTime,CoordinateFrame='body');

% Calcula los vectores de dirección
wd = steervec(getElementPosition(ant)/lambda,[wrapTo180(azd);-eld]);

% Calcula el vector de dirección para direcciones nulas.
wn = steervec(getElementPosition(ant)/lambda,[wrapTo180(azn)';-eln']);

% Calcule la respuesta de la dirección deseada en las direcciones nulas.
rn = (wn'*wn)\(wn'*wd);

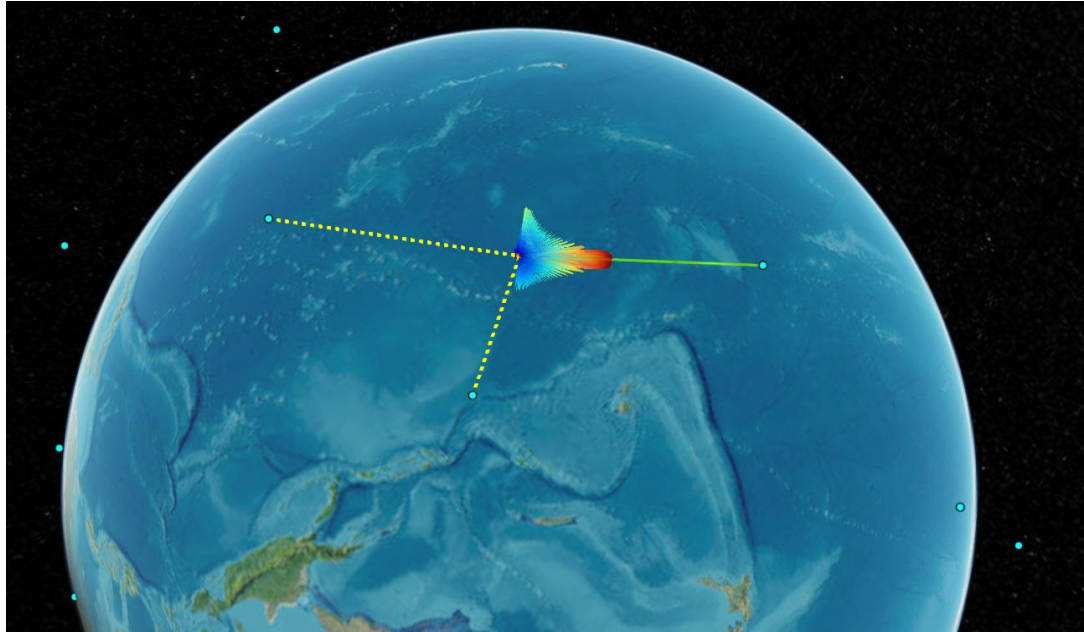
% Cancelador de lóbulos laterales: elimina la respuesta en direcciones nulas.
w = wd-wn*rn;

% Asigna los pesos al phased array.
pointAt(rxGs,Weights=w);

downlink = link(txMEOSat,rxGs);

lnkInterference = link(txInterferingSat,rxGs);

v = satelliteScenarioViewer(sc,ShowDetails=false);
```



*Figura 38. Conexión satélite gateway.*

En la Figura 38 apreciamos finalmente la conexión entre satélite y *gateway*. Observamos los distintos satélites, representados como puntos azules, que se encuentran simultáneamente en LEO, y la conexión principal entre el satélite y el *gateway*. Las líneas discontinuas representan la conexión con los satélites, y la línea continua la conexión con la estación terrestre. Con el fin de evitar interferencias, hemos de parametrizar correctamente las constelaciones satelitales. Hemos de tener en cuenta:

- La separación geográfica.
- La separación de frecuencias.
- La separación entre las órbitas, tanto en inclinación como en altitud sobre la Tierra.

Para las constelaciones de satélites que hemos estudiado, los datos sobre las características orbitales son los siguientes:

Tabla XVI. Características orbitales iniciales [49].

Constelación	Altitud (Km)	Inclinación (°)	Planos	Satélites por plano	Nº de satélites
Telesat	1.015	98,98	6	13	298
	1.325	50,88	20	11	
OneWeb	1.200	87,9	12	49	716
	1.200	55	8	16	
SpaceX	550	53	72	22	1.584
Amazon	630	51,9	12	34	578

En la Tabla XVI se detallan las fases iniciales de lanzamiento de cada constelación. Telesat en su fase inicial utiliza 6 planos polares con 13 satélites en cada plano, además de 20 planos inclinados con 11 satélites en cada plano. En la segunda fase, el número de planos polares se incrementará a 27, mientras que los planos inclinados aumentarán a 40. Además, en la segunda fase, el número de satélites por plano en las órbitas inclinadas se triplicará. Amazon, que es la constelación más reciente, planea lanzar hasta 3.236 satélites. En la Tabla XVII se exhiben los planes de futuros de cada constelación. Algunos planes ya han sido aprobados y otros se encuentran pendientes.

Tabla XVII. Planes futuros de constelaciones [49].

Constelación	Altitud (Km)	Inclinación (°)	Planos	Satélites por plano	Estado	Nº satélites
Telesat	1.015	98,98	27	13	P	1.671
	1.325	50,88	40	33	P	
OneWeb	1.200	87,9	36	49	P	6.372
	1.200	55	32	72	P	
	1.200	40	32	72	P	
SpaceX	540	53,2	72	22	P	4.408
	550	53	72	22	A	
	560	97,6	6	58	P	
	560	97,6	4	43	P	
	570	70	36	20	P	
Amazon	590	33	28	28	A	3.236
	610	42	36	36	A	
	630	51,9	34	34	A	

Con el objetivo de evitar interferencias, cada constelación opera en un rango de frecuencias determinado. En la Tabla XVIII se muestran los rangos de frecuencias que utiliza cada constelación para establecer el enlace *uplink* y *downlink*.

Tabla XVIII. Rangos de operación de las constelaciones [49].

Enlace	Telesat	SpaceX	OneWeb
Downlink (GHz)	17,8-20,2	17,8-19,3	17,8-20,2
Uplink (GHz)	27,5-30	27,5-30	27,5-30

## Capítulo 7: Conclusiones y líneas futuras

### 7.1 Conclusiones

Tras haber finalizado las simulaciones en MATLAB para transmisión y recepción y haber establecido una comparativa de los datos obtenidos, en este capítulo vamos a analizar los resultados obtenidos durante la realización del TFG.

En primera instancia, especificamos el rango de frecuencias para el *array* de transmisión y recepción en base al rango utilizado por las constelaciones LEO que se encuentran activas. Para la antena de transmisión el rango de frecuencias es de 27,5 – 30 GHz y para la antena receptora es de 17,8 – 20,2 GHz.

Seguidamente escogimos el sustrato de las antenas. Para llevar a cabo esta elección realizamos simulaciones para 3 sustratos diferentes, para comprobar con cuál de ellos obteníamos una mayor ganancia. Dichos sustratos fueron el Taconic TSM-DS3, Taconic TLX-8 y ROGERS 5880. Finalmente concluimos que con el ROGERS 5880, cuyo grosor es de 0,51 mm, obteníamos mayor ganancia.

Después de haber escogido el sustrato adecuado, procedimos a simular en MATLAB los *arrays* para transmisión y recepción. Hemos obtenido el número de elementos para transmisión y para recepción de cuatro constelaciones de satélites LEO operativos: SpaceX, OneWeb, Telesat y Amazon. En algunos casos, el número de elementos a simular en MATLAB era demasiado alto, con lo que la simulación se demoraba en exceso. Para solventar este inconveniente extrapolamos los datos que ya habíamos simulado y realizamos en Excel un gráfico de dispersión. A partir de la línea de tendencia del gráfico, obtuvimos una ecuación con la que calcular la ganancia, o el EIRP en el caso de transmisión, para un número indefinido de elementos. A continuación, en la Tabla XIX y Tabla XX se contrastan los resultados obtenidos, tanto en MATLAB como en SystemVue para transmisión y recepción, respectivamente.

Tabla XIX. Tabla resumen resultados obtenidos para transmisión.

	OneWeb	Telesat	Amazon	SpaceX
EIRP (dBW)	63,2	75,9	62,3	68,4
Elementos teóricos	2116	9216	1936	3844
Elementos obtenidos en MATLAB	3025	12100	2704	5329
Elementos obtenidos en SystemVue [3]	4761	20164	4225	8649

Tabla XX. Tabla resumen resultados obtenidos para recepción.

	OneWeb	Telesat	Amazon	SpaceX
Ganancia (dBm)	51,5	46,5	50,2	46,9
Elementos teóricos	29241	9216	21609	10201
Elementos obtenidos en MATLAB	47089	16129	35344	17689
Elementos obtenidos en SystemVue [3]	58564	18225	43264	19881

Analizando la Tabla XIX y Tabla XX, vemos que existe discrepancia entre los resultados teóricos y simulados. Esto se debe a que las fórmulas teóricas no son del todo fieles a la realidad, ya que en la práctica existen diversos inconvenientes que aumentan dicha diferencia, como por ejemplo la interferencia entre elementos. Además, la relación existente entre el EIRP y el número de elementos del *array* es una relación logarítmica, con lo cual, para alto valores de EIRP o ganancia, son necesarios muchos elementos para aumentar 1 decibelio.

Por otro lado, los resultados obtenidos en SystemVue han sido obtenidos para un *array* cuadrado [3]. La diferencia entre los resultados obtenidos en SystemVue y MATLAB se explica por la diferencia de ganancia de las antenas empleadas para diseñar cada *array*, así como las diferencias inherentes entre los simuladores de cada *software*.



## 7.2 Líneas futuras

Uno de los problemas principales con lo que hemos tenido que lidiar durante el desarrollo del proyecto, fue la estimación de muchos elementos para transmisión y recepción. Como se comentó anteriormente, la opción de extrapolar los datos resulta una solución viable, pero no es fiel a la realidad, ya que cometemos un ligero error de precisión. En consecuencia, se podría desarrollar una aplicación de *Machine Learning* para poder estimar el número de elementos necesarios de una forma más rápida y precisa.

También se podría diseñar y simular, siguiendo el mismo procedimiento, otro tipo de antenas, lo que conllevaría a utilizar otras bandas de frecuencia.

Otra vía de continuación consiste en variar la geometría del *array*. MATLAB dispone de funciones específicas con las que podemos crear:

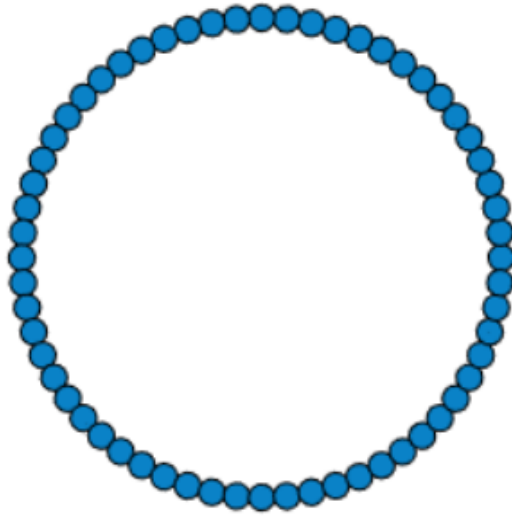
- Un *array* plano con una geometría no rectangular, como un *array* circular.
- Un *array* cuya geometría no es uniforme, como un *array* lineal con un espaciado variable entre elementos.
- Un *array* que no es plano.

Por ejemplo, si queremos crear un *array* circular, disponemos de dos opciones, utilizar el objeto *phased.UCA* o el objeto *phased.ConformalArray*. El *array* conformado es más general ya que los elementos pueden apuntar a direcciones arbitrarias. Sin embargo, al utilizar el *array* circular la dirección de los elementos está restringida al plano del *array*. Para crear un *array* circular a partir de uno conformado debemos seguir los siguientes pasos:

- Especificar el espacio entre elementos en radianes.
- Elige el radio de manera que la distancia entre elementos contiguos sea la mitad de una longitud de onda.
- Especificar los ángulos azimut de los elementos, los cuales deben estar en el rango de  $(-180^\circ, 180^\circ)$ .

En la Figura 39 se observa un ejemplo de un *array* con geometría circular obtenido a partir del procedimiento anterior

## Array Geometry



*Figura 39. Array circular conformado.*

Por último, para darle continuidad al proyecto, podríamos realizar el diseño en *layout* de la antena para su posterior medida y fabricación, ya que los materiales escogidos para transmisión y recepción han sido elegidos con esta finalidad.

## Referencias

- [1] “Análisis y diseño de Arrays de antenas en fase para constelaciones de satélites LEO | accedaCRIS.” <https://accedacris.ulpgc.es/handle/10553/108664> (accessed Feb. 05, 2023).
- [2] “Una Introducción a la Percepción Remota - ppt descargar.” <https://slideplayer.es/slide/3915455/> (accessed Feb. 05, 2023).
- [3] I. Merino-Fernandez, S. L. Khemchandani, J. del Pino, and J. Saiz-Perez, “Phased Array Antenna Analysis Workflow Applied to Gateways for LEO Satellite Communications,” *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 9406, vol. 22, no. 23, p. 9406, Dec. 2022, doi: 10.3390/S22239406.
- [4] M. Faridani, G. Xiao, R. E. Amaya, and M. C. E. Yagoub, “A Compact Beam-Steerable Integrated Reflectarray Antenna for LEO Applications,” *2021 IEEE 19th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics, ANTEM 2021*, Aug. 2021, doi: 10.1109/ANTEM51107.2021.9518556.
- [5] “Antenas en fase - Wikipedia, la enciclopedia libre.” [https://es.wikipedia.org/wiki/Antenas\\_en\\_fase](https://es.wikipedia.org/wiki/Antenas_en_fase) (accessed Feb. 05, 2023).
- [6] “Phased Array Beamforming ICs Simplify Antenna Design | Analog Devices.” <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/phased-array-beamforming-ics-simplify-antenna-design.html> (accessed Feb. 05, 2023).
- [7] G. He, X. Gao, L. Sun, and R. Zhang, “A review of multibeam phased array antennas as LEO satellite constellation ground station,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 147142–147154, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3124318.
- [8] Robert S. Elliot, “*Antenna theory and design*,.”
- [9] “LINK BUDGET CALCULATIONS FOR A SATELLITE LINK WITH AN ELECTRONICALLY STEERABLE ANTENNA TERMINAL,” 2019.
- [10] “Illustration of beam squint effect in large-scale antenna array | Download Scientific Diagram.” [https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-beam-squint-effect-in-large-scale-antenna-array\\_fig1\\_334644440](https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-beam-squint-effect-in-large-scale-antenna-array_fig1_334644440) (accessed Feb. 22, 2023).
- [11] “Phased-Array Antenna Patterns (Part 5)—Beam Squint | Microwaves & RF.” <https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21142402/analog-devices-phasedarray-antenna-patterns-part-5beam-squint> (accessed Mar. 03, 2023).

- [12] "Satellite uplink G/T explanation for link budget calculations." <https://www.satsig.net/lbgt.htm> (accessed Feb. 22, 2023).
- [13] "Diagramas de radiación." [http://www.upv.es/antenas/Tema\\_1/diagramas\\_de\\_radiacion.htm](http://www.upv.es/antenas/Tema_1/diagramas_de_radiacion.htm) (accessed Feb. 15, 2023).
- [14] H. J. Visser and J. Wiley, "Array and Phased Array Antenna Basics."
- [15] "Diagrama de radiación - Antenas." <http://todoantenas.weebly.com/diagrama-de-radiacioacuten.html> (accessed Feb. 15, 2023).
- [16] "Directividad." [http://www.upv.es/antenas/Tema\\_1/Directividad.htm](http://www.upv.es/antenas/Tema_1/Directividad.htm) (accessed Feb. 15, 2023).
- [17] C. Pérez Vega, "Capítulo 10 Antenas: Universidad de Cantabria".
- [18] "Parámetros de una antena - Equipos de imagen." <https://sites.google.com/site/equiposdeimagengmfp/1-transmision-de-television/2-antenas-de-television/parmetros-de-una-antena> (accessed Feb. 15, 2023).
- [19] "Tema 2: ANTENAS", Accessed: Jul. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/29/29329/transparenciasdeantenas.pdf>
- [20] "(PDF) Microstrip Patch Antenna Parameters, Feeding Techniques & Shapes of the Patch – A Survey." [https://www.researchgate.net/publication/286145970\\_Microstrip\\_Patch\\_Antenna\\_Parameters\\_Feeding\\_Techniques\\_Shapes\\_of\\_the\\_Patch\\_-\\_A\\_Survey](https://www.researchgate.net/publication/286145970_Microstrip_Patch_Antenna_Parameters_Feeding_Techniques_Shapes_of_the_Patch_-_A_Survey) (accessed Feb. 21, 2023).
- [21] "Campo Cercano y Campo Lejano - Tes America." <https://www.tesamerica.com/campo-cercano-y-campo-lejano/> (accessed Apr. 09, 2023).
- [22] "Voltage Standing Wave Ratio Definition and Formula | Analog Devices." <https://www.analog.com/en/technical-articles/voltage-standing-wave-ratio-definition-and-formula.html#:~:text=VSWR%20Definition,line%2C%20and%20into%20the%20load>. (accessed Mar. 03, 2023).
- [23] "Parámetros s - Medición de parámetros S, Matrices de parámetros s de orden superior, S Parámetros para unipoli, S parámetros en el diseño de amplificadores, S parámetros en cuadripoles | KripKit." <https://kripkit.com/parmetros-s/> (accessed Feb. 21, 2023).

- [24] "Microwaves101 | S-parameters." <https://www.microwaves101.com/encyclopedias/s-parameters> (accessed Feb. 15, 2023).
- [25] "E.I.R.P. (Effective Isotropic Radiated Power) - potenc... - Delta." [https://shopdelta.eu/e-i-r-p-effective-isotropic-radiated-power-potencia-isotropica-radiada-equivalente\\_l6\\_aid837.html](https://shopdelta.eu/e-i-r-p-effective-isotropic-radiated-power-potencia-isotropica-radiada-equivalente_l6_aid837.html) (accessed Feb. 15, 2023).
- [26] "KA VS KU BAND : WHICH IS THE BEST FOR SATELLITE BROADBAND? | Technology & Data | Aid & International Development Forum (AIDF)." <http://www.aidforum.org/topics/technology-data/ka-vs-ku-band-which-is-the-best-for-satellite-broadband/> (accessed Feb. 27, 2023).
- [27] "Ka-band Vs. Ku-band | Everything You Should Know | Get SAT." <https://www.getsat.com/knowledge-base/ku-band-vs-ka-band/> (accessed Feb. 27, 2023).
- [28] "What Makes Ka-band Systems Tick? | Microwaves & RF." <https://www.mwrf.com/technologies/systems/article/21849025/what-makes-kaband-systems-tick> (accessed Feb. 27, 2023).
- [29] "ITU and space: Ensuring interference-free satellite orbits in LEO and beyond - ITU Hub." <https://www.itu.int/hub/2022/02/itu-space-interference-free-satellite-orbits-leo/> (accessed Feb. 28, 2023).
- [30] T. Kadyrov, "Non-geostationary satellite systems and networks".
- [31] "What Frequency Does Starlink Use?" <https://www.americanstv.com/what-frequency-does-starlink-use.php> (accessed Mar. 01, 2023).
- [32] Telesat, "Response to 24 – 30 GHz use in New Zealand consultation", Accessed: Mar. 01, 2023. [Online]. Available: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/oth/0c/0a/R0C0A00000D0016PDFE.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/0c/0a/R0C0A00000D0016PDFE.pdf)
- [33] "ONEWEB NON-GEOSTATIONARY SATELLITE SYSTEM (LEO) PHASE 2: MODIFICATION TO AUTHORIZED SYSTEM ATTACHMENT B Technical Information to Supplement Schedule S".
- [34] "What frequency does the Iridium satellite system use? - everything RF." <https://www.everythingrf.com/community/what-frequency-does-the-iridium-satellite-system-use> (accessed Mar. 01, 2023).
- [35] "Promoting a Competitive and Innovative Satellite Telecommunications Marketplace," 2015.

- [36] "Network – Kepler Communications." <https://kepler.space/network/> (accessed Mar. 01, 2023).
- [37] "Amazon lanzará los dos primeros satélites del proyecto Kuiper a finales de 2022 - Actualidad Aeroespacial." <https://actualidadaeroespacial.com/amazon-lanzara-los-dos-primeros-satelites-del-proyecto-kuiper-a-finales-de-2022/> (accessed Mar. 01, 2023).
- [38] "El Gobierno autoriza la constitución de la sociedad 'STARTICAL' para la innovación en la provisión de servicios satelitales para la navegación aérea." [https://www.enaire.es/es\\_ES/2021\\_05\\_18/ndp\\_proyecto\\_startical](https://www.enaire.es/es_ES/2021_05_18/ndp_proyecto_startical) (accessed Mar. 03, 2023).
- [39] "Enaire e Indra lanzan Startical para la gestión del tráfico aéreo desde el espacio - Fly News." <https://fly-news.es/aviacion-comercial/aeropuertos/enaire-aeropuertos/enaire-e-indra-lanzan-startical-la-gestion-del-trafico-aereo-desde-espacio/> (accessed Mar. 03, 2023).
- [40] "Antena de parche. Pasos para el diseño • Cálculo del ancho del parche... | Download Scientific Diagram." [https://www.researchgate.net/figure/Antena-de-parche-Pasos-para-el-diseno-Calculo-del-ancho-del-parche-W\\_fig5\\_304336214](https://www.researchgate.net/figure/Antena-de-parche-Pasos-para-el-diseno-Calculo-del-ancho-del-parche-W_fig5_304336214) (accessed Jul. 11, 2023).
- [41] S. E. Jasim, M. A. Jusoh, M. H. Mazwir, and S. N. S. Mahmud, "FINDING THE BEST FEEDING POINT LOCATION OF PATCH ANTENNA USING HFSS," vol. 10, no. 23, 2015, Accessed: Mar. 15, 2023. [Online]. Available: [www.arpnjournals.com](http://www.arpnjournals.com)
- [42] "Antenna-Theory.com - Microstrip rectangular (Patch) Antena - Métodos de alimentación." <https://www.antenna-theory.com/spanish/antennas/patches/patch3.php> (accessed Jul. 05, 2023).
- [43] "Capítulo 3: Antenas tipo parche o de microstrip".
- [44] "Create microstrip patch antenna - MATLAB - MathWorks España." <https://es.mathworks.com/help/antenna/ref/patchmicrostrip.html> (accessed Mar. 29, 2023).
- [45] "TSM-DS3", Accessed: Jul. 09, 2023. [Online]. Available: <http://www.taconic.co.kr/download/TSM-DS3.pdf>
- [46] "Taconic TLX-8." [Online]. Available: [http://outgassing.nasa.gov/og\\_disclaimer.html](http://outgassing.nasa.gov/og_disclaimer.html)
- [47] R. Corporation, "RT/duroid ® 5870 /5880 High Frequency Laminates Some Typical Applications: • Commercial Airline Broadband Antennas • Microstrip and Stripline

Circuits • Millimeter Wave Applications • Military Radar Systems • Missile Guidance Systems • Point to Point Digital Radio Antennas,” 2022.

- [48] “Satellite Scenario Key Concepts - MATLAB & Simulink - MathWorks España.” <https://es.mathworks.com/help/aerotbx/ug/satelliteScenario-key-concepts.html> (accessed Jul. 08, 2023).
- [49] N. Pachler, I. Del Portillo, E. F. Crawley, and B. G. Cameron, “An Updated Comparison of Four Low Earth Orbit Satellite Constellation Systems to Provide Global Broadband,” *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops 2021 - Proceedings*, Jun. 2021, doi: 10.1109/ICCWORSHOPS50388.2021.9473799.

## Presupuesto

Tras haber realizado el diseño de *arrays* para transmisión y recepción, se procede a realizar un análisis sobre los costes económicos asociados al proyecto. En los siguientes apartados se recogen los costes asociados al Trabajo de Fin de Grado. Dicho presupuesto consta de:

### P.1 Trabajo tarifado por tiempo empleado

Para determinar el costo total de un trabajo tarifado por tiempo empleado, se deben tener en cuenta los gastos asociados a la mano de obra, los cuales se basan en el salario por hora de un Ingeniero Técnico de Telecomunicación. Al consultar la tabla de remuneración para personal contratado en proyectos de investigación, elaborada por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria en 2021, se confirma que el salario correspondiente a una dedicación de 20 horas semanales es de 725,49 euros. Considerando que se estima una duración aproximada de 4 meses para la realización del TFG, procederemos a realizar el siguiente cálculo para determinar el costo total

$$725,49 * 4 = 2.901,96 \text{ €}$$

El coste del trabajo tarifado por tiempo empleado es de *dos mil novecientos uno con noventa y seis* (2.901,96 €).

### P.2 Recursos hardware

Para el desarrollo de este proyecto se han precisado diferentes recursos hardware, en la Tabla XXI se listan los recursos empleados.

*Tabla XXI. Coste recursos hardware.*

Recurso	Coste estimado	Coste amortización
Ordenador personal	800,00 €	266,6 €
TOTAL	800,00 €	266,6 €

### P.3 Recursos software

Por otra parte, hemos precisado de recursos software para la elaboración del proyecto. Los recursos empleados se muestran en la Tabla XXII.



Tabla XXII. Coste recursos software.

Recurso	Tipo de licencia	Coste	Tiempo de uso	Mantenimiento
MATLAB Student Suite	Universitaria	69,00 €	4 meses	-
Windows 10 Home	Empresa	0 €	4 meses	-

#### P.4 Redacción de la memoria

Una vez calculados los costes de amortización del material, se ha determinado el coste asociado a la redacción de la memoria. Para ello, se ha tenido en cuenta la Ecuación (27), que se presenta a continuación:

$$R = 0,07 * P * C_n \quad (27)$$

donde R representa los honorarios por la redacción del trabajo, mientras que C<sub>n</sub> es el coeficiente de ponderación en función del presupuesto. El presupuesto se obtiene sumando los costes del trabajo tarifado por tiempo empleado y la amortización del inmovilizado material. En este caso particular, se establece que el coeficiente de ponderación (C<sub>n</sub>) tiene un valor de unidad, ya que el coste total del proyecto es inferior a 30,500.00 €. Esto implica que no se aplica un ajuste adicional al presupuesto en función de este coeficiente. Dicho presupuesto se recoge en la Tabla XXIII.

Tabla XXIII. Presupuesto del trabajo tarifado y amortización de los recursos hardware y software.

Concepto	Coste (€)
Trabajo tarifado por tiempo empleado	2.901,96
Amortización del material <i>hardware</i>	266,6
Amortización del material <i>software</i>	0
Total	3.168,56

Si sustituimos los valores obtenidos en la Ecuación (27) obtenemos:

$$R = 0,07 * 3168,56 * 1 = 221,8 \text{ €}$$

Los costes de redacción son de *doscientos veintiuno con ocho céntimos* (221,8€).

#### P.5 Derechos de visado del COITT

Para el año 2021, el COITT establece que para proyectos de integración de sistemas los derechos de visado se calculan según la Ecuación (28). El término *V* es el coste del visado del trabajo, *P* es el presupuesto del proyecto y *C* es el coeficiente reductor en función del presupuesto. En este caso, *C* es de valor unidad debido a que el coste total del proyecto no supera los 30.050,00 €.

$$V = 0,0035 * P * C \quad (28)$$

Para obtener el valor total del presupuesto se suman los costes del trabajo tarifado por tiempo empleado, la amortización de los recursos hardware y software y la redacción del documento. Dichos valores se recogen en la Figura 40.

Concepto	Coste (€)
Trabajo tarifado por tiempo empleado	2.901,96
Amortización del material <i>hardware</i>	266,6
Amortización del material <i>software</i>	0
Redacción del trabajo	221,8
Total	3.390,36

Figura 40. Presupuesto y amortizaciones COITT.

Sustituyendo valores obtenemos que:

$$V = 0,0035 * 6337,12 * 1 = 11,87 \text{ €}$$

Por tanto, los derechos de visado del presupuesto ascienden a *once euros con ochenta y siete céntimos* (11,87 €).

## P.6 Material fungible

Además de los materiales previamente mencionados, se han utilizado materiales adicionales en el desarrollo del proyecto. Estos materiales incluyen suministros de papelería. Los detalles y los costos asociados a estos recursos se encuentran registrados de manera específica en la Tabla XXIV.

Tabla XXIV. Coste material fungible.

Material	Coste (€)
Folios	10

El coste del material fungible es de *diez euros*.

## P.7 Aplicación de impuestos y coste total

Por último, es necesario aplicar el Impuesto General Indirecto Canario (IGIC) en un 7% para la realización del TFG. Para presentar el presupuesto final del proyecto se ha elaborado la Tabla XXV.

Tabla XXV. Presupuesto total del Trabajo de Fin de Grado.

Concepto	Coste (€)
Trabajo tarifado por tiempo empleado	2.901,96
Amortización de los recursos hardware	266,6
Amortización de los recursos software	0
Redacción del trabajo	221,8
Derechos de visado del COITT	11,87
Coste del material fungible	10
Subtotal sin IGIC	3.412,23
IGIC (7%)	238,86
Total	3.651,09

Don Pablo Medina Suárez declara que el presupuesto total del presente proyecto asciende a *tres mil seiscientos cincuenta y uno con nueve céntimos* (3.651,09€).

Las Palmas de Gran Canaria, a de 5 de julio de 2023.