

Máster Universitario en Electrónica y Telecomunicación Aplicadas (META)



Trabajo Fin de Máster

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Autor: Irene Merino Fernández
Tutor(es): Dr. Sunil Lalchand Khemchandani
Dr. Francisco Javier del Pino Suárez
Fecha: **Junio de 2021**



t +34 928 451 150
+34 928 451 086
f +34 928 451 083

e: iuma@iuma.ulpgc.es
w: www.iuma.ulpgc.es

Campus Universitario de Tafira
35017 Las Palmas de Gran Canaria

Máster Universitario en Electrónica y Telecomunicación Aplicadas (META)



Trabajo Fin de Máster

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

HOJA DE FIRMAS

Alumno/a: Irene Merino Fernández Fdo.:

Tutor/a: Dr. Sunil Lalchand Khemchandani Fdo.:

Tutor/a: Dr. Francisco Javier del Pino Suárez Fdo.:

Fecha: Junio de 2021



t +34 928 451 150
+34 928 451 086
f +34 928 451 083

e: iuma@iuma.ulpgc.es
w: www.iuma.ulpgc.es

Campus Universitario de Tafira
35017 Las Palmas de Gran Canaria

Máster Universitario en Electrónica y Telecomunicación Aplicadas (META)



Trabajo Fin de Máster

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

HOJA DE EVALUACIÓN

Calificación:

Presidente

Fdo.:

Secretario

Fdo.:

Vocal

Fdo.:

Fecha: Julio de 2021

Agradecimientos

En las siguientes líneas voy a agradecer a todas las personas que me han ayudado en este año, y, sobre todo, en el progreso de este proyecto.

Primero, a mis tutores Javier y Sunil, por toda su dedicación y esfuerzo, los cuales han estado pendientes de cada avance estos meses, ayudándome en cada momento en el que lo he necesitado para finalizar de manera satisfactoria.

Segundo, a esos compañeros de clase que se han convertido en buenos amigos, a José y a Carlos por apoyarme incondicionalmente durante todo este curso, ayudarme en el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster, y darme la inspiración cuando la necesitaba para innovar.

Tercero, a mis amigos, sobre todo a Emma y a Ylenia, que, aunque no continuaran conmigo en esta etapa de estudios, quiero agradecerles esas tardes en las que me han faltado las ganas de seguir, y no me han dejado abandonar. Y a mis compañeros de Sistemas de Telecomunicación Carlos y Antonio por guiarme en los conceptos teóricos.

Por último, pero no menos importante, a mi familia, en especial a mi madre. Siempre estaré agradecida por todo el esfuerzo y la paciencia que me da para poder continuar y finalizar cada etapa de mis estudios.

Resumen

El objetivo de este proyecto es el 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 la transmisión, con el fin de aplicarlas en comunicaciones con satélites de órbita baja desde estaciones base en la Tierra, esto es, el *gateway* del sistema.

Inicialmente, hemos diseñado la antena de transmisión. Para ello, hemos realizado un estudio sobre los diferentes materiales disponibles para el sustrato, y las formas de diseñarlo geométricamente y cómo alimentarlo. Hemos buscado materiales reales que se puedan utilizar en este rango de frecuencia para proceder al diseño utilizando el *PathWave Advanced Design System (ADS)* de *Keysight*. Una vez diseñada la antena, hemos modelado el *array* utilizando EMPro para obtener el patrón de radiación y poder utilizarlo en un *template* en el *SystemVue*, probando también diferentes configuraciones de cómo disponer los elementos. Para finalizar con la transmisión, hemos obtenido el número de elementos radiantes para tres plataformas de satélites en la órbita baja que están en funcionamiento: SpaceX, Telesat y OneWeb.

De igual manera hemos procedido en la recepción: elección de sustrato, diseño de la antena, modelado del *array* y número de elementos radiantes para las tres plataformas mencionadas. En esta fase del diseño hemos considerado a la hora de modelar el *array* de antenas el ruido del sistema, ya que en la recepción es un parámetro influyente en las prestaciones de este, y la potencia entregada en cada uno de los elementos radiantes.

Para finalizar, en las conclusiones del proyecto se ha hecho un resumen de este, analizando y mostrando las diferentes gráficas obtenidas. Además, se ha añadido las líneas futuras.

Abstract

The main purpose of this work is to analyse and design a phased *array* system. Specifically, we choose 17.8 to 20.2 GHz frequency range for reception and 27.5 to 30 GHz for transmission. This work has been applied to low orbit satellite communications (LEO), for communications between the earth stations, or gateway and the satellites.

Initially, transmitting antenna was designed. For this, a study on the different materials available for the substrate was carried out, and the ways to design it geometrically and how to feed it. Real materials were considered, because they could be used in this frequency range to proceed to the design using the Keysight Advanced Design System. Once the antenna was designed, through EMPro the radiation pattern was obtained, and the modelling of phased *array* antennas started in SystemVue. Also, different configurations for the elements were tried. Three satellite platforms that are in orbit nowadays were chosen to analyse and get the number of elements: SpaceX, Telesat and OneWeb.

Similarly, the reception phased *array* antenna was designed: choosing the substrate, designing the antenna, modelling the *array*, and getting the number of radiant elements for the three mentioned low orbit satellites. In this stage of the design, the noise of the system was considered when modelling the antenna *array*, since in reception it is an influencing parameter in the performance of the system itself. The power delivered to each of the radiating elements was also considered.

Finally, a summary has been made, analysing and showing the different graphs obtained. In addition, future lines have been included.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1. Introducción	22
1.1 Antecedentes.....	22
1.1.1 Constelaciones LEO	22
1.1.2 Frecuencia y especificaciones	25
1.1.3 <i>Array</i> de antenas en fase.....	28
1.2 Objetivos	30
1.3 Peticionario.....	30
1.4 Estructura del documento.....	30
Capítulo 2. Parámetros de diseño de un <i>array</i> de antenas en fase	32
2.1 Introducción.....	32
2.2 Parámetros de un <i>array</i> de antenas en fase	32
2.2.1 Cálculo de la elevación y el azimut.....	32
2.2.2 <i>Beam squint</i>	34
2.3 Parámetros básicos de las antenas.....	34
2.3.1 Diagrama de radiación.....	34
2.3.2 Directividad	35
2.3.3 Ganancia.....	36
2.3.4 Eficiencia.....	36
2.3.5 Polarización	36
2.3.6 Ancho de banda.....	37
2.3.7 VSWR	37
2.3.8 Parámetros S.....	37
2.3.9 Pérdidas de retorno	38
2.3.10 Área efectiva	38
2.3.11 Vector longitud efectiva.....	38
2.3.12 EIRP	39

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

2.3.13 Sensibilidad.....	39
2.3.14 G/T.....	39
2.4 Influencia de elementos radiantes en las prestaciones	40
2.5 Influencia del medio de transmisión	41
2.5.1 Pérdidas debidas al espacio libre	41
2.5.2 Pérdidas debidas a la atmósfera.....	42
2.5.3 Pérdidas debidas al esfumado de lluvia.....	43
2.6 Conclusiones.....	46
Capítulo 3. <i>Array</i> de antenas para la transmisión	47
3.1 Introducción.....	47
3.2 Definición del sustrato	48
3.3 Diseño en ADS	49
3.4 Modelado <i>array</i> de antenas.....	54
3.5 Simulaciones finales transmisión.....	66
3.6 Conclusiones.....	69
Capítulo 4. <i>Array</i> de antenas para la recepción	71
4.1 Introducción.....	71
4.2 Definición del sustrato	71
4.3 Diseño en ADS	72
4.4 Modelado <i>array</i> de antenas.....	75
4.5 Simulaciones finales recepción	87
4.6 Conclusiones.....	89
Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras.....	91
5.1 Conclusiones.....	91
5.2 Líneas futuras.....	94
Referencias.....	97
Anexos.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Órbita terrestre baja [2].	22
Figura 2. Constelación de satélites LEO [1].	23
Figura 3. Enlaces presentes en la comunicación satelital [3].	24
Figura 4. Funcionamiento del array de antenas en fase [14].	28
Figura 5. Ejemplo de array de antenas en fase montadas sobre vehículo [16].	29
Figura 6. Diagrama de radiación de una antena 5G [18].	29
Figura 7. Elevación y azimut [21].	33
Figura 8. Representación beam squint.	34
Figura 9. Diagrama de radiación de un dipolo de media onda [24].	35
Figura 10. Cortes para dipolo de media onda [24].	35
Figura 11. Radiador isotrópico [24].	35
Figura 12. Componentes de coordenadas esféricas E_θ y E_ϕ .	36
Figura 13. Tipos de polarización [26].	37
Figura 14. Red de dos puertos [27].	38
Figura 15. Relación logarítmica elementos radiantes, ganancia y directividad.	41
Figura 16. Absorción atmosférica de la energía de ondas milimétricas [21].	43
Figura 17. Regiones climáticas de lluvia [21].	44
Figura 18. Atenuación de la lluvia en función de polarización y frecuencia [33].	45
Figura 19. Diagrama de transmisión.	47
Figura 20. Definición del sustrato.	48
Figura 21. Sustrato de transmisión.	49
Figura 22. Distribución de la impedancia en una antena tipo parche [36].	50
Figura 23. Diseño final antena tipo parche.	51
Figura 24. Antena tipo parche de transmisión.	52
Figura 25. Coeficiente de reflexión a la entrada de la antena de transmisión.	52
Figura 26. Parámetros de la antena de transmisión.	53
Figura 27. Diagrama de radiación antena de transmisión.	53
Figura 28. Corte diagrama de radiación antena de transmisión.	54
Figura 29. Flujo del trabajo para diseño de array de antenas.	55
Figura 30. Esquema array 2x2 en ADS.	56
Figura 31. Esquema array 4x4 en ADS.	56
Figura 32. Vista 3D array 2x2.	57
Figura 33. Vista 3D array 4x4.	57

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Figura 34. Gráfica comparación valores de ganancia antena de transmisión.....	58
Figura 35. Diagrama de radiación array de transmisión 2.2 ADS.	58
Figura 36. Diagrama de radiación array de transmisión 4x4 ADS.	59
Figura 37. Esquema SystemVue array de transmisión.	59
Figura 38. Disposición cuadrada array de antenas.....	60
Figura 39. Diagrama de radiación array de transmisión 2x2 SystemVue.....	61
Figura 40. Diagrama de radiación array de transmisión 4x4 SystemVue.....	61
Figura 41. Comparativa de ganancias de transmisión.	62
Figura 42. Disposición circular de antenas.	62
Figura 43. Disposición hexagonal de antenas.	63
Figura 44. Gráfica array cuadrado de transmisión.	64
Figura 45 Gráfica array circular de transmisión.	64
Figura 46. Gráfica array hexagonal de transmisión.	65
Figura 47. Variación ángulos apuntamiento en transmisión.....	66
Figura 48. EIRP en función del número de elementos en transmisión.	68
Figura 49. Diagrama de recepción.	71
Figura 50. Sustrato de recepción.	72
Figura 51. Antena tipo parche de recepción.	73
Figura 52. Coeficiente de reflexión a la entrada de la antena de recepción.....	73
Figura 53. Diagrama de radiación antena de recepción.....	74
Figura 54. Parámetros de la antena de recepción.	74
Figura 55. Corte diagrama de radiación antena de recepción.	75
Figura 56. Esquema array 2x2 de recepción.	76
Figura 57. Esquema array 4x4 de recepción.	76
Figura 58. Diagrama de radiación array 2x2 de recepción ADS.	77
Figura 59. Diagrama de radiación array 4x4 de recepción ADS.	78
Figura 60. Comparación valores de ganancia ADS y teórico en la recepción.....	79
Figura 61. Esquema array de recepción SystemVue.....	80
Figura 62. Diagrama de radiación array 2x2 de recepción SystemVue.	80
Figura 63. Diagrama de radiación array 4x4 de recepción SystemVue.	81
Figura 64. Comparativa ganancias en la recepción.	81
Figura 65. Ganancia en función de los elementos en la recepción.....	82
Figura 66. Gráfica array cuadrado de recepción.....	84
Figura 67. Gráfica array circular de recepción.....	85

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Figura 68. Gráfica array hexagonal de recepción.	85
Figura 69. Variación ángulos apuntamiento en la recepción.....	86
Figura 70. Comparación configuraciones de transmisión.	92
Figura 71. Comparación configuraciones de recepción.	92
Figura 72. Array de antenas 2x2 fabricado con parche parásito [41].	94
Figura 73. Sistema final para comunicaciones con array de antenas en fase [42]. ..	95
Figura 74. Esquema array de antenas 2x2 para transmisión.....	102
Figura 75. Esquema array de antenas 4x4 para transmisión.....	102
Figura 76. Array de antenas para transmisión.	102
Figura 77. Esquema array de antenas 2x2 para recepción.....	102
Figura 78. Esquema array de antenas 4x4 para recepción.....	102
Figura 79. Array de antenas para recepción.	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Rangos de frecuencia designados por la ITU [7].	26
Tabla II. Constelaciones LEO en funcionamiento.	27
Tabla III. Relación elementos radiantes, directividad y ganancia.	40
Tabla IV. Coeficientes para estimar la atenuación de la lluvia [33].	45
Tabla V. Dimensiones antena de transmisión.	51
Tabla VI. Ganancia en función del número de antenas de transmisión.	57
Tabla VII. Comparativa de valores de ganancia en transmisión.	61
Tabla VIII. EIRP para diferentes disposiciones de elementos en transmisión.	63
Tabla IX. Especificaciones de transmisión.	67
Tabla X. Recopilación elementos simulados en transmisión.	67
Tabla XI. Tabla comparativa valores teóricos y simulación.	69
Tabla XII. Dimensiones antena de recepción.	72
Tabla XIII. Comparación valores de ganancia ADS y teórico en la recepción.	78
Tabla XIV. Comparativa ganancias en la recepción.	81
Tabla XV. Ganancia en función de los elementos en la recepción.	82
Tabla XVI. Ganancia para diferentes disposiciones de elementos en la recepción.	84
Tabla XVII. Especificaciones recepción.	87
Tabla XVIII. Valores antena de recepción.	88
Tabla XIX. Potencia entregada a la carga para satélites de referencia.	88
Tabla XX. Elementos obtenidos para satélites de referencia.	88
Tabla XXI. Tabla resumen especificaciones satélites operativos.	93

ACRÓNIMOS

3D	<i>3 Dimensiones</i>
ADS	<i>Advanced Design System</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiation Power</i>
EPFF	<i>Equivalent Power-Flux Density</i>
FSPL	<i>Free-Space Path Loss</i>
FSS	<i>Fixed-Satellite Service</i>
GEO	<i>Geosynchronous Equatorial Orbit</i>
GSO	<i>Geostationary Orbit</i>
G/T	<i>Gain-to-noise-temperature</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
LEO	<i>Low Earth Orbit</i>
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>
MMIC	<i>Monolithic Microwave Integrated Circuit</i>
mMTC	<i>Machine-Type Communications</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
TFM	<i>Trabajo de Fin de Máster</i>
TME	<i>Tecnología Microelectrónica</i>
VSWR	<i>Voltage Standing Wave Ratio</i>
WIMMIC	<i>Wireless Innovative MMIC</i>

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

1.1.1 Constelaciones LEO

Las constelaciones de satélites LEO (*Low Earth Orbit*) son aquellas cuya órbita es relativamente cercana a la superficie terrestre. Estas se sitúan en altitudes entre los 500 y 2000 km [1].

Los satélites en LEO, a diferencia de los GEO (*Geosynchronous Equatorial Orbit*), no tienen una órbita fijada alrededor del ecuador, no siempre siguen la misma ruta alrededor de la Tierra, el plano puede estar inclinado, tal y como vemos en la Figura 1. Esto significa que hay más rutas de satélites disponibles, siendo esta una de las razones por las que los satélites en estas órbitas son de los más utilizados [2].

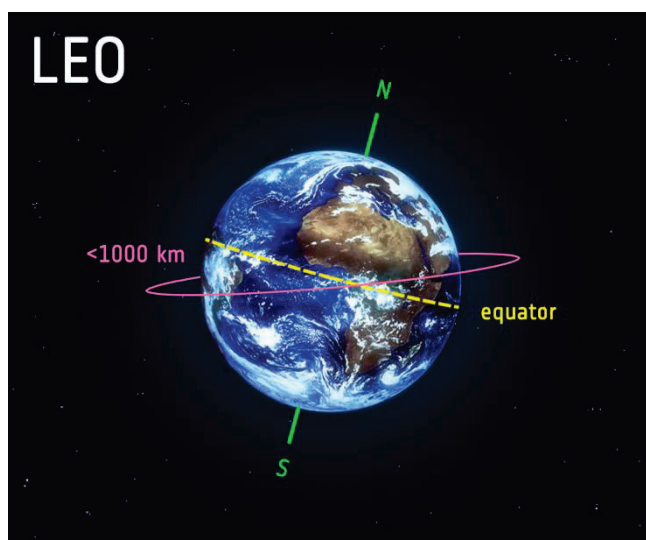


Figura 1. Órbita terrestre baja [2].

La proximidad de esta órbita hace que sea útil por distintos motivos. Estos satélites se utilizan para imágenes, pues la cercanía a la superficie terrestre nos permite tomar imágenes de mayor resolución. Además, la estación espacial internacional se ubica en esta órbita, haciendo que los astronautas hagan viajes en distancias más cortas. Los satélites en esta órbita viajan a una velocidad aproximada

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

de 7,8 km/s, dando una vuelta a la tierra cada 90 minutos. Por lo tanto, la estación espacial internacional viaja 16 veces alrededor de la Tierra. La velocidad de los satélites de esta órbita los hace adecuados para trabajar en determinadas tareas, como podrían ser las de telecomunicaciones, aunque requieren un gran esfuerzo de seguimiento desde las bases terrestres [2].

Los satélites en LEO suelen formar parte de una constelación, proporcionando una cobertura constante. Para aumentar esta cobertura, muchas veces se envían constelaciones formadas por varios de estos satélites, formando una red alrededor de la Tierra, pudiendo cubrir grandes zonas simultáneamente [2].

Estas constelaciones, representadas en la Figura 2, se presentan como solución para complementar las comunicaciones 5G [1], dando cobertura global y apoyo en diferentes aspectos, como la mejora del ancho de banda móvil, mMTC (*Machine-Type Communications*) masivas, que permitirán un gran rango de aplicaciones de internet de las cosas operando en grandes áreas geográficas o comunicaciones de gran confianza, las cuales nos dan latencias del orden de 30 ms, con un retardo de propagación de 2 ms entre la tierra y las constelaciones [1].

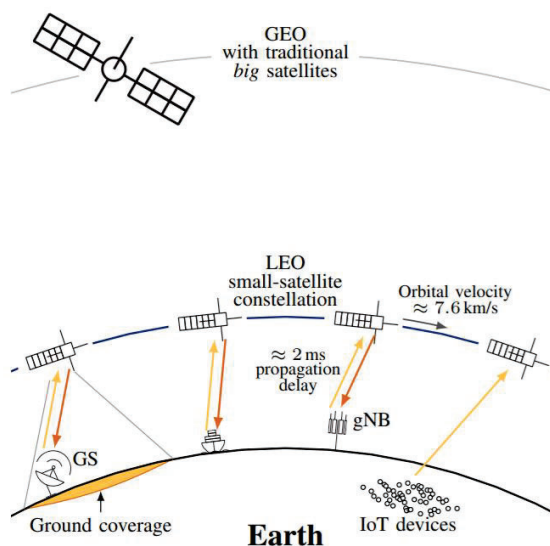


Figura 2. Constelación de satélites LEO [1].

En este TFM (Trabajo de Fin de Máster) vamos a trabajar sobre las comunicaciones entre el *gateway*, que es la estación que está en la Tierra, y el satélite, aunque también existe la comunicación entre usuario y satélite. Estas comunicaciones existentes son las que vemos en la Figura 3.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

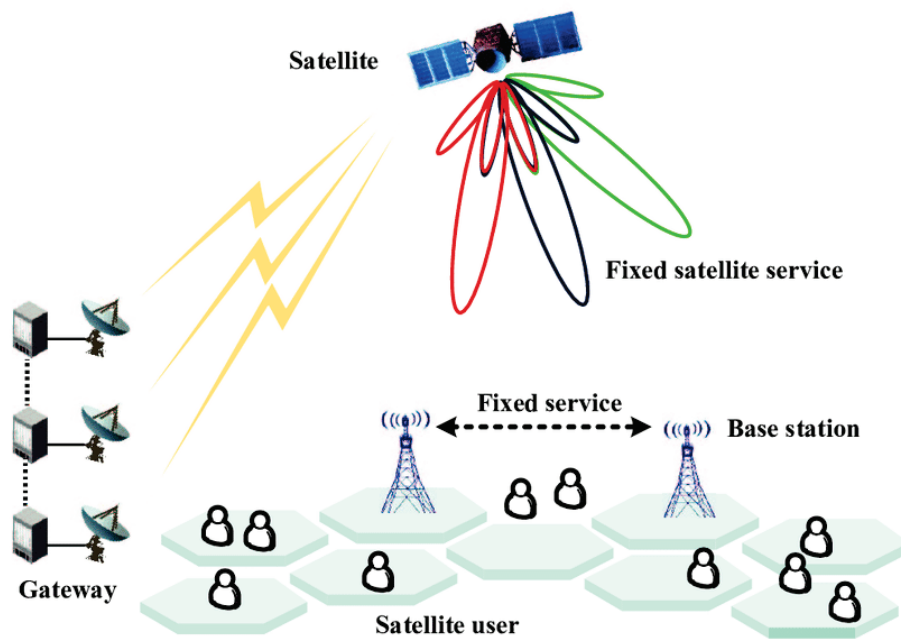


Figura 3. Enlaces presentes en la comunicación satelital [3].

1.1.2 Frecuencia y especificaciones

En este trabajo fin de máster vamos a trabajar en las bandas de frecuencia 17,8 a 20,2 GHz para recepción, y 27,5 a 30 GHz para transmisión. Primero, vamos a justificar el porqué de elegir esas bandas, pertenecientes a la banda Ka.

Aunque la banda Ku (12-18 GHz) es la que ha sido usada a lo largo de los años para comunicaciones satelitales, debido a que tiene un rango de frecuencia que permite alcanzar una alta eficiencia, y a que permite el uso de un equipamiento pequeño, reduciendo la complejidad y costo logístico, además de la instalación de los servicios [4]. Con respecto a otras bandas, como la Ka, tenemos una mejor propagación de la señal, con menos pérdidas, y la degradación debida a la lluvia de la señal es menor [5].

La banda Ka ha demostrado tener algunos problemas. Por un lado, es una banda ya congestionada, pues es donde se lanzan la mayoría de los satélites geoestacionarios. Por otro lado, tiene anchos de banda limitados con respecto a la banda Ka [6].

Las ventajas de usar la banda Ka son las siguientes. Primero, tiene una mayor tasa de datos desde y hacia los terminales, aumentando la calidad del servicio. Además, permite la coordinación de redes de satélites. Hace un uso más eficiente del ancho de banda, pues reutilizan las frecuencias multipunto, mejorando el rendimiento y bajando los costes de transmisión por Mbyte, haciendo uso de *spot beams*, en vez de cubrir un área en una región. A mayor apertura y frecuencia, este *spot beam* es más pequeño, lo que implica una mayor ganancia y una mejor cobertura individual [6].

La elección de los rangos de frecuencia concretos para este tipo de comunicaciones es debida a la regulación de la ITU (*International Telecommunications Union*), la cual permite la coexistencia de órbitas de satélites GSO (*Geostationary Orbit*) con las otras orbitas. Estos rangos se muestran en la Tabla I.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Tabla I. Rangos de frecuencia designados por la ITU [7].

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

Las bandas de frecuencia FSS (*Fixed-Satellite Service*) son donde la ITU asegura, por un lado, la coordinación de las conexiones satelitales, esto es, asegura la protección de los servicios existentes dando un acceso equitativo para todos. Estas medidas son las correspondientes a las normas 9.12 y 9.12A [8].

Por otro lado, son los rangos donde se protegen los satélites geoestacionarios. Los satélites que no lo son no deberían causar interferencias de ningún tipo a estas redes. También tenemos la protección de la EPFF (*Equivalent Power-Flux Density*), que trata de establecer un límite de las emisiones entre todos los satélites no geoestacionarios en cualquiera de las direcciones de las estaciones terrestres de los satélites que sí lo son, teniendo en cuenta la directividad de las antenas de satélites geoestacionarios [8].

En la Tabla II recogemos las constelaciones que ya están en funcionamiento y las frecuencias de operación en las que trabajan.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA
CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Tabla II. Constelaciones LEO en funcionamiento.

CONSTELACIÓN LEO	DOWNLINK (GHz)	UPLINK (GHz)
OneWeb [9]	10,7-12,7	14-14,5
	17,8-18,6	27,5-29,1
	18,8-19,3	29,5-30
SpaceX Starlink [10]	10,7-12,7	14-14,5
	17,8-18,6	27,5-29,1
	18,8-19,3	29,5-30
	37,5-42,5	47,2-52,2
Telesat [9]	17,8-18,6	27,5-29,1
	18,8-19,3	29,5-30
	19,7-20,2	
Leosat [9]	17,8-18,6	27,5-29,1
	18,8-19,3	29,5-30
	19,7-20,2	
Theia [9]	10,7-12,7	12,75-13,25
	17,8-18,6	14-14,5
	18,8-19,3	27,5-30
	19,7-20,2	
Kepler [11]	10,7-12,7	14-14,5
Iridium [12]	19,4-19,6	29,1-29,3

Como podemos ver en la Tabla II, la mayoría de los satélites trabajan en determinadas franjas de la banda Ku y Ka. Estas bandas son precisamente las bandas protegidas por la ITU.

La decisión de tomar las bandas de frecuencia viene motivada por la protección de la banda por parte de la ITU.

1.1.3 Array de antenas en fase

Los *arrays* de antenas en fase o *phased array* son combinaciones de múltiples antenas, normalmente tipo parche (*patch*). Como podemos observar en la Figura 4, las fases relativas de las señales con que se alimenta cada antena se varían con objeto de alterar el diagrama de radiación del conjunto. En el caso del resto de direcciones no elegidas, el vector suma de las ondas radiadas desde todos los elementos de la antena será mucho más débil, en muchos casos incluso puede llegar a desaparecer [13].

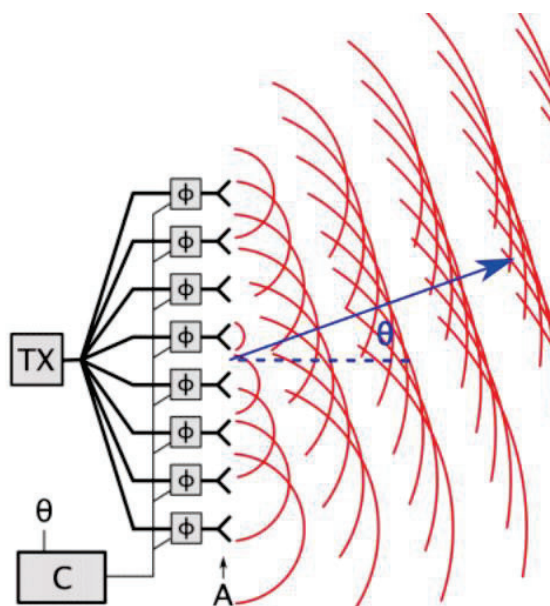


Figura 4. Funcionamiento del array de antenas en fase [14].

Este tipo de antenas son muy interesantes debido a su reducido tamaño, peso, coste y pérdidas de señal, en comparación con las antenas parabólicas, sobre todo en aplicaciones donde el peso y las dimensiones de estas últimas son poco prácticas.

Uno de los problemas de las antenas parabólicas es su estructura poco aerodinámica. Dicho problema se puede solventar utilizando los *arrays* de antena en fase, los cuales son planos [15]. Una aplicación de este tipo de antenas es su utilización en vehículos en movimiento como es el caso de aviones, barcos, tanques, coches, etc. Su uso reduce el consumo de combustible en comparación con el uso de antenas parabólicas debido a su estructura más aerodinámica. En la Figura 5 vemos un ejemplo de una antena plana en un coche.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO



Figura 5. Ejemplo de array de antenas en fase montadas sobre vehículo [16].

El apuntamiento electrónico de los *arrays* de antenas en fase hace que no necesiten ninguna parte mecánica para cambiar la dirección de su haz. Por ejemplo, los móviles con 5G (quinta generación de telefonía móvil) necesitan antenas direccionales que cambien su apuntamiento dinámicamente y que además sean de bajo perfil. Además, deben de ser fabricadas para ajustarse a un teléfono móvil dando tanto buenas propiedades electromagnéticas como un haz de direcciones eficaz [17]. Un ejemplo de esto lo podemos ver en la Figura 6.

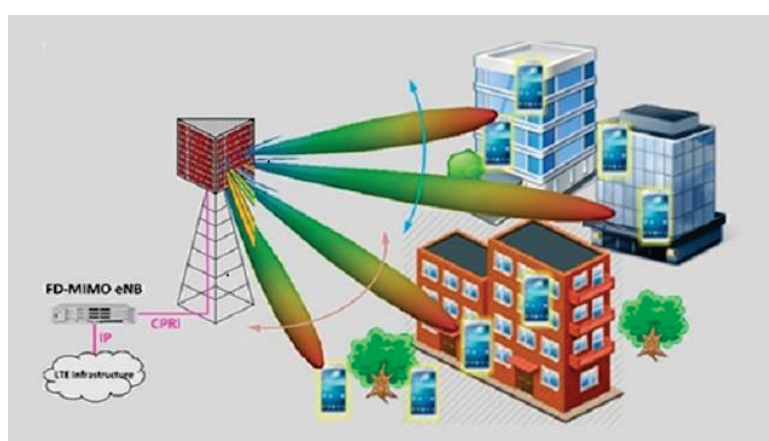


Figura 6. Diagrama de radiación de una antena 5G [18].

Estas antenas en fase que conforman el *array* son las antenas elegidas para la comunicación desde tierra con los satélites de las constelaciones LEO debido a su flexibilidad y capacidad para proporcionar múltiples haces simultáneos.

1.2 Objetivos

En este trabajo de fin de máster se propone investigar la tecnología de los *arrays* de antenas en fase para las bandas de frecuencia 17,8 a 20,2 GHz para recepción, y 27,5 a 30 GHz para transmisión. Dichas frecuencias vienen impuestas por el proyecto de transferencia en el cual se enmarca el TFM. El título de dicho proyecto es “*Desarrollo de los circuitos electrónicos basados en MMICS (Monolithic Microwave Integrated Circuits) a medida para la conformación de haz en sistemas avanzados de radar y comunicaciones*” y está realizado en colaboración con las empresas Celestia S.L. y WIMMIC (Wireless Innovative MMIC). El principal objetivo de dicho proyecto es el desarrollo de un *gateway* para constelaciones de satélites LEO.

Comenzaremos por un análisis más profundo de los *arrays* de antenas en fase, pasando por diseñar y simular las antenas tipo parche pertinentes para obtener diferentes gráficas y diagramas y entender su funcionamiento con mayor detalle. Finalizaremos con la recopilación de la información y los resultados en un documento memoria.

1.3 Peticionario

El solicitante del desarrollo de este trabajo de fin de máster es la división TME (Tecnología Microelectrónica) del Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada, instituto de investigación referente a la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, en la línea referida al diseño de sistemas de RF (*Radio Frequency*).

1.4 Estructura del documento

En este primer capítulo hemos recorrido los antecedentes que dan lugar a la realización de este trabajo, fijando los objetivos que pretendemos alcanzar, los solicitantes de este, y la propia estructura.

En el segundo capítulo realizaremos el estudio teórico de las *patch antenna*, incluyendo sus diferentes parámetros y cálculos.

En el tercer y cuarto capítulo pasaremos al diseño mediante el software. Por un lado, abordaremos el diseño de la propia *patch antenna* en ADS (*Advanced Design System*). Por otro lado, veremos el diseño de un *array* de estas antenas en el software *PathWave System Design (SystemVue)*. Ambos programas pertenecen a la empresa *Keysight Technology*.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Finalmente, en el capítulo cinco daremos nuestras conclusiones del proyecto y hablaremos de las posibles líneas futuras.

Capítulo 2. Parámetros de diseño de un *array* de antenas en fase

2.1 Introducción

Una vez marcados los objetivos de este proyecto, vamos a conceptualizar los parámetros que utilizaremos a lo largo del mismo. Por un lado, veremos el funcionamiento de los *arrays* de antenas en fase con sus parámetros característicos.

Por otro lado, veremos los parámetros básicos de las antenas tipo parche, que son las que usaremos en el *array*.

También daremos una visión de la influencia de elementos radiantes o antenas en las prestaciones del sistema, considerando también el medio de transmisión. Finalizaremos dando unas conclusiones de este capítulo.

2.2 Parámetros de un *array* de antenas en fase

En el Capítulo 1 hemos visto cuál la función de los *arrays* de antenas en fase. En este apartado vamos a profundizar en los conceptos propios de este sistema.

Primero, hemos de saber qué es la elevación y el azimut en el ámbito de las antenas. El término elevación se refiere a la vertical del sistema, mientras que el azimut se refiere a la horizontal [19].

2.2.1 Cálculo de la elevación y el azimut

Los *arrays* de una dimensión son aquellos en los que podemos variar el ángulo de apuntamiento en una única dimensión. En este caso, las características que podremos variar para obtener la fase de las antenas responden a la Ecuación (1) [20]:

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

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Donde:

- λ longitud de onda
- d distancia entre antenas
- θ ángulo de apuntamiento

Para los *arrays* de antenas de dos dimensiones, podremos variar el ángulo de apuntamiento en dos direcciones, el eje X y el eje Y, variando la elevación y el azimut. Entonces, estos valores responden a las Ecuaciones (2) y (3) [20]. En la Figura 7 podemos ver representados estos ángulos.

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

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

Donde:

- λ longitud de onda
- d distancia entre antenas
- θ ángulo de elevación
- ϕ ángulo de azimut

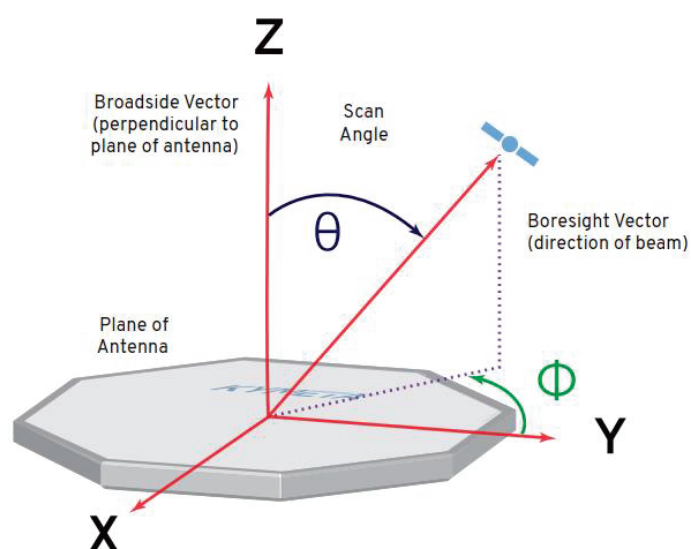


Figura 7. Elevación y azimut [21].

2.2.2 *Beam squint*

Cada estándar transmite en el ancho de banda que se le ha asignado. Los *arrays* de antenas en fase realizan su desfasaje en todas las frecuencias. El *beam squint* cuantifica la diferencia del este entre los extremos del ancho de banda, representa el cambio en la dirección del haz en función de la frecuencia de operación, polarización u orientación, tal y como vemos en la Figura 8. Uno de los retos en el diseño de *array* de antenas en fase es trabajar en anchos de banda grandes, pues queremos que el *beam squint* sea lo más cercano a cero posible.

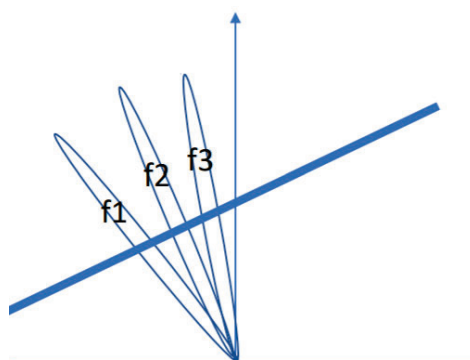


Figura 8. Representación *beam squint*.

2.3 Parámetros básicos de las antenas

Una antena es un dispositivo formado por uno o varios conductores capaz de emitir o recibir ondas electromagnéticas. Una antena transmisora es aquella que convierte voltajes en ondas electromagnéticas, y una antena receptora es la que realiza la función inversa [22]. Vamos a recorrer algunos de los parámetros que las definen.

2.3.1 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación en función de coordenadas espaciales [23].

Este diagrama es definido en términos de región de campo lejano, es decir, a una distancia de la antena superior a dos veces la dimensión de la antena al cuadrado entre la longitud de onda [24].

La representación es tridimensional, como vemos en la Figura 9, aunque también se puede representar con cortes en dos dimensiones, utilizando o coordenadas cartesianas, representando la variable angular en el eje de abscisas, y la magnitud en

el eje de coordenadas; o utilizando coordenadas polares, representando la forma de radiación en el espacio [24].

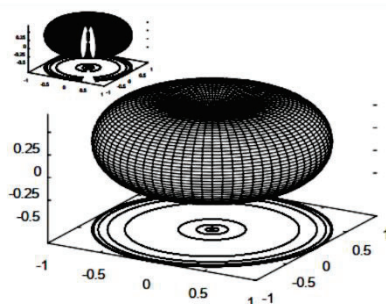


Figura 9. Diagrama de radiación de un dipolo de media onda [24].

En la Figura 10 tenemos los cortes para este dipolo, tanto en coordenadas cartesianas, correspondiente a la gráfica superior, como en coordenadas polares, correspondiente a la gráfica inferior, y sus correspondencias [24].

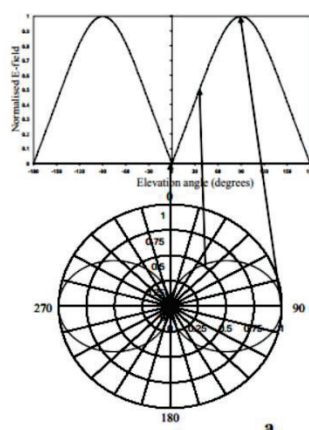


Figura 10. Cortes para dipolo de media onda [24].

2.3.2 Directividad

La función de directividad es la potencia radiada por una antena en una determinada dirección (θ , ϕ) en comparación a la potencia radiada en esa misma dirección por un radiador isotrópico, que es aquel que, como ya hemos visto, radia en todas las direcciones por igual [24], tal y como mostramos en la Figura 11.

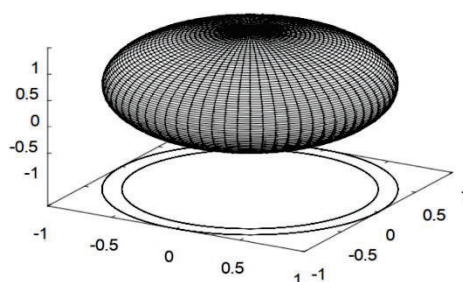


Figura 11. Radiador isotrópico [24].

En la Ecuación (4) representamos el valor máximo de la directividad [24].

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

Donde $P(\vartheta, \varphi)$ es la potencia radiada por la antena en la dirección (θ, φ) , y P_T es la potencia en una dirección determinada por un radiador isotrópico.

Entonces, este valor representa la potencia en una dirección determinada.

2.3.3 Ganancia

Definimos la función de ganancia como el ratio de la intensidad de radiación U en una dirección dada desde la antena hacia el total de potencia de entrada P_{in} por la antena, todo dividido por 4π [25], como vemos en la Ecuación (5).

$$G = \frac{4\pi U}{P_{in}} \quad (5)$$

Otra forma en la que podemos ver la ganancia de un elemento radiante es como mostramos en la Ecuación (6), en función del patrón de radiación S_e y la impedancia característica del espacio libre η [24].

$$G = \frac{4\pi U}{\eta} \quad (6)$$

2.3.4 Eficiencia

Dada una antena con un plano determinado de apertura, la eficiencia es el ratio entre el área máxima efectiva y el área de apertura [23]. Si operamos con las ecuaciones de la directividad y la ganancia, obtenemos la Ecuación (7).

$$\xi = \frac{G}{D} \quad (7)$$

2.3.5 Polarización

El campo eléctrico en la región de campo lejano genera dos componentes de coordenadas esféricas E_θ y E_φ [25], tal y como vemos en la Figura 12.

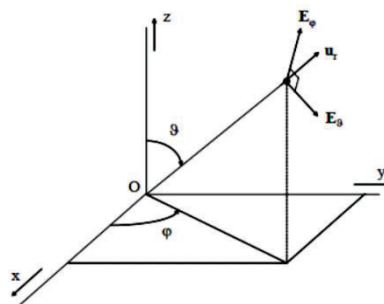


Figura 12. Componentes de coordenadas esféricas E_θ y E_φ .

En general, se va a generar una diferencia de fases entre estos dos componentes, lo cual determinará la clasificación de polarización de las antenas, que representamos en la Figura 13 [25]:

- Polarización elíptica. Describe una elipse en el plano (θ, ϕ) .
- Polarización circular. La diferencia de fase es $\pm 90^\circ$, y los componentes son iguales en amplitud.
- Polarización lineal. La diferencia de fase es 0° o 180° .



Figura 13. Tipos de polarización [26].

2.3.6 Ancho de banda

El ancho de banda es el rango de frecuencias donde la antena puede operar de manera adecuada. Si 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 como la Ecuación (8) [25].

$$BW = 100 \frac{F_H - F_L}{F_C} \quad (8)$$

2.3.7 VSWR

El VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*) o coeficiente de onda estacionaria es el ratio entre el valor máximo y mínimo de voltaje de la antena [25], como representamos en la Ecuación (9).

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} \quad (9)$$

2.3.8 Parámetros S

Los parámetros S describen la respuesta de una red de N puertos para señal o señales incidentes hacia cualquiera de los otros puertos. El primer número corresponde al puerto de respuesta, mientras que el segundo corresponde al puerto de incidencia [27].

Supongamos una red de dos puertos como la de la Figura 14. La variable a_i representa una onda incidente en el puerto i , mientras que la variable b_j representa una onda reflejada desde el puerto j . Para conocer la magnitud de estas variables, necesitamos conocer la impedancia de referencia Z_0 [27].

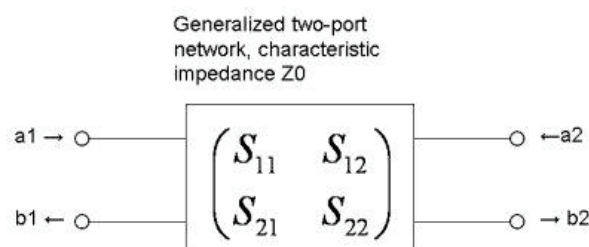


Figura 14. Red de dos puertos [27].

En concreto, los valores de estos parámetros se pueden definir como [28]:

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

2.3.9 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} [25].

2.3.10 Área efectiva

En una antena receptora, es la superficie útil de la antena para recibir onda incidente. Suponiendo S como la densidad de potencia en la posición de la antena, y P_T la potencia disponible en los terminales de la antena, definimos el área máxima equivalente en la Ecuación (10) [24].

$$A_{em} = \frac{S}{P_T} \quad (10)$$

El área efectiva es, estrictamente hablando, una cantidad dependiente de la dirección. En el caso de no especificarla, como en la Ecuación (10), asumimos la dirección para la máxima directividad [24].

2.3.11 Vector longitud efectiva

El vector longitud efectiva es usado para determinar el voltaje en circuito abierto inducido en los terminales de la antena cuando una onda plana incide en ella. Cuando la polarización de la onda y la antena están alineadas, la longitud efectiva de una

antena dipolo corta es idéntica a su longitud física. En general, la longitud efectiva es una cantidad dependiente de la longitud, tal y como vemos en la Ecuación (11) [24].

$$l_e(\vartheta, \varphi) = l_\vartheta(\vartheta, \varphi)u_\vartheta + l_\varphi(\vartheta, \varphi)u_\varphi \quad (11)$$

El voltaje en circuito abierto de una antena se obtiene entonces proyectando el vector campo eléctrico incidente en el complejo conjugado del vector longitud efectiva, como mostramos en la Ecuación (12) [24].

$$V_{oc} = E_i l_e^* \quad (12)$$

El complejo conjugado se utiliza con fines correctores, ya que este vector se asocia con el caso de transmisión, mientras que el voltaje en circuito abierto se obtiene en el caso de recepción [24].

2.3.12 EIRP

El EIRP (*Effective Isotropic Radiation Power*) se define como la potencia teórica que debe ser radiada por una antena isotrópica para obtener la misma cantidad de potencia observada en la dirección de la máxima ganancia de una antena [29].

Esta medida responde a la Ecuación (13), donde G_T es la ganancia de la antena transmisora, y P_T es la potencia total transmitida.

$$EIRP = G_T P_T \quad (13)$$

2.3.13 Sensibilidad

En el modo de recepción, la potencia recibida por elemento radiante o sensibilidad en el puerto del chip se calcula utilizando la Ecuación (14)

$$P_{EL} = EIRP + 10 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 - L_{TM} + G_e \quad (14)$$

Donde R es la distancia entre el satélite y el *gateway*, λ es la longitud de onda, L_{TM} son las pérdidas debidas al medio de transmisión y G_{EL} es la ganancia de cada elemento radiante.

2.3.14 G/T

La G/T (*gain-to-noise-temperature*) de una antena es la figura de mérito en la caracterización del comportamiento de esta, donde G es la ganancia de la antena en dB, y T es la temperatura de ruido equivalente del sistema en Kelvin. Consideramos como sistema de recepción la suma de la antena de recepción y los dispositivos que intervienen en ella como los LNA (*Low Noise Amplifier*) [30].

2.4 Influencia de elementos radiantes en las prestaciones

Como ya hemos mencionado, en un *array* de antenas en fase tenemos múltiples antenas. Suponiendo este número de antenas como N , influye en dos parámetros: la directividad y la ganancia, en ambos la relación sigue una gráfica logarítmica [22].

En el caso de la ganancia como sistema, responderá a la Ecuación (15)

$$\text{Array antenna gain} = 10 \log(N) + G_e + 10 \log(1 - |\Gamma|^2) \text{ (dB)} \quad (15)$$

Donde G_e es la ganancia de un elemento individual, y Γ es el coeficiente de onda estacionaria.

Hemos realizado sobre un ejemplo del SystemVue diferentes simulaciones para diferente número de elementos, confirmando la relación logarítmica mediante su representación en una curva. Los datos obtenidos los mostramos en la Tabla III

Tabla III. Relación elementos radiantes, directividad y ganancia.

Elementos Radiantes	Directividad	Ganancia
100	44,7	44,7
75	42,2	42,2
50	38,2	38,2
25	32,8	32,8
10	25,1	25,1
5	19,6	19,6
1	10,5	10,5

Representamos las curvas obtenidas en la Figura 15, confirmando así la teoría de la relación logarítmica

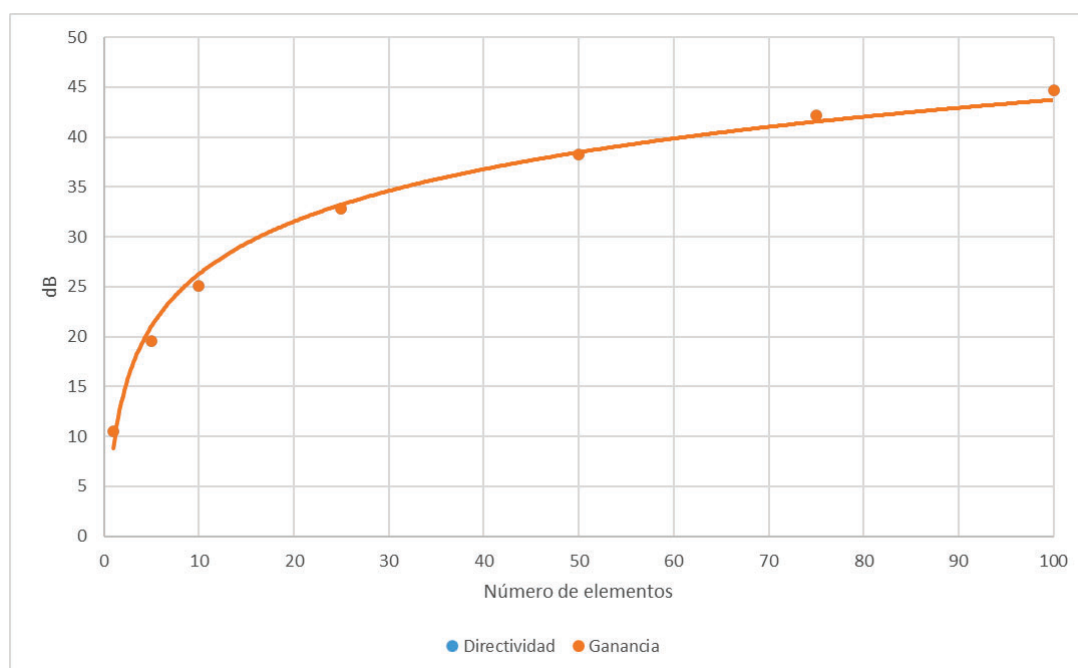


Figura 15. Relación logarítmica elementos radiantes, ganancia y directividad.

Otra forma en la que podemos relacionar la ganancia del *array*, y por lo tanto el número de elementos radiantes, es mediante la relación entre el EIRP y la potencia de entrada P_{in} , tal y como vemos en la Ecuación (16) [32].

$$\text{Array antenna gain} = \frac{EIRP}{P_{in}} \quad (16)$$

2.5 Influencia del medio de transmisión

Las pérdidas experimentadas por la señal mientras se propaga a través del espacio entre el satélite y la tierra son significativas para el cálculo del enlace de *downlink* [21]. Vamos a explicarlas en este apartado.

2.5.1 Pérdidas debidas al espacio libre

Las pérdidas debidas al espacio libre, o FSPL (*Free-Space Path Loss*) son las pérdidas debidas a la propagación de las ondas electromagnéticas. Esto incluye dos efectos [21]:

- La disminución de densidad de potencia mientras la señal se propaga a través del espacio en todas las direcciones [21].
- La eficiencia de la antena recibiendo potencia de una señal electromagnética [21].

Para poder contabilizar el primer efecto, tomaremos la fórmula de la densidad de potencia de una antena isotrópica S , tal y como vemos en la Ecuación (17).

$$S = \frac{P}{4\pi d^2} \quad (17)$$

Donde P es la potencia transmitida en vatios y d es la distancia en metros entre las dos antenas.

El segundo efecto, que se debe a la eficiencia de la antena de recepción, lo representamos en la Ecuación (18).

$$P_r = \frac{S\lambda^2}{4\pi} \quad (18)$$

Donde P_r es la potencia recibida.

Combinando las dos expresiones, obtenemos la Ecuación (19):

$$FSPL = \frac{P_r}{P_t} = \frac{(4\pi df)^2}{c^2} \quad (19)$$

Donde f es la frecuencia de la señal y c es la constante de la velocidad de la luz.

Si convertimos esta ecuación en escala logarítmica, que será en la que trabajemos, obtenemos finalmente la Ecuación (20).

$$FSPL = 20 \log d + 20 \log f - 20 \log \frac{4\pi}{c} \quad (20)$$

2.5.2 Pérdidas debidas a la atmósfera

Mientras la señal atraviesa la atmósfera, las moléculas que conforman el aire absorben energía en función de la frecuencia de transmisión [21], tal y como mostramos en la Figura 16. La atenuación se mide en función de la distancia existente entre el satélite y la Tierra.

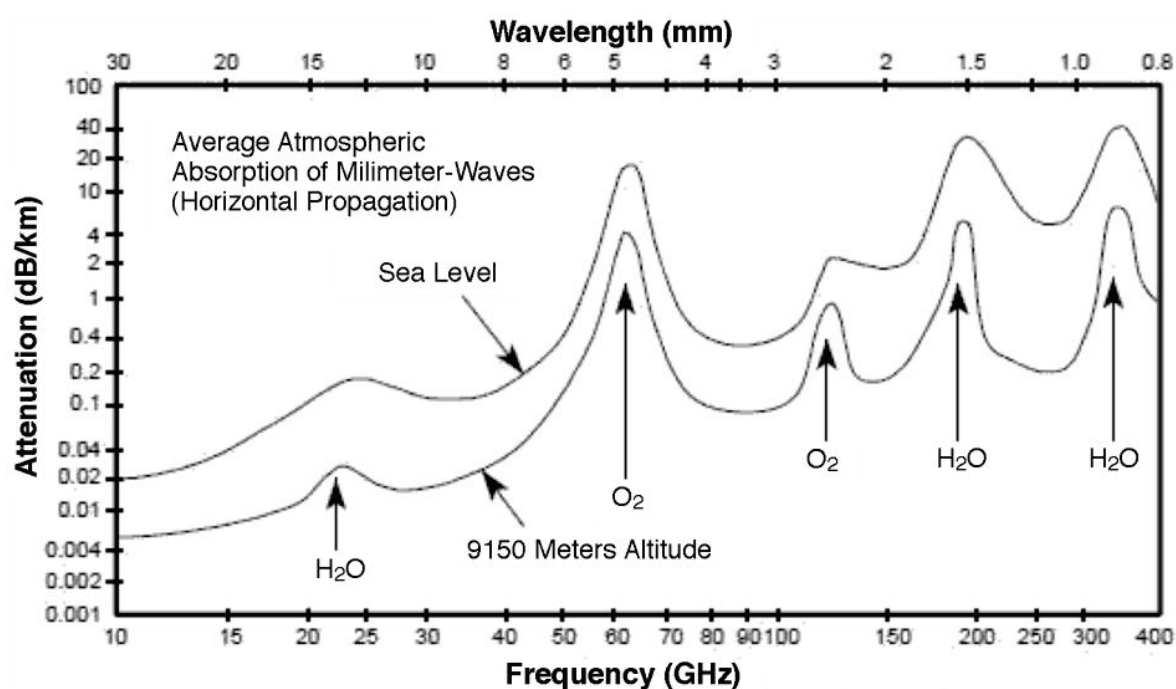


Figura 16. Absorción atmosférica de la energía de ondas milimétricas [21].

2.5.3 Pérdidas debidas al esfumado de lluvia

Cuando una señal viaja a través de las nubes, se verá atenuada por la alta concentración de vapor de agua. Esto es el esfumado de lluvia. La tasa de atenuación variará dependiendo de factores que incluyen la altura de las nubes y la densidad de estas, la tasa de lluvia, la polarización, la frecuencia y la localización en la Tierra [21].

En la Figura 17 mostramos un modelo que define diferentes regiones de la Tierra, describiendo la tasa estimada de lluvia en mm/h para las diferentes zonas climáticas del mundo [21].

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

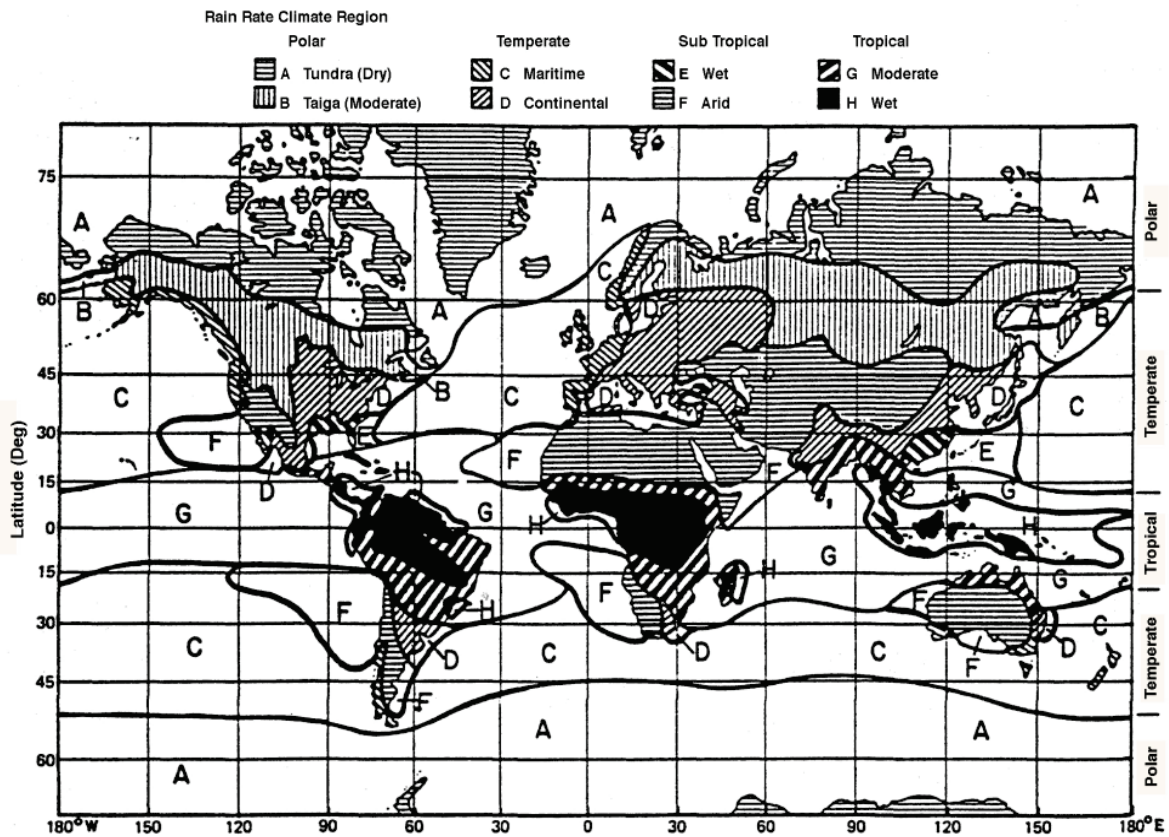


Figura 17. Regiones climáticas de lluvia [21].

A cada zona se le asigna un coeficiente R, que ayuda al cálculo de las pérdidas en cada región. Además, tenemos dos coeficientes extra (k y a) que varían en función de la polarización de la señal, de la temperatura de la lluvia y de la frecuencia [21] [33]. Estos coeficientes responden a un modelo definido por la ITU. En la Tabla IV representamos estos valores, siendo V y H sufijos referidos a la polarización, vertical y horizontal respectivamente [33], mientras que en la Figura 18 vemos esos valores representados de manera gráfica.

En base a los valores de la tabla, si quisiéramos estimar el valor para otra frecuencia, haremos uso de las Ecuaciones (21) y (22) [33].

$$k = \frac{k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau}{2} \quad (21)$$

$$k = \frac{k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2\tau}{2} \quad (22)$$

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Donde θ es el ángulo de elevación de la trayectoria y τ es el ángulo de polarización.

Tabla IV. Coeficientes para estimar la atenuación de la lluvia [33].

Frecuencia (GHz)	K_H	K_V	A_H	A_V
4	0,00065	0,000591	1,121	1,075
6	0,00175	0,00155	1,308	1,265
8	0,00454	0,00395	1,327	1,31
10	0,0101	0,00887	1,276	1,264
12	0,0188	0,0168	1,217	1,2
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
30	0,0187	0,167	1,021	1
40	0,35	0,31	0,939	0,929
50	0,536	0,479	0,873	0,868

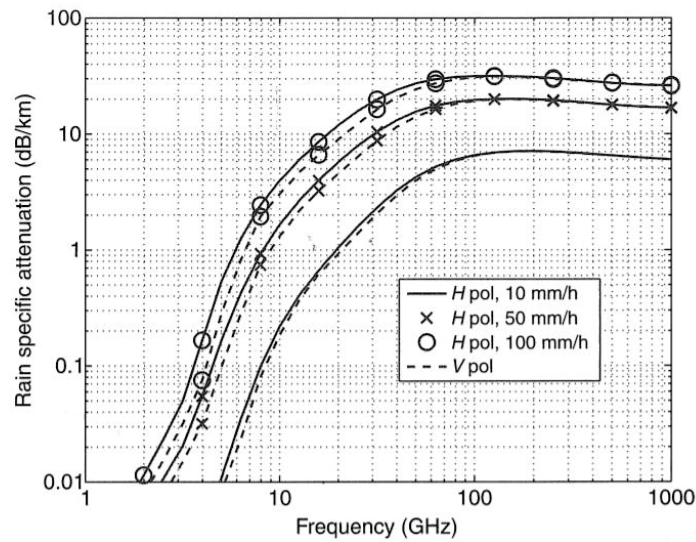


Figura 18. Atenuación de la lluvia en función de polarización y frecuencia [33].

Este fenómeno responde a la Ecuación (23) [21].

$$Loss = kR^aD \quad (23)$$

Donde R , a y k son los coeficientes que hemos descrito en este apartado, y D es la longitud de la trayectoria a través de la Troposfera. El cálculo de esta responde a la Ecuación (24) [21].

$$D = \frac{\textit{altura de la lluvia}}{\textit{seno(elevación)}} \quad (24)$$

2.6 Conclusiones

En este capítulo hemos hecho un recorrido por los diferentes parámetros que hemos de conocer para trabajar con los *arrays* de antenas en fase. Hemos visto los parámetros propios que hemos de analizar en una antena, y así poder definir unas especificaciones.

También hemos visto la influencia del número de elementos radiantes del *array*. A mayor número de antenas, tendremos una mayor ganancia y directividad, pero también tendremos un mayor número de lóbulos secundarios.

Otro aspecto que considerar es el medio de transmisión. Hemos visto las diferentes pérdidas debidas al medio, como la atmósfera o el vapor de agua presente en ella.

Una vez vistos estos parámetros, vamos a diseñar las antenas tipo parche que conformarán nuestro *array* de antenas en fase.

Capítulo 3. Array de antenas para la transmisión

3.1 Introducción

Una vez hemos visto los diferentes parámetros para tener en cuenta, hemos diseñado la antena de transmisión, utilizando el software Pathwave ADS, la cual será la que conformará nuestro *array*. En la Figura 19 vemos el diagrama que seguirá el *array* de transmisión, en la que el *gateway* o *hub* se comunica con el satélite.

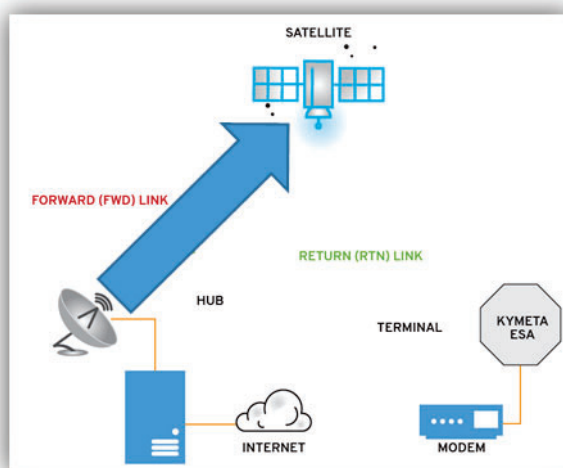


Figura 19. Diagrama de transmisión.

Ya diseñada la antena tipo parche, hemos realizado los *arrays* de transmisión con esas antenas. Primero, hemos probado dos *arrays* de 2x2 y de 4x4 en ADS para comprobar el funcionamiento de la antena tipo parche.

Posteriormente, hemos pasado a SystemVue, entorno de *Keysight* de modelado multidominio que nos permite acelerar el diseño, verificación y test de sistemas de radiofrecuencia. En él hemos trabajado con un mayor número de antenas, ya que ADS nos limita el uso de muchas antenas, ya que no está optimizado para ello.

Una vez finalizados los modelos de SystemVue, hemos procedido al diseño de la antena de recepción.

3.2 Definición del sustrato

Tanto para transmisión como recepción, hemos definido un sustrato de cuatro capas, cambiando únicamente los materiales del dieléctrico, pues las frecuencias en las que trabajamos en transmisión y recepción no son las mismas, por lo que los materiales serán diferentes, cada uno más adecuado a la frecuencia de trabajo. Además, la antena de recepción ha de tener un mayor tamaño, por lo que buscaremos unas constantes dieléctricas más bajas para el núcleo.

Ambas antenas usarán el mismo esquema de funcionamiento a nivel de sustrato, mostrado en la Figura 20. En él, aparte de los dieléctricos, vemos las vías que atraviesan los materiales, y que realizarán las conexiones.

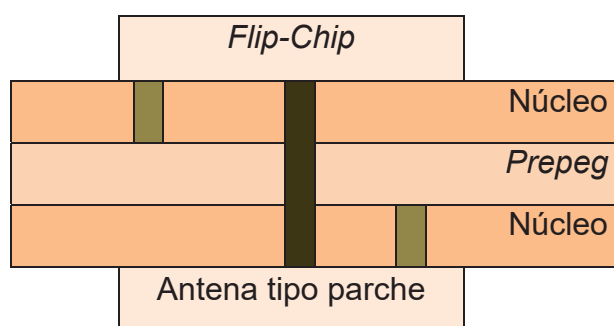


Figura 20. Definición del sustrato.

En el caso de la transmisión hemos usado como núcleo el material basado en fibra de vidrio Taconic TLX-8, ideal para uso en dispositivos de transmisión de microondas y componentes de radiofrecuencia entre otros [34].

Para el prepeg, o material preimpregnado, hemos utilizado del mismo fabricante el material TPG-32.

Los grosores y constantes dieléctricas de los materiales utilizados, y la disposición de estos los mostramos en la Figura 21. Hemos agregado también 3 vías. La vía *hole* conecta los metales superior e inferior, pues como ya hemos visto, en un lado irá el chip que alimentará nuestra antena, y en el otro lado colocaremos la antena tipo parche. Las vías *pcvia1* y *pcvia2* conectan estos metales con los metales intermedios, que serán las tierras de nuestro sustrato.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

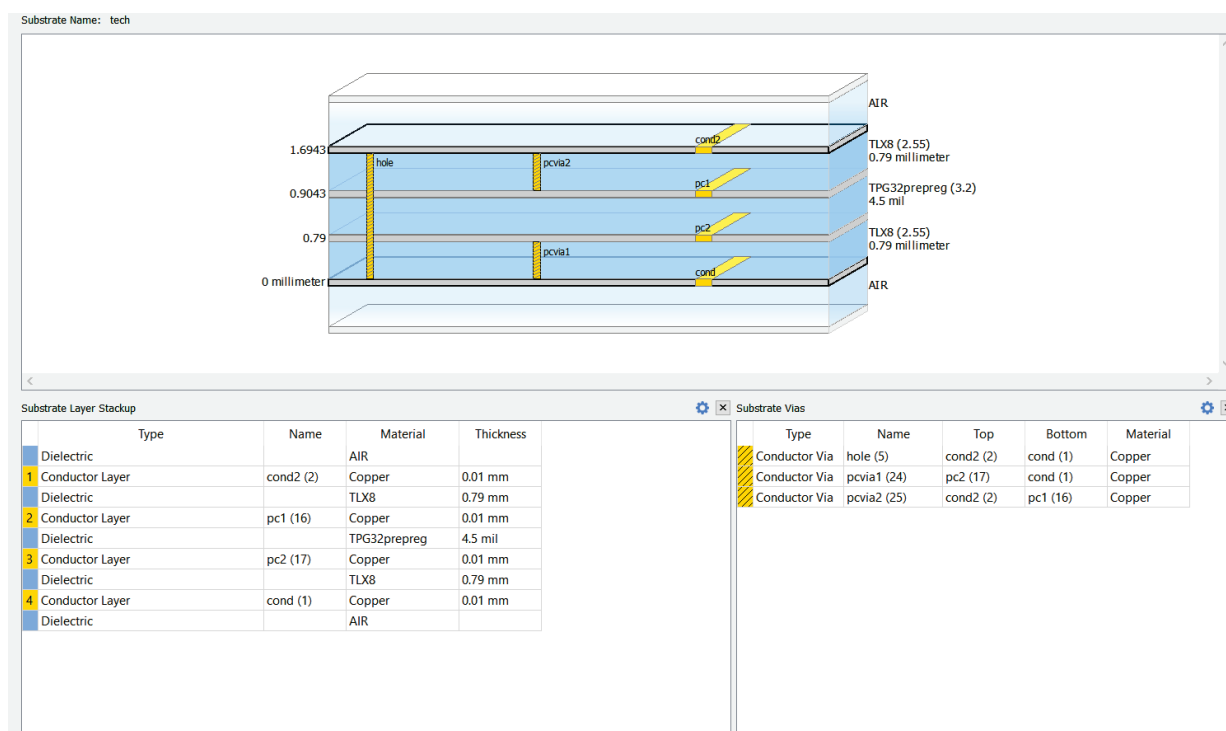


Figura 21. Sustrato de transmisión.

3.3 Diseño en ADS

En el caso del diseño de las antenas tipo parche, utilizaremos las mismas ecuaciones para el cálculo de la antena, variando la frecuencia en la que queramos trabajar.

Por un lado, las dimensiones de la antena se calculan de la siguiente manera [35]:

Para el ancho de la antena, utilizamos la Ecuación (25).

$$w = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (25)$$

Donde c corresponde con la constante de la velocidad de la luz, f es la frecuencia a la que vamos a trabajar y ϵ_r es la constante dieléctrica del material.

Para la longitud de la antena utilizaremos las Ecuaciones (26), (27), (28) y (29).

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA
CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (26)$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (27)$$

$$\Delta L = 0,412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0,3)\left(\frac{w}{h} + 0,264\right)}{(\epsilon_{eff} - 0,258)\left(\frac{w}{h} + 0,8\right)} \quad (28)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (29)$$

Donde w es el ancho de la antena, L es la longitud, f es la frecuencia de operación, c es la constante de la velocidad de la luz, ϵ_r es la constante dieléctrica del material, L_{eff} es la longitud efectiva, ΔL es la extensión de la longitud, h es el grosor del sustrato y ϵ_{eff} es la constante dieléctrica efectiva del material.

Para alimentar el parche utilizaremos una vía de 250 μm de grosor. La ubicación del punto de alimentación no se ha realizado de manera arbitraria. En una antena tipo parche, la impedancia se distribuye tal y como vemos en la : en el centro, tendremos una impedancia que se aproxima a cero, mientras que en los laterales esta es infinita, por lo que para el mayor s_{11} posible debemos buscar la impedancia adaptada [36], en este caso 50 Ω .

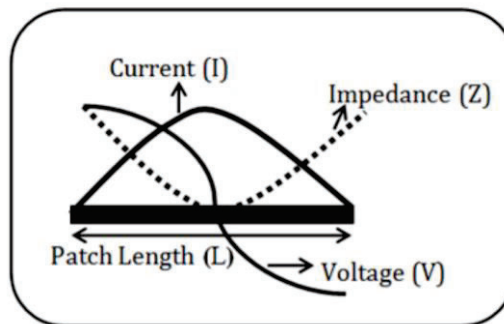


Figura 22. Distribución de la impedancia en una antena tipo parche [36].

Podemos calcular este punto siguiendo las Ecuaciones (30) y (31) [35]:

$$X_f = \frac{L}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (30)$$

$$Y_f = \frac{w}{2} \quad (31)$$

Donde X_f e Y_f son los puntos donde vamos a alimentar con un puerto de entrada, L es la longitud del parche, w su ancho y ϵ_{eff} es la constante dieléctrica efectiva del material.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Finalmente, necesitamos un plano de tierra en el metal correspondiente para finalizar el diseño de la antena. Un ejemplo final del diseño de la antena lo podemos ver en la Figura 23.

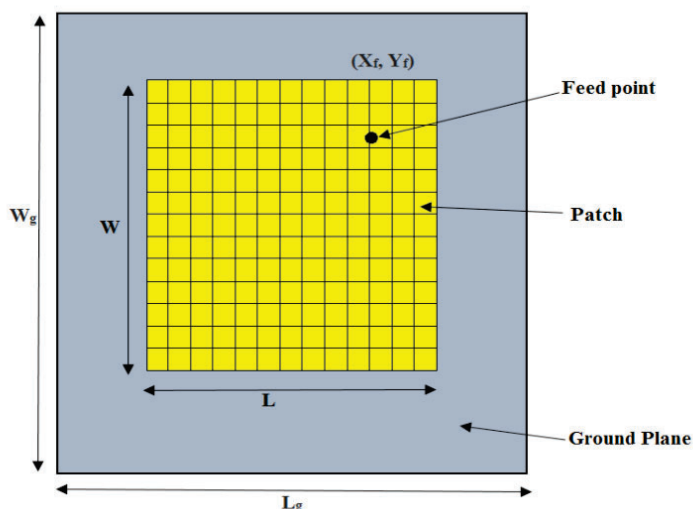


Figura 23. Diseño final antena tipo parche.

Aplicando los cálculos correspondientes, hemos obtenido los datos para dimensionar la antena de transmisión, reflejados en la Tabla V.

Tabla V. Dimensiones antena de transmisión.

Dimensiones (mm)		Datos		
W	3,9	c	3000000000	(m/s)
L	2,5			
L_{eff}	3,3	f	28,75	(GHz)
ΔL	0,4			
X_{feed}	1,6	ε_r	2,55	
Y_{feed}	2,0			
h	0,8	ε_{eff}	2,55	
λ	10,4			

Como vamos a trabajar entre 27,5 GHz y 30 GHz, tomamos como frecuencia de funcionamiento el valor intermedio, en este caso 28,75 GHz.

Una vez tenemos los valores y el sustrato definido, hemos definido nuestra antena en un *layout* de ADS, tal y como mostramos en la Figura 24.

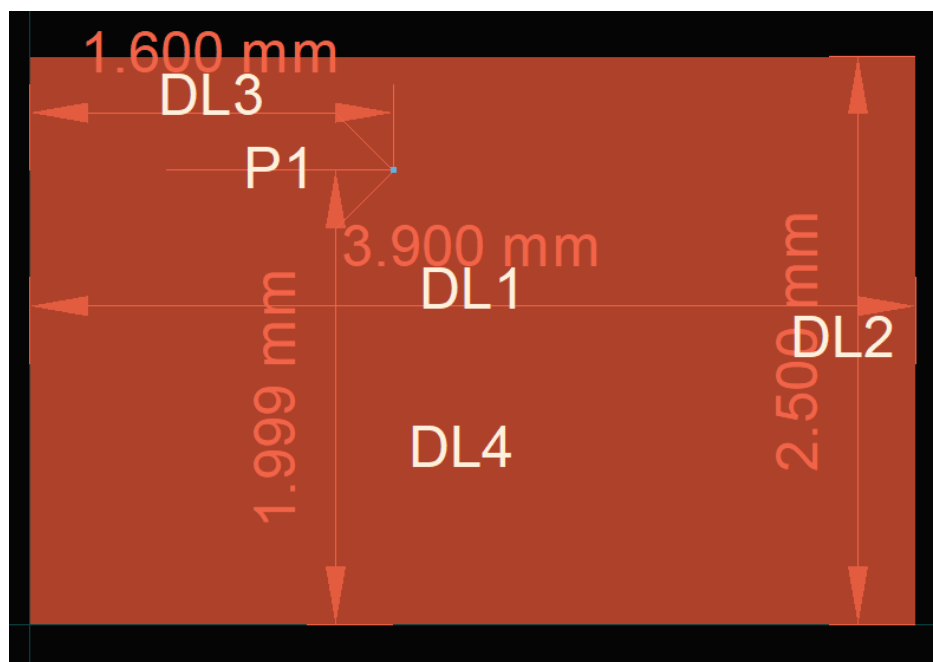


Figura 24. Antena tipo parche de transmisión.

Una vez realizadas las simulaciones electromagnéticas, y ajustadas las dimensiones de la antena, hemos obtenido los resultados para el coeficiente de reflexión a la entrada o parámetro S_{11} de la Figura 25.

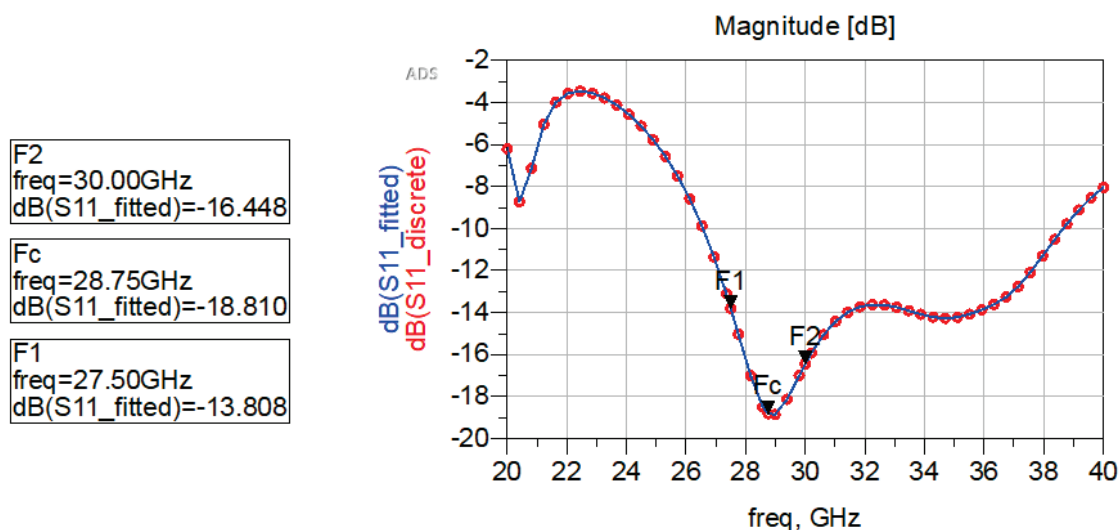
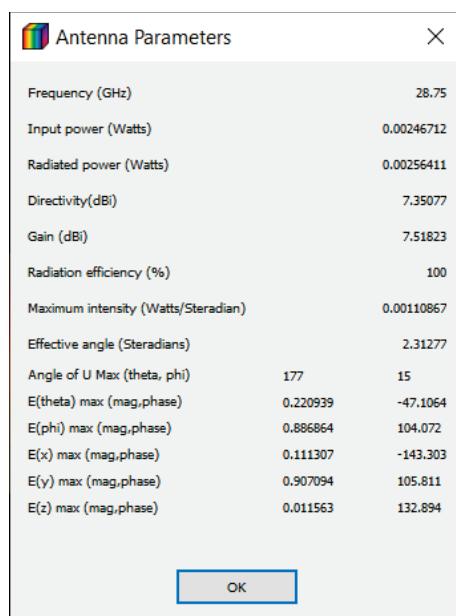


Figura 25. Coeficiente de reflexión a la entrada de la antena de transmisión.

En la gráfica de magnitud podemos ver que la frecuencia está centrada a la frecuencia 28,75 GHz, tal y como definimos. El límite para un buen coeficiente de reflexión a la entrada se establece en -10 dB, por lo que cumplimos con el ancho de banda establecido, de entre 27,5 GHz y 30 GHz.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Ya comprobado el coeficiente de reflexión, hemos obtenido los parámetros de la antena con una simulación de campo lejano, mostrados en la Figura 26.



Antenna Parameters	
Frequency (GHz)	28.75
Input power (Watts)	0.00246712
Radiated power (Watts)	0.00256411
Directivity(dBi)	7.35077
Gain (dBi)	7.51823
Radiation efficiency (%)	100
Maximum intensity (Watts/Steradian)	0.00110867
Effective angle (Steradians)	2.31277
Angle of U Max (theta, phi)	177 15
E(theta) max (mag,phase)	0.220939 -47.1064
E(phi) max (mag,phase)	0.886864 104.072
E(x) max (mag,phase)	0.111307 -143.303
E(y) max (mag,phase)	0.907094 105.811
E(z) max (mag,phase)	0.011563 132.894

Figura 26. Parámetros de la antena de transmisión.

De la misma simulación hemos realizado un corte al diagrama de radiación de la antena, representado en la Figura 27, pudiendo ver en dos dimensiones los diferentes parámetros de la antena que definimos en el Capítulo 2. Los resultados los vemos en la Figura 28.

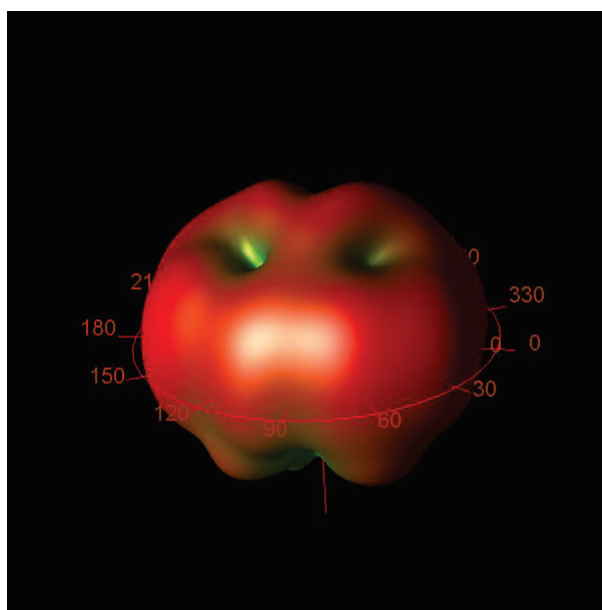


Figura 27. Diagrama de radiación antena de transmisión.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

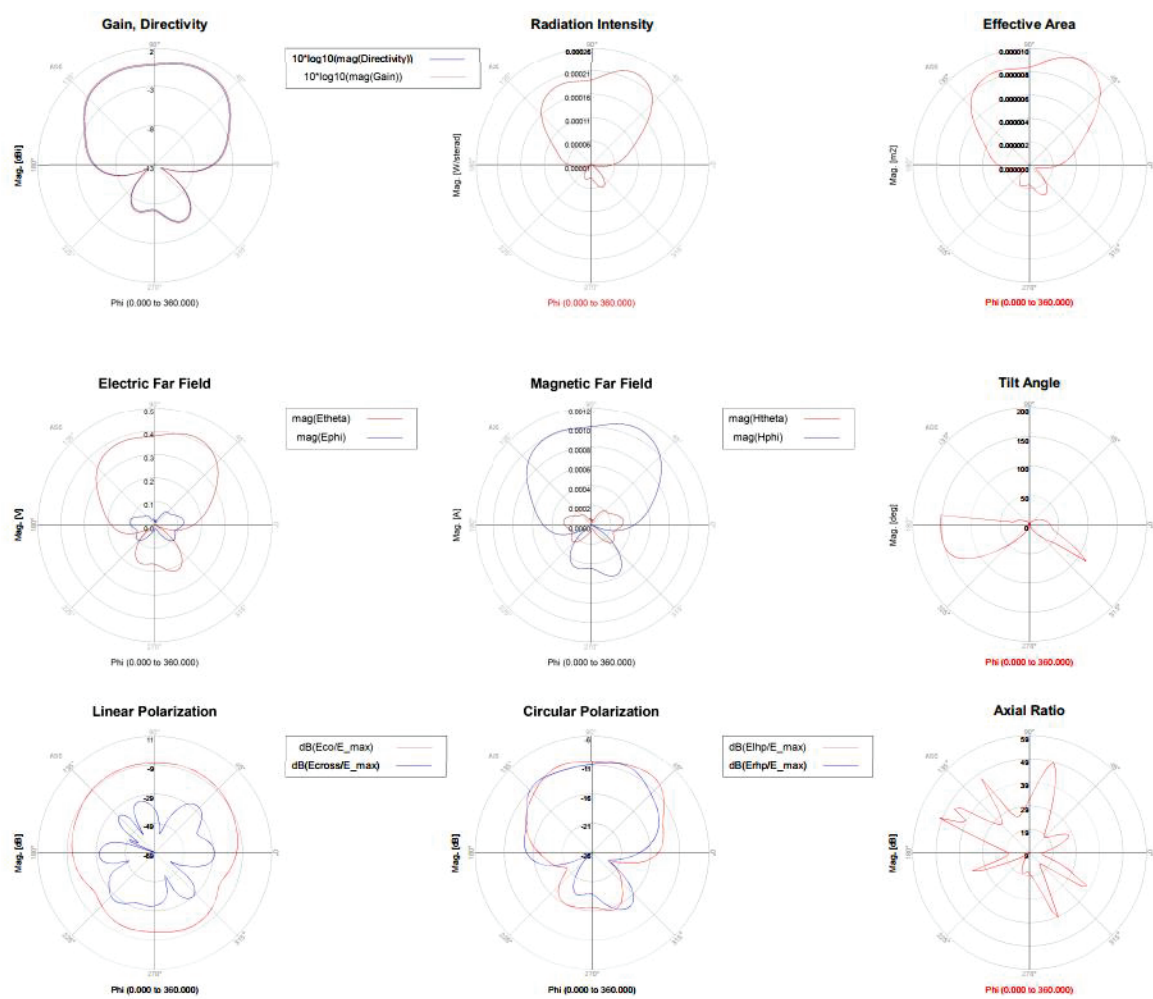


Figura 28. Corte diagrama de radiación antena de transmisión.

Ya vistos los resultados y verificado el funcionamiento de la antena, pasamos a diseñar un *array* de antenas.

3.4 Modelado *array* de antenas

Para poder trabajar con los datos de nuestra antena de ADS, hemos seguido el flujo de trabajo de la Figura 29.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

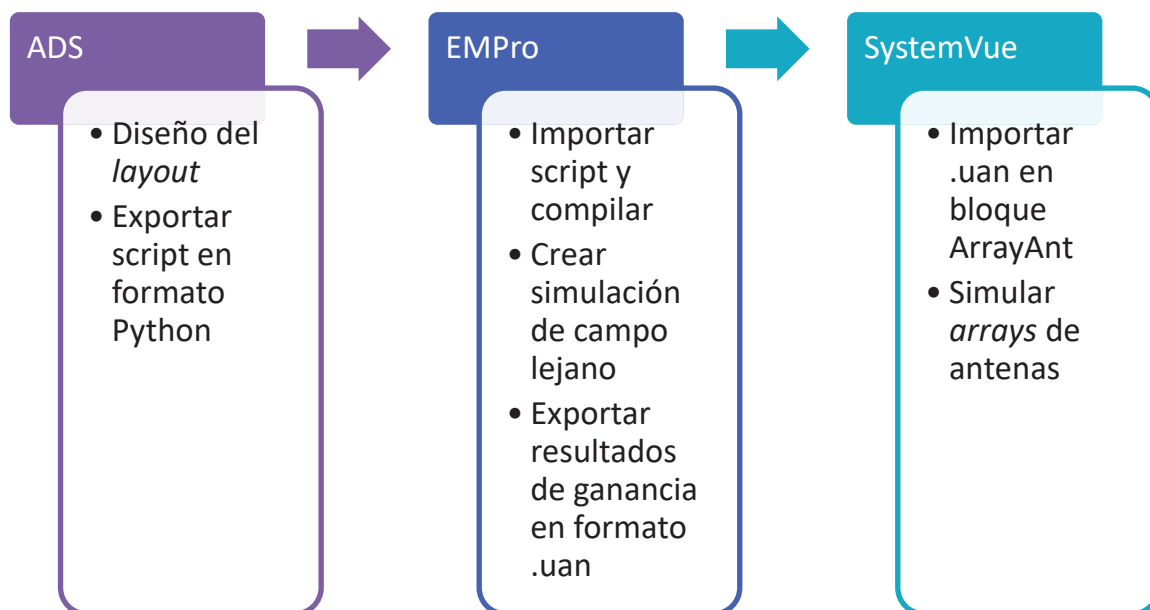


Figura 29. Flujo del trabajo para diseño de array de antenas.

Para diseñar un *array*, primero hemos establecido la separación que ha de haber entre cada parche. Esta distancia se mide en función de la longitud de onda λ del circuito. En el caso del *array* de transmisión, hemos realizado algunas pruebas, determinando que la separación óptima es de $0,55\lambda$.

Hemos realizado dos *arrays* en ADS, uno de 2x2 y otro de 4x4, con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de este. En la Figura 30 mostramos la configuración del primero de los *arrays*. De igual manera, en la Figura 31, vemos la configuración del segundo.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

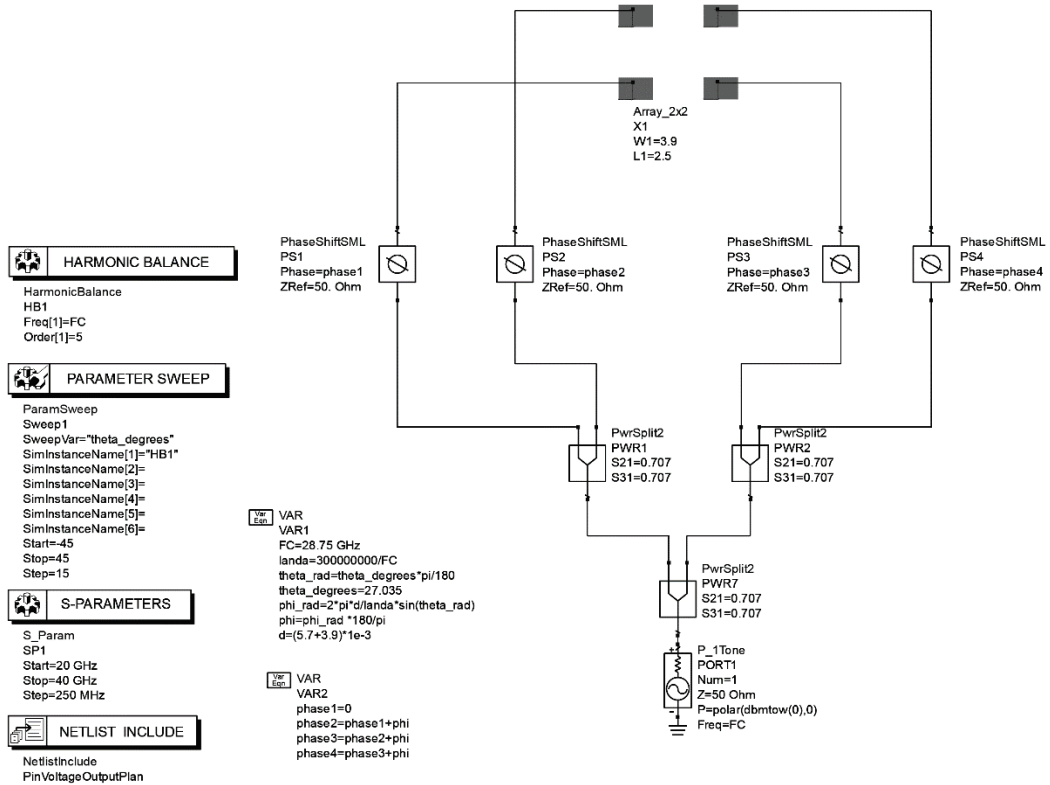


Figura 30. Esquema array 2x2 en ADS.

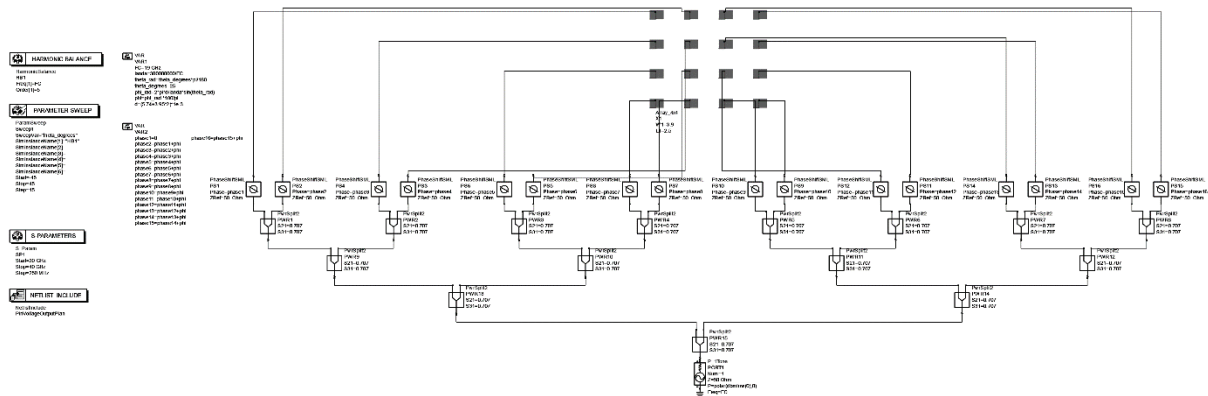


Figura 31. Esquema array 4x4 en ADS.

De igual manera, en la Figura 32 y Figura 33 tenemos las vistas en tres dimensiones de los *arrays*, con la alimentación por la parte inferior, y colocados superficialmente sobre el metal.

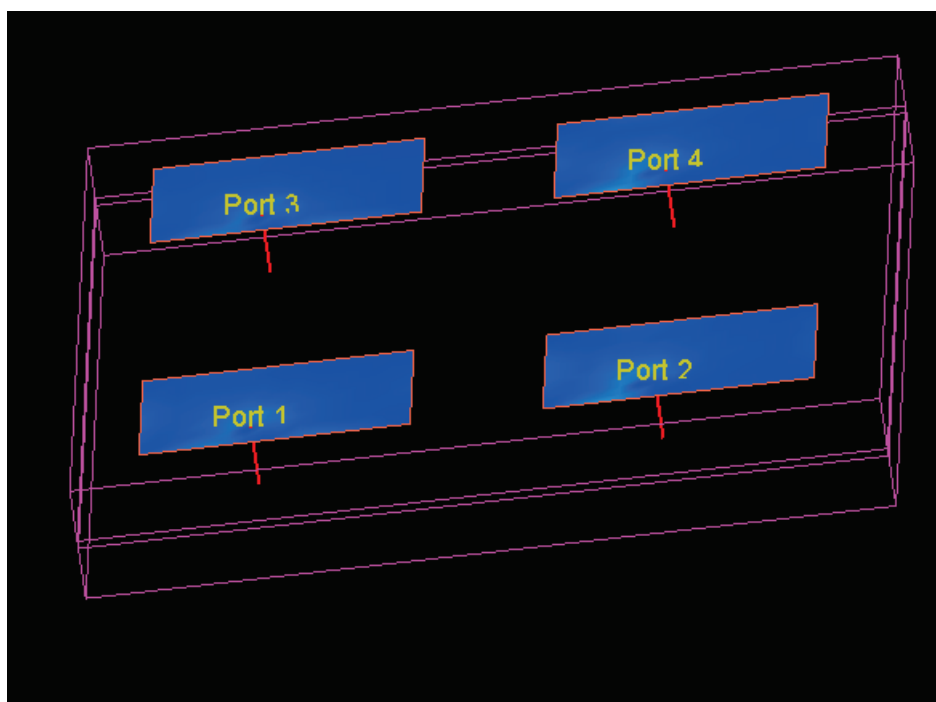


Figura 32. Vista 3D array 2x2.

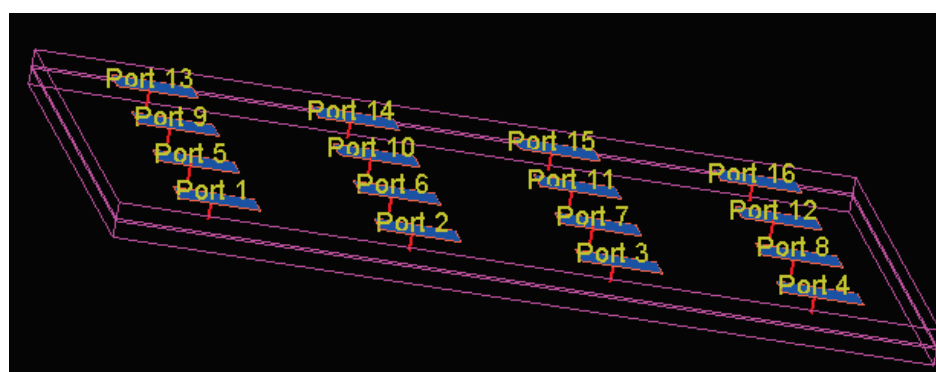


Figura 33. Vista 3D array 4x4.

En las simulaciones hemos obtenido las ganancias de los *arrays*, con el fin de comprobar la fórmula teórica, que manifestamos en la Tabla VI. En la Figura 34 representamos estos valores de forma gráfica, pudiendo comprobar que los valores teóricos y prácticos son muy aproximados.

Tabla VI. Ganancia en función del número de antenas de transmisión.

N ° de antenas	Ganancia teórica (dB)	Ganancia ADS (dB)
4	13,5	12,8
16	19,5	20

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

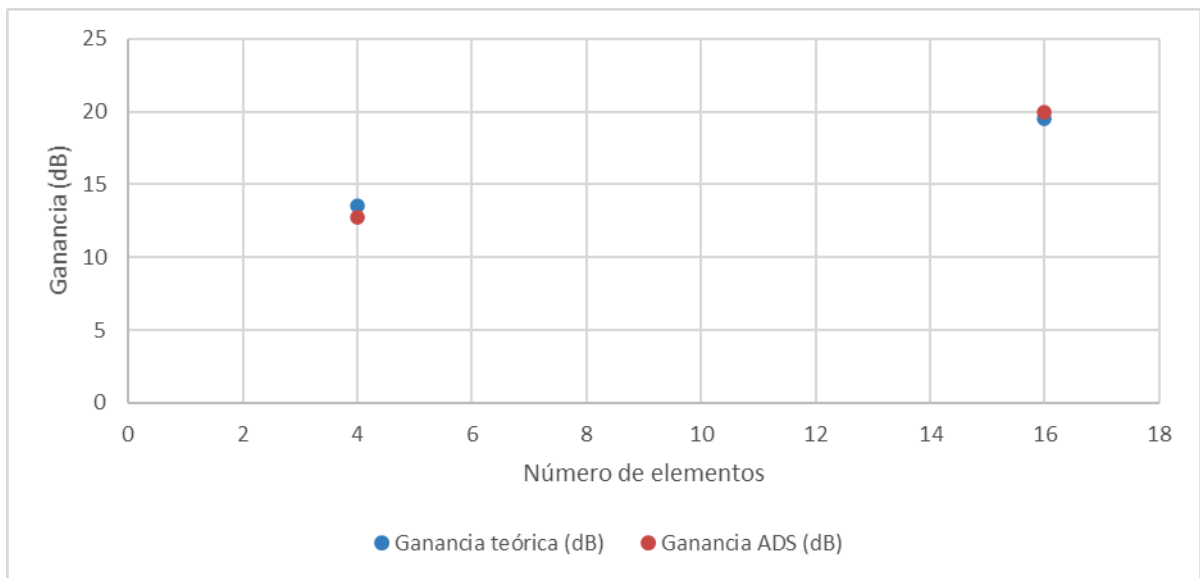


Figura 34. Gráfica comparación valores de ganancia antena de transmisión.

También hemos obtenido los diagramas de radiación de ambos *arrays*, vistos en la Figura 35 y Figura 36. Observamos que la ganancia se centra en un lóbulo principal y se direcciona todo hacia un punto. En ambos aparecen lóbulos secundarios, aunque son más latentes en el *array* de 4x4. La solución es usar un atenuador de lóbulos secundarios, que hemos trabajado en el SystemVue.

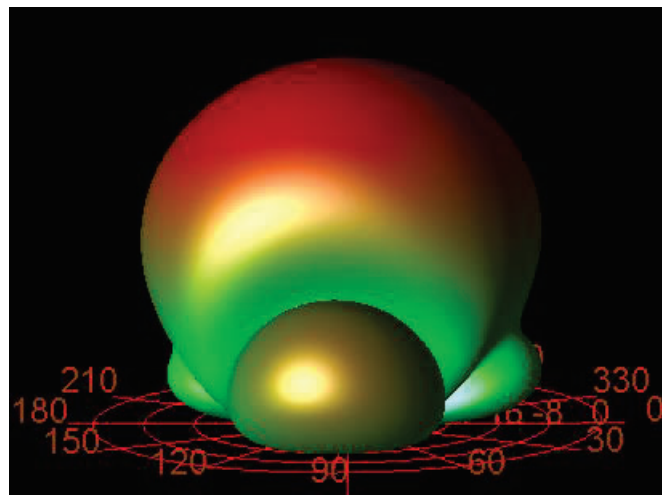


Figura 35. Diagrama de radiación array de transmisión 2.2 ADS.

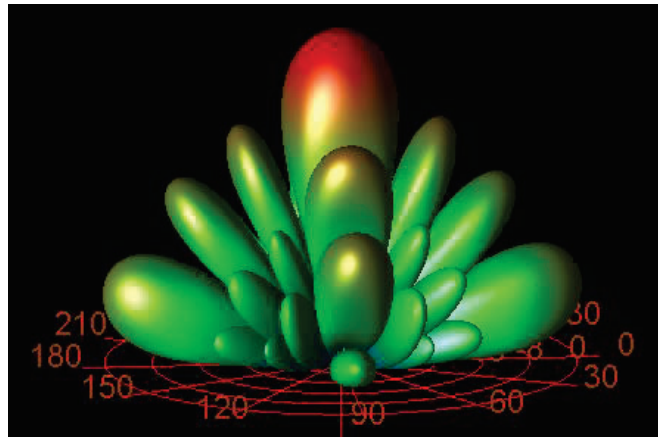


Figura 36. Diagrama de radiación array de transmisión 4x4 ADS.

Para trabajar con las antenas desde SystemVue, hemos utilizado el esquema correspondiente a la Figura 37. Consta de un puerto de entrada (*ArrayPort2*), donde la señal de entrada tendrá la potencia de la Ecuación (32), donde N es el número de elementos, y *Pin* es la potencia de entrada. En nuestro caso, y cumpliendo con las especificaciones del proyecto en el que se enmarca este Trabajo Fin de Máster, tomará un valor de 20 dBm de potencia de entrada para cada elemento radiante. En la Figura 37, al tener el *array* 16 elementos hemos puesto 32 dBm (20 dBm + $10\log_{10}(16)$) en la potencia de transmisión (*TXPwrIn*). La disposición elegida para colocar las antenas es de forma cuadrada, tal y como mostramos en la Figura 38.

$$TxPwrIn = 10 \log(N) + Pin \text{ (dBm)} \quad (32)$$

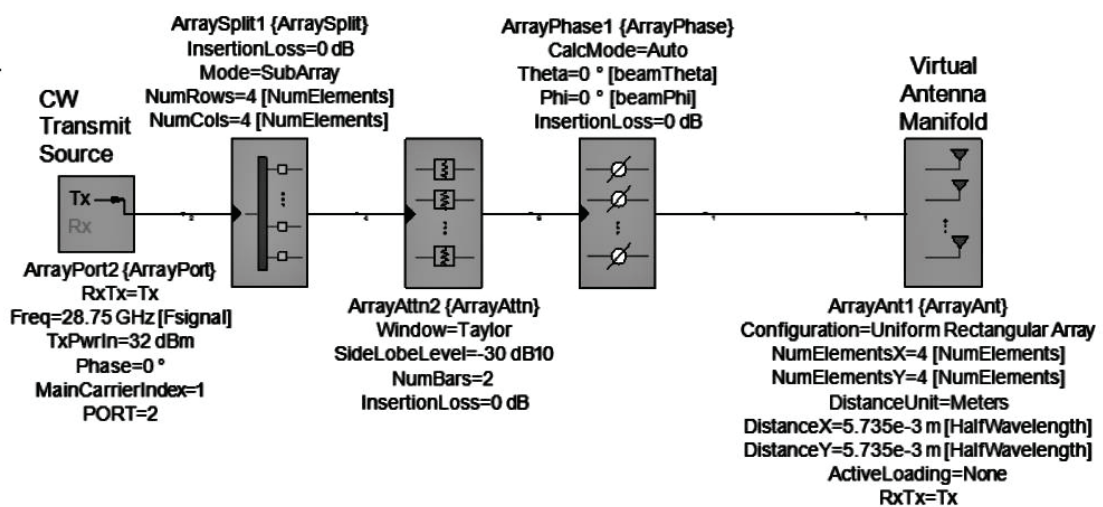


Figura 37. Esquema SystemVue array de transmisión.

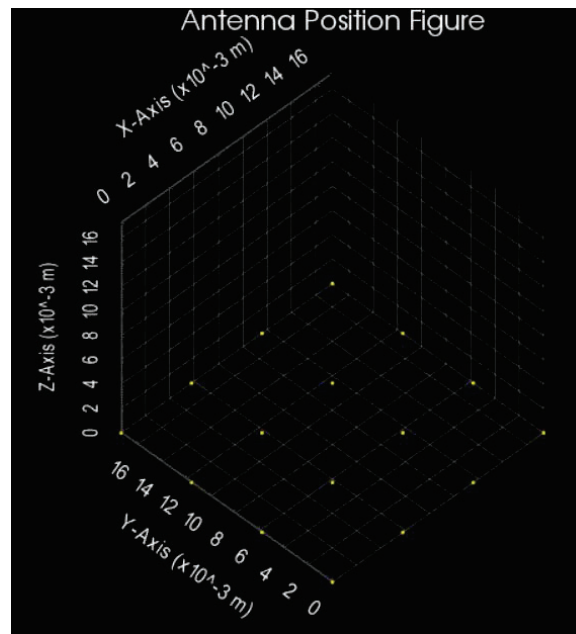


Figura 38. Disposición cuadrada array de antenas.

Este esquema cuenta también con un divisor de potencia, que repartirá la potencia entre los elementos disponibles (*ArraySplit*), un atenuador de lóbulos secundarios que utiliza la ponderación de Taylor (*ArrayAttn*), que nos ayuda a reducir los lóbulos laterales en relación con el lóbulo principal [37], un *array* de *phase shifter* (*ArrayPhase*), que es el módulo que desfasa las señales para el *array* de antenas, que corresponde al último módulo.

Ya habiendo cargado nuestros datos de ADS en el bloque del *array* de antenas, vamos a simular primero dos *arrays* de 2x2 y de 4x4, para comparar con los datos con los que hemos obtenido teóricamente y en ADS. Los resultados obtenidos en cuanto a diagramas de radiación los mostramos en la Figura 39 y Figura 40. Vemos que los lóbulos secundarios han desaparecido, esto es por el atenuador con la ponderación de Taylor que hemos añadido en el esquema de SystemVue. Comparamos numéricamente los valores en la Tabla VII, y gráficamente en la Figura 41.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

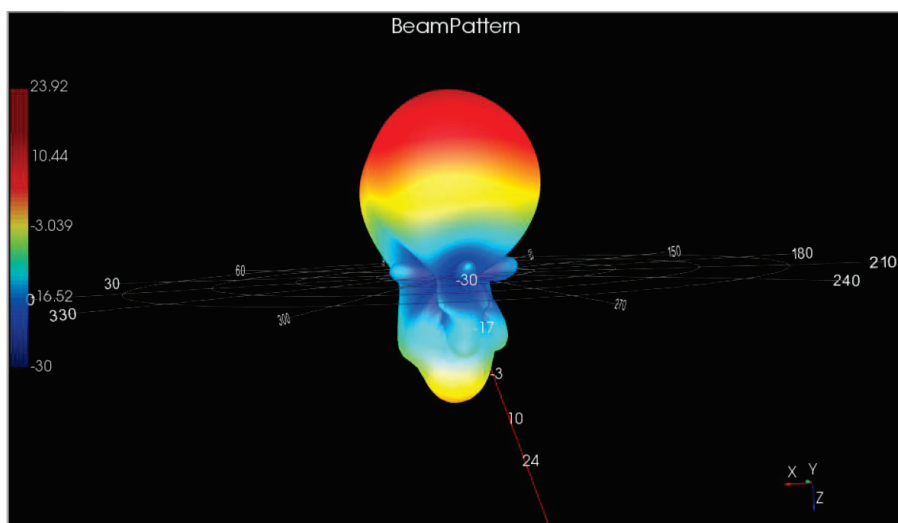


Figura 39. Diagrama de radiación array de transmisión 2x2 SystemVue.

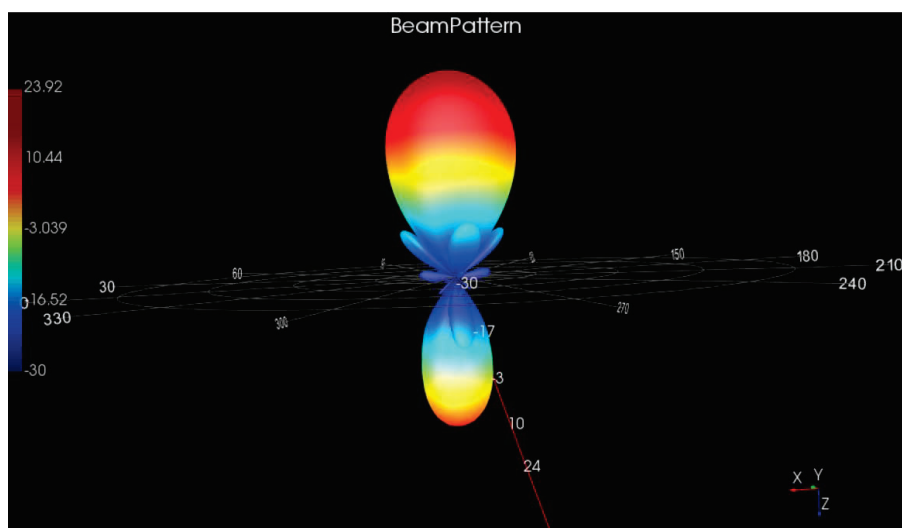


Figura 40. Diagrama de radiación array de transmisión 4x4 SystemVue.

Tabla VII. Comparativa de valores de ganancia en transmisión.

N.º de antenas	Ganancia teórica (dB)	Ganancia ADS (dB)	Ganancia SystemVue (dB)
4	13,5	12,8	13,1
16	19,5	20	17,6

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

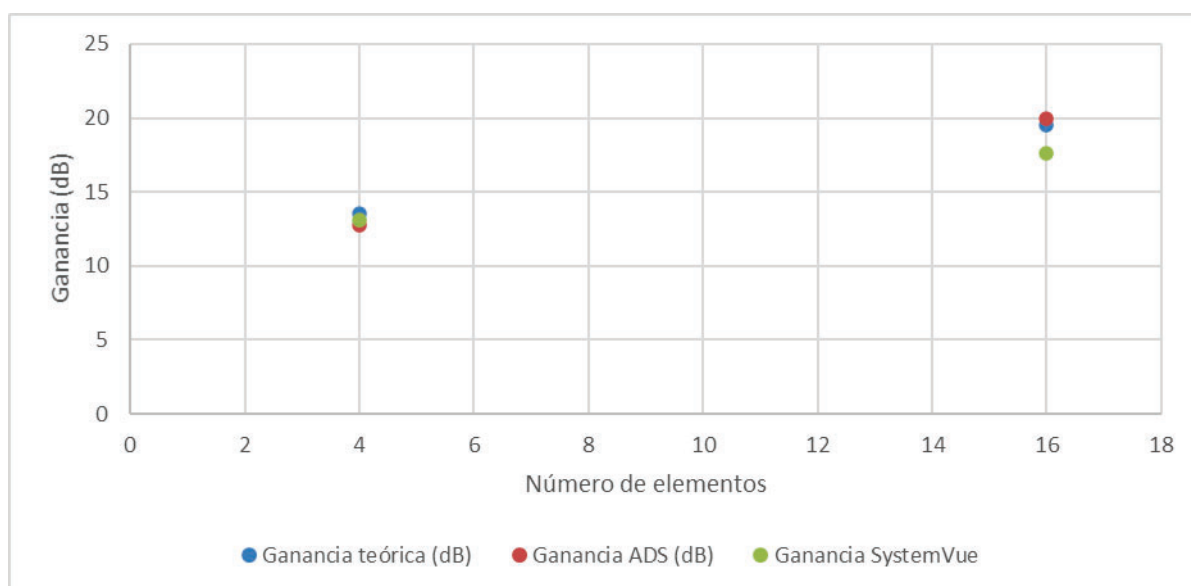


Figura 41. Comparativa de ganancias de transmisión.

Con esta gráfica damos por finalizado el diseño y validado el funcionamiento de nuestro esquema con el *array* de antenas en SystemVue.

Otra prueba que hemos realizado sobre el *array* es disponer las antenas de otra manera, no solo de manera cuadrada. Hemos elegido las formas cuadrada y hexagonal, representadas en la Figura 42 y Figura 43 respectivamente.

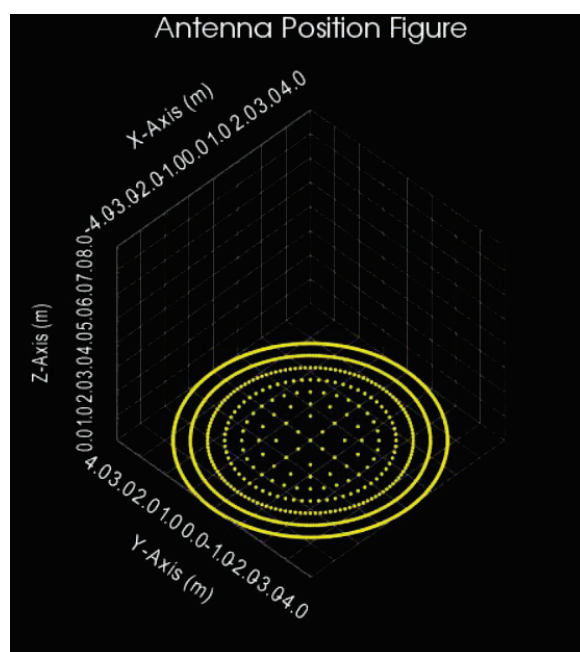


Figura 42. Disposición circular de antenas.

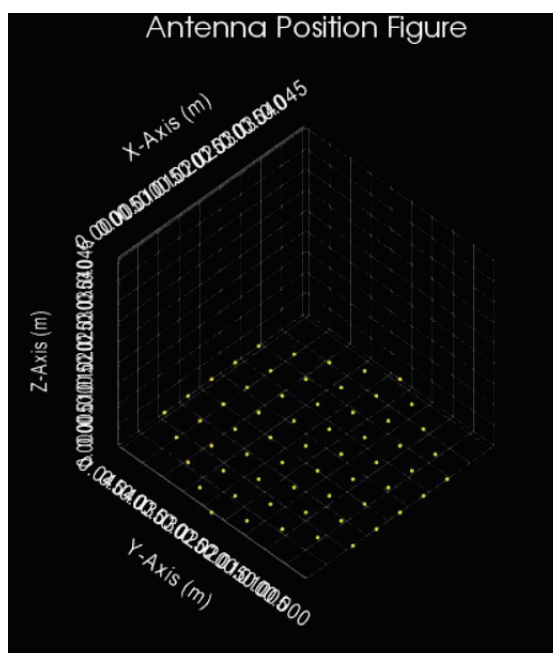


Figura 43. Disposición hexagonal de antenas.

A partir del *array* cuadrado y de estos dos últimos, y para la frecuencia central, hemos realizado simulaciones en el rango de 0 a 1000 antenas, con el fin de, por un lado, realizar una comparativa de los valores de EIRP, y por otro lado extrapolar los datos para obtener una gráfica que nos permita calcular el EIRP para cualquier número de elementos.

Como tenemos diferentes formas, no podemos elegir exactamente los mismos valores de antenas, ya que comprometen la geometría, por lo que tomaremos valores cercanos. Los resultados obtenidos con los valores elegidos se resumen en la Tabla VIII.

Tabla VIII. EIRP para diferentes disposiciones de elementos en transmisión.

Array cuadrado		Array circular		Array hexagonal	
N.º de elementos	EIRP (dBm)	N.º de elementos	EIRP (dBm)	N.º de elementos	EIRP (dBm)
64	64,6	61	62,8	61	61,8
144	66,7	125	69,1	101	65,8
256	68,3	253	75	252	73,8
529	70,2	509	80,9	499	79,7
1024	72	1021	86,8	1012	85,7

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

En ella vemos que, para misma potencia en la entrada, la disposición circular es la que más EIRP nos va a dar en la antena. Las tres crecen de manera logarítmica, pues vemos un menor crecimiento a más elementos tenemos. Las gráficas obtenidas para estas tres simulaciones las vemos en la Figura 44, Figura 45 y Figura 46.

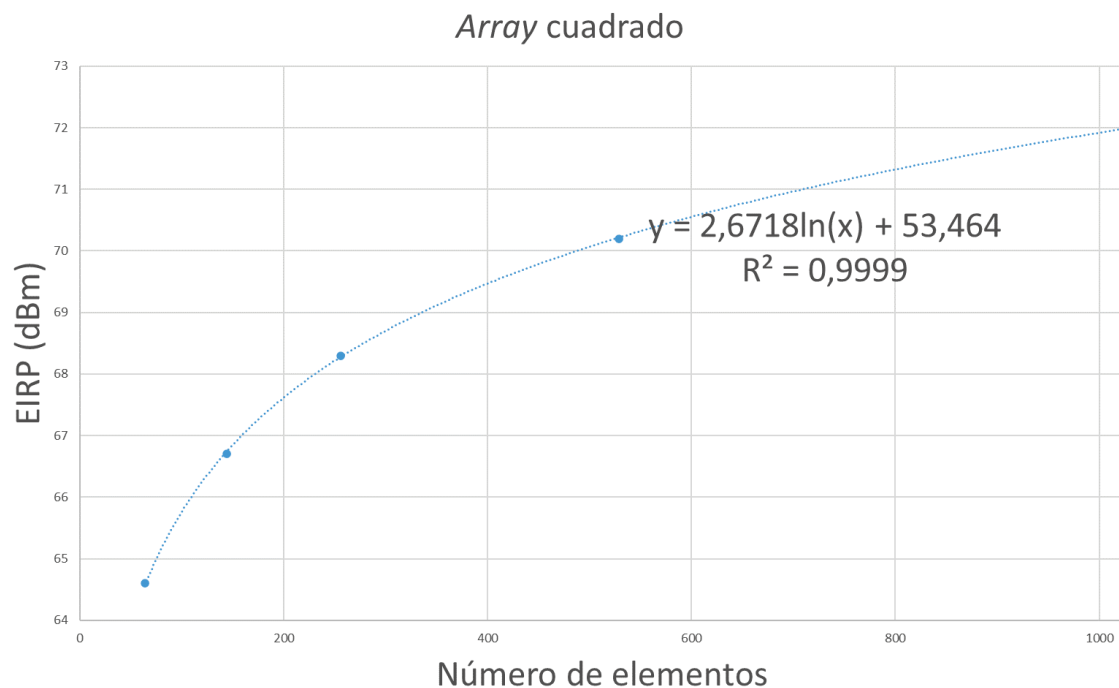


Figura 44. Gráfica array cuadrado de transmisión.

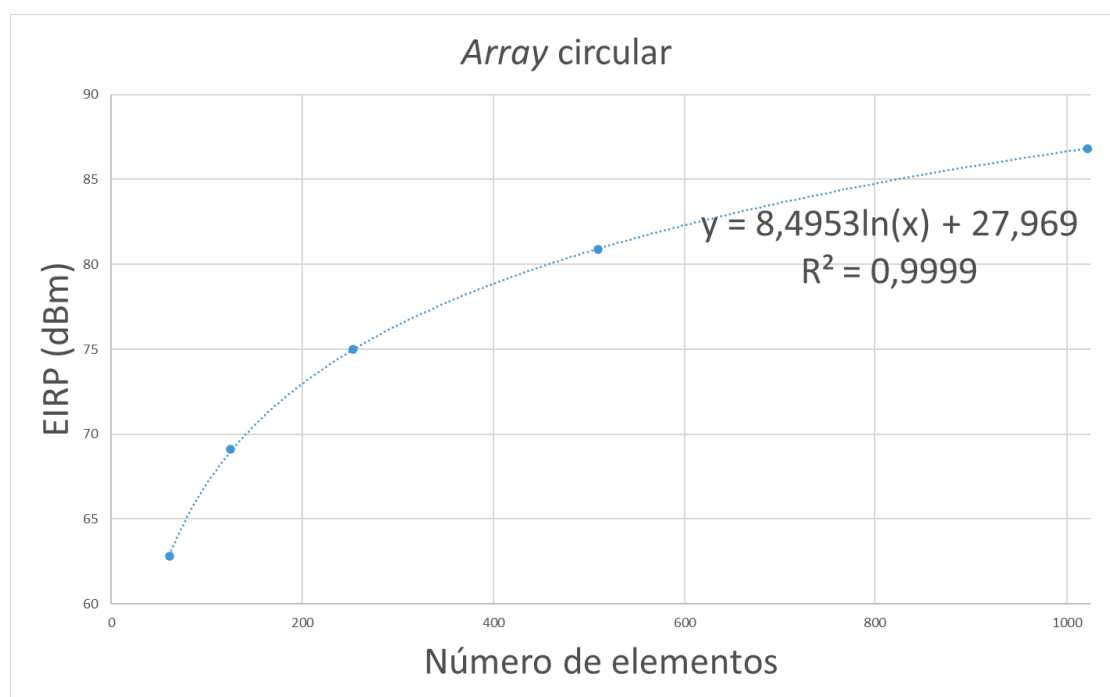


Figura 45 Gráfica array circular de transmisión.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

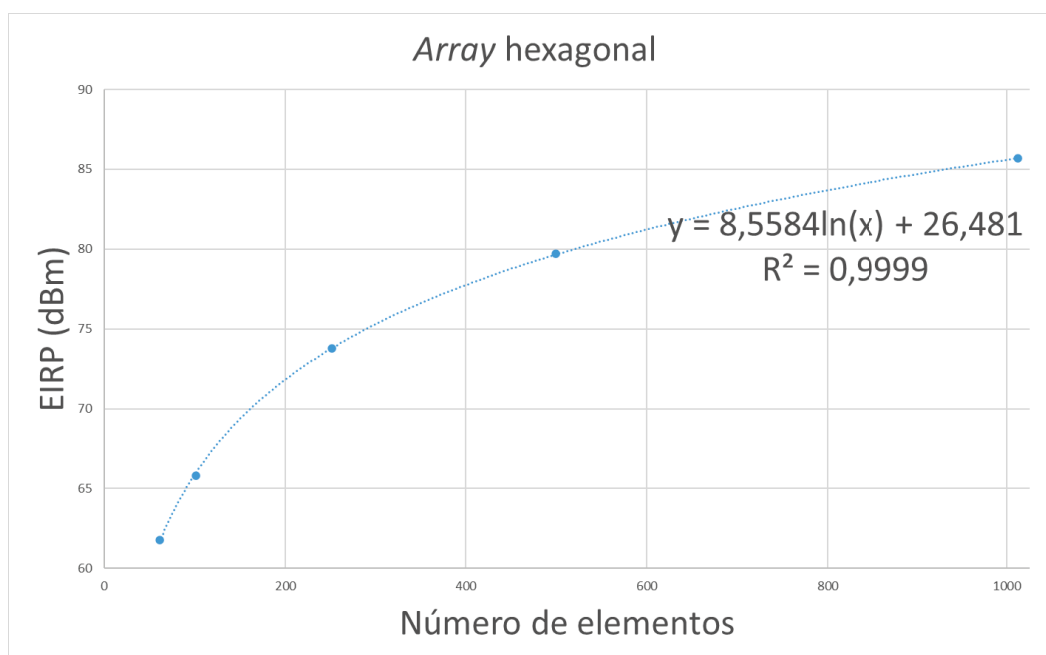


Figura 46. Gráfica array hexagonal de transmisión.

El coeficiente de determinación (R^2), valor mostrado en las gráficas, cuantifica la calidad del modelo para replicar los resultados. Este valor puede variar entre 0 y 1, siendo el valor óptimo este último, por lo que tenemos tres gráficas que estiman de manera muy aproximada para cualquier número de antenas el EIRP correspondiente con la ecuación que se muestra en cada una de ellas.

También hemos estudiado qué pasa con la variación de los ángulos de apuntamiento. En la Figura 47 hemos variado el ángulo de azimut desde 0 hasta 360°, viendo cómo apunta hacia las diferentes direcciones disponibles

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

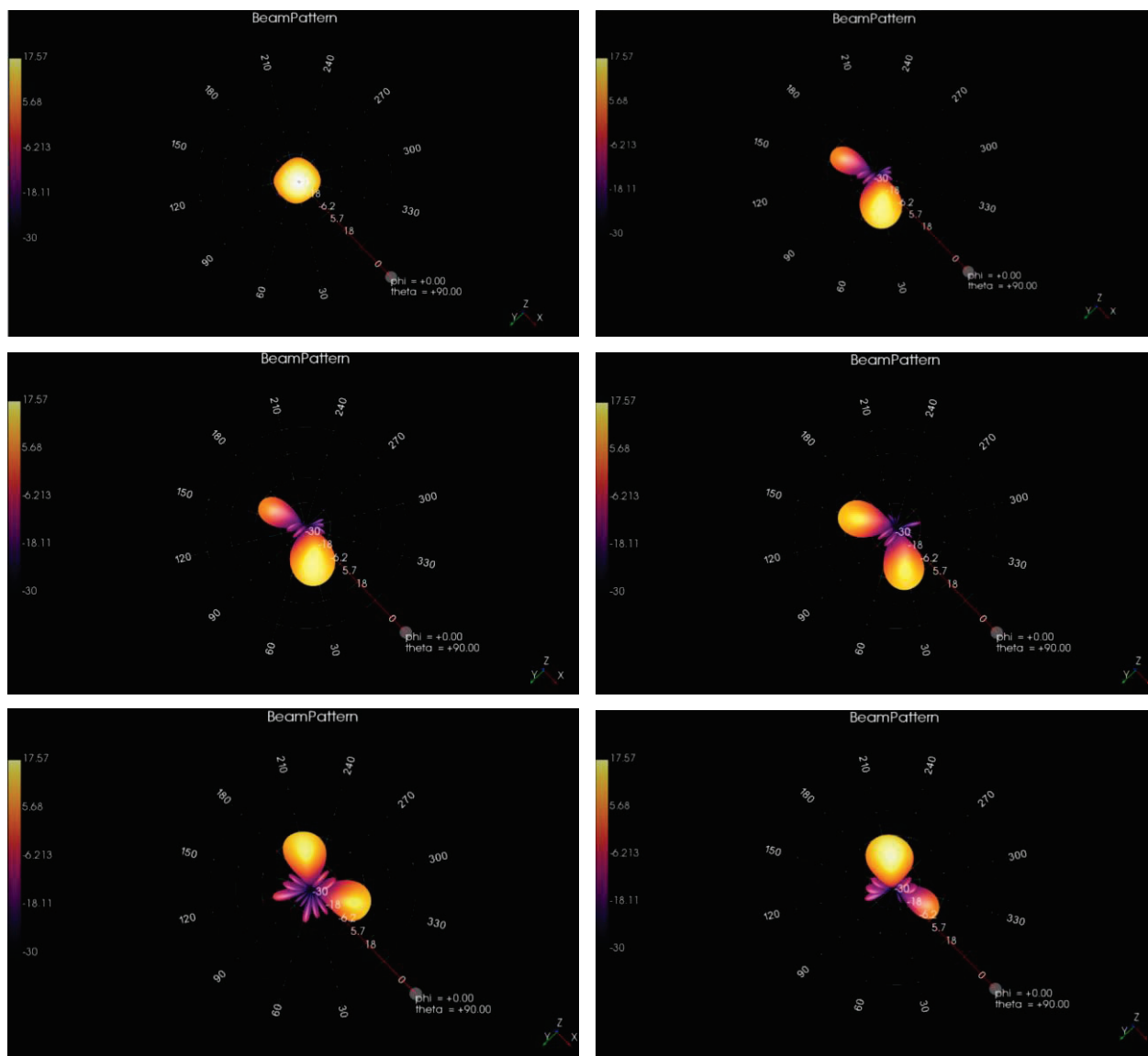


Figura 47. Variación ángulos apuntamiento en transmisión.

3.5 Simulaciones finales transmisión

Como simulaciones finales nos hemos propuesto llegar a las especificaciones de tres constelaciones de satélites, Starlink, OneWeb y TeleSat. En cada uno de los apartados, correspondientes a la transmisión y la recepción daremos los datos, y realizaremos simulaciones para llegar a estas.

En el caso de la transmisión, los datos de referencia los mostramos en la Tabla IX [38].

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Tabla IX. Especificaciones de transmisión.

Constelación	SpaceX	OneWeb	Telesat
Frecuencia operación (GHz)	28,5	28,5	28,5
EIRP (dBW)	68,4	63,2	75,9
Elementos teóricos	3008	1928	8318

Para realizar una estimación de los elementos que vamos a necesitar en función del EIRP, acudiremos a la Ecuación (33). Consideramos $G_e = 7,5$ dBi, que corresponde a la ganancia individual de la antena. El resto de los valores varía en función del número de elementos.

$$EIRP = 10 \log(N) + TxPwrIn + Ge \text{ (dBm)} \quad (33)$$

Hemos realizado una primera simulación con los datos teóricos de OneWeb, obteniendo 63,8 dBW de EIRP. Con este valor hemos ajustado los valores, obteniendo finalmente que el número necesario de elementos es de 1700.

De la misma manera, hemos procedido al cálculo del número de elementos radiantes de Starlink, obteniendo un EIRP de 66,4 dBW. Hemos intentado realizar el ajuste, pero debido a la falta de recursos de computación, hemos optado por realizar diversas simulaciones con distintos números de antenas y extrapolarlos para obtener una ecuación que nos permita una aproximación. Los elementos simulados y el EIRP correspondiente se recogen en la Tabla X.

Tabla X. Recopilación elementos simulados en transmisión.

Elementos	EIRP (dBW)
100	48,5
250	50,9
500	57,9
750	59,07
1000	60,97
1250	61,95
1500	62,5
1700	63,2
1800	63,5
1900	63,8
3200	66,4
3500	66,4

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

A partir de esta tabla hemos obtenido la gráfica de la Figura 48, que nos muestra tanto la ecuación a la que responde el modelo como el coeficiente de determinación, pudiendo decir que tenemos un modelo preciso para estimar el número de antenas para cualquier *array* de antenas que opere a 28,5 GHz, ya que el coeficiente de determinación es muy próximo a 1.

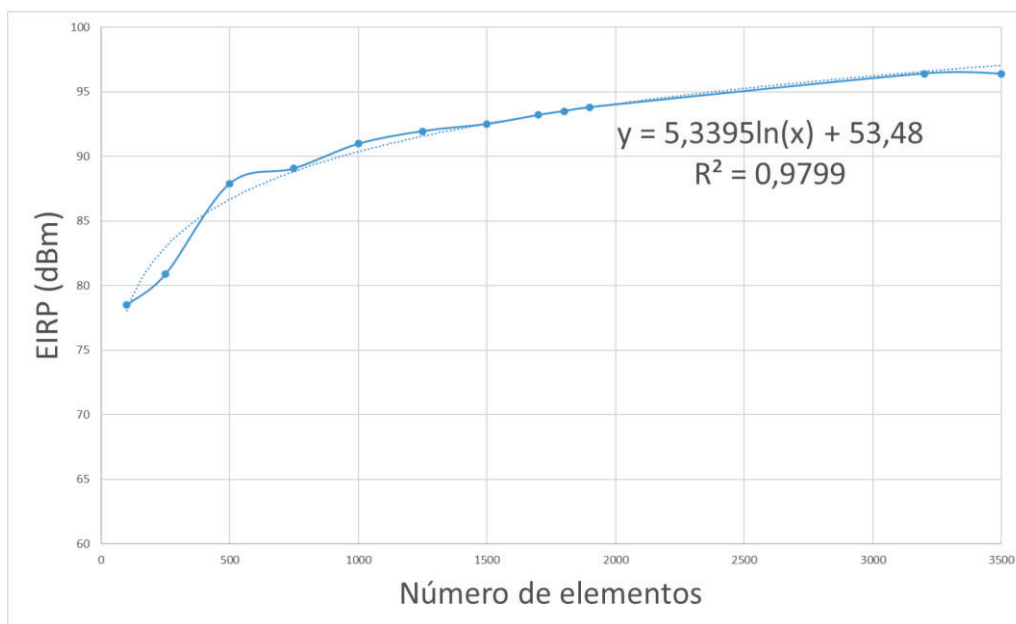


Figura 48. EIRP en función del número de elementos en transmisión.

Gracias a esta extrapolación, y aplicando la Ecuación (34), obtenemos que las antenas necesarias para la constelación de satélites de Starlink es de 4500 elementos, para OneWeb 1700 y para las especificaciones de Telesat necesitamos 18500 elementos.

$$EIRP = 5,3395 \ln(N) + 53,48 \text{ (dBm)} \quad (34)$$

Para el caso de Telesat, hemos obtenido un número muy elevado de elementos en comparación a las otras dos constelaciones de satélites. Para disminuir este número de elementos, podríamos elevar el valor de potencia de alimentación de las antenas.

Recogeremos un resumen de los elementos necesarios en la Tabla XI. La discrepancia entre los valores se debe a que la fórmula teórica se cumple siempre y cuando exista suficiente separación como para que los elementos no se influyan entre ellos, que no es nuestro caso, por lo que hemos acudido a las simulaciones para ver cuántos elementos necesitamos realmente.

Tabla XI. Tabla comparativa valores teóricos y simulación

Constelación de satélites	Elementos teóricos	Elementos obtenidos
Telesat	3008	4500
OneWeb	1928	1700
SpaceX	8318	18500

3.6 Conclusiones

Una vez adquiridos los conocimientos teóricos de la antena, en este capítulo hemos definido el sustrato sobre el que vamos a trabajar la antena de transmisión.

También hemos diseñado tanto la antena de transmisión sobre un *layout* del ADS, obteniendo sus parámetros característicos, como la ganancia y la eficiencia, y el coeficiente de reflexión a la entrada, para poder comprobar la frecuencia de funcionamiento y el ancho de banda.

Ya diseñada la antena hemos realizado varios *arrays* de antenas, haciendo pruebas primero sobre ADS con pocas antenas, para pasar a SystemVue, que nos permite simular un mayor número de antenas, llegando a especificaciones de constelaciones de antenas reales.

Verificados los valores de las antenas reales, damos por finalizada la parte correspondiente a la transmisión. En el capítulo siguiente se ha procedido a diseñar y modelar la parte de recepción.

Capítulo 4. Array de antenas para la recepción

4.1 Introducción

Siguiendo el mismo flujo de trabajo que en el Capítulo 3, donde hemos diseñado las antenas tipo parche que conforman el *array* de antenas, y realizado este último, utilizando una combinación de programas de Keysight: ADS: EMPro y SystemVue, en este capítulo vamos a realizar la antena y el *array* para la recepción, incluyendo algunos matices de diseño. En la Figura 49 mostramos el sistema con el que vamos a trabajar en la recepción.

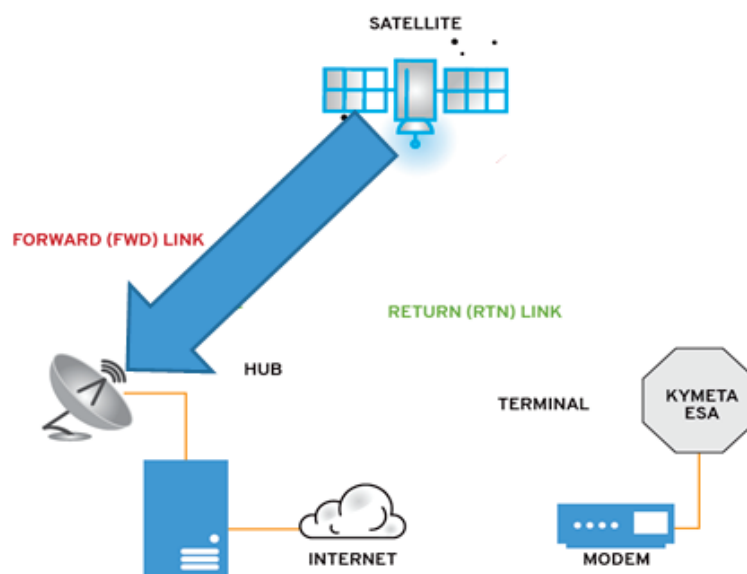


Figura 49. Diagrama de recepción.

4.2 Definición del sustrato

En el caso de la antena de recepción, hemos introducido cambios en el dieléctrico del núcleo, siendo en este caso el material TLY-5 de Taconic, basado en un tejido ligero de fibra de vidrio, más estable dimensionalmente que otros materiales [39], quedando el sustrato de la Figura 50.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

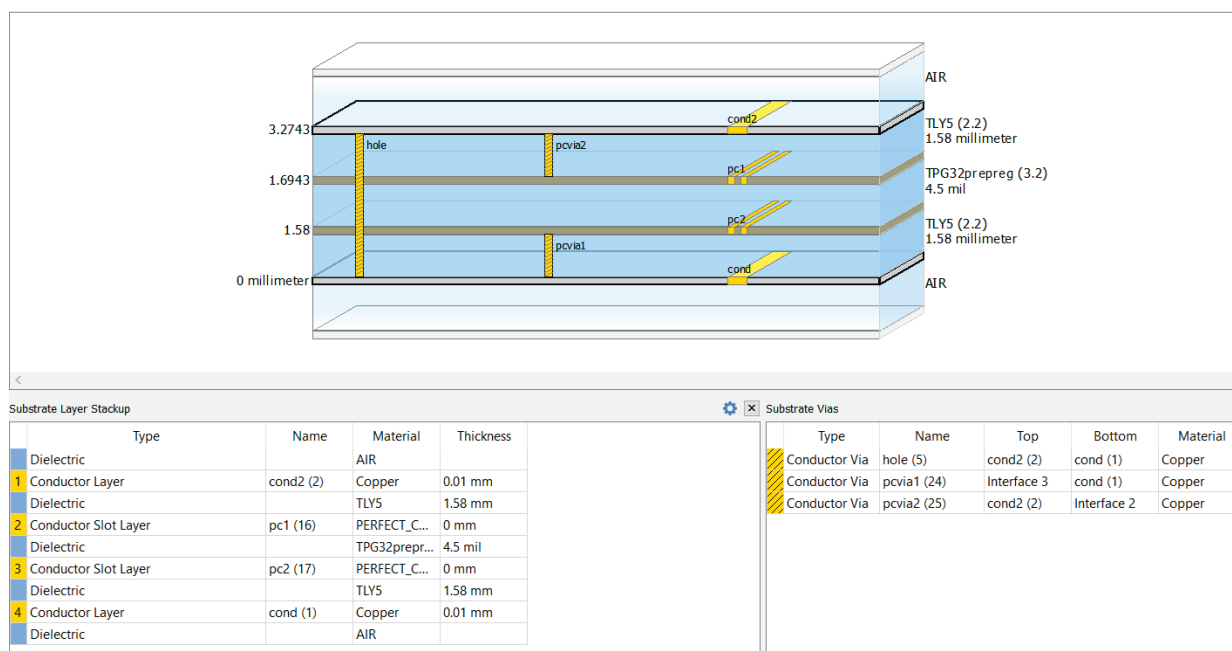


Figura 50. Sustrato de recepción.

4.3 Diseño en ADS

Al igual que en la transmisión, hemos realizado los cálculos teóricos, teniendo finalmente los valores para dimensionar que se reflejan en la Tabla XII.

Tabla XII. Dimensiones antena de recepción.

Dimensiones (mm)		Datos		
W	6,2	c	3000000000	(m/s)
L	3,8			
L_{eff}	5,3	f	19	(GHz)
ΔL	0,7			
X_{feed}	2,6	ε_r	2,2	
Y_{feed}	3,1			
h	1,58	ε_{eff}	2,2	
λ	15,8			

En este caso, la banda donde vamos a transmitir se encuentra entre 17,8 GHz y 20,2 GHz, por lo que la frecuencia central se encuentra en 19 GHz. En la Figura 51 vemos la antena diseñada para la recepción.

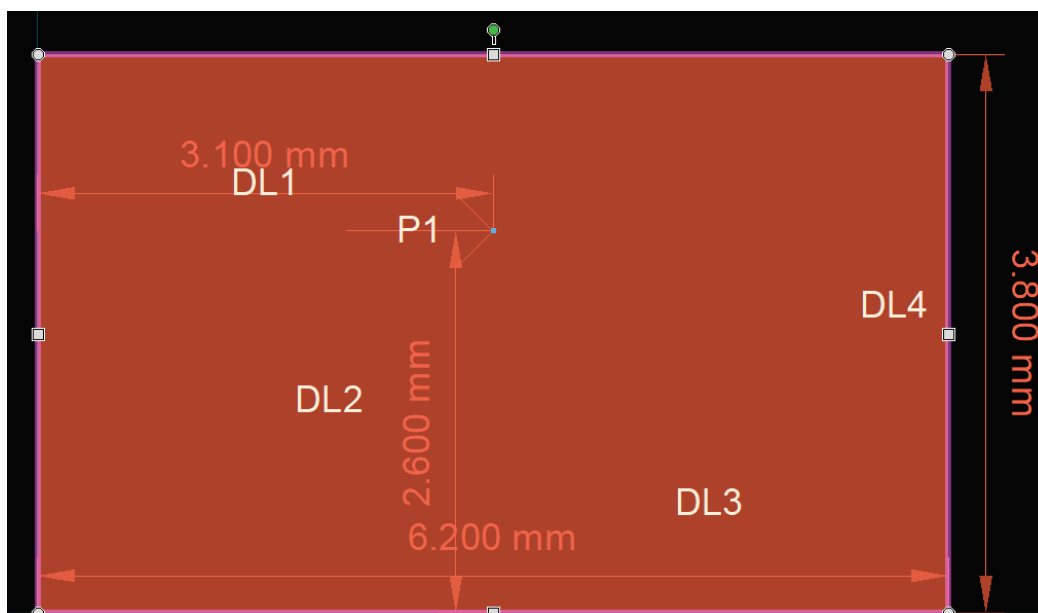


Figura 51. Antena tipo parche de recepción.

Ya habiendo realizado las simulaciones electromagnéticas correspondientes, obtenemos la gráfica del coeficiente de reflexión mostrado en la Figura 52. Verificamos con ella que cumple con el ancho de banda y la frecuencia central que requerimos al estar por debajo de los -10 dB.

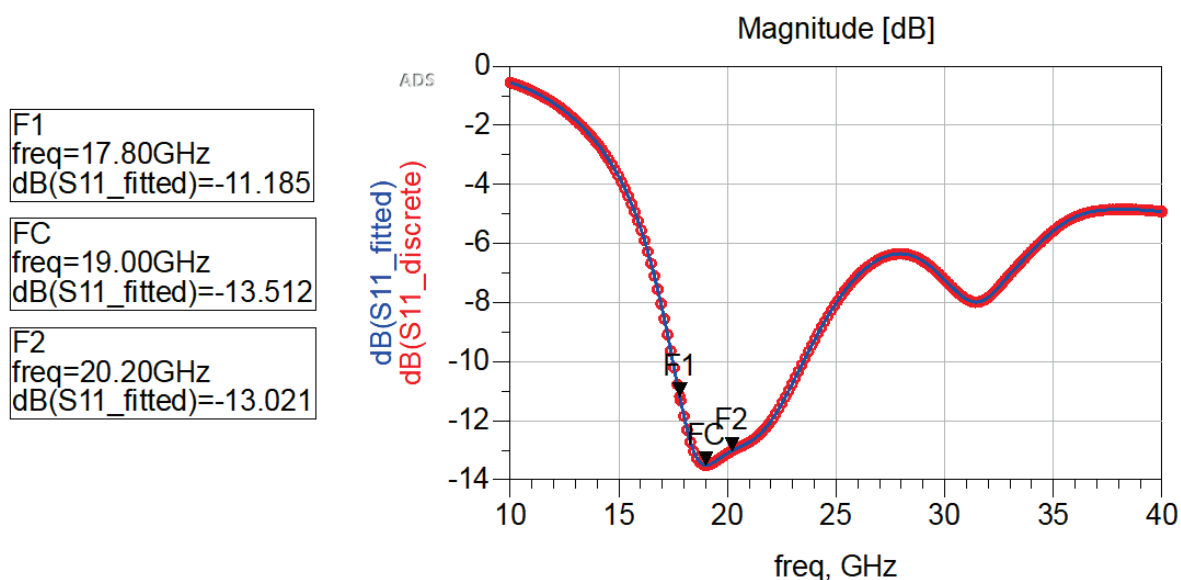


Figura 52. Coeficiente de reflexión a la entrada de la antena de recepción.

Hemos obtenido también el diagrama de radiación de la antena y sus parámetros característicos, mostrados en la Figura 53 y Figura 54 respectivamente.

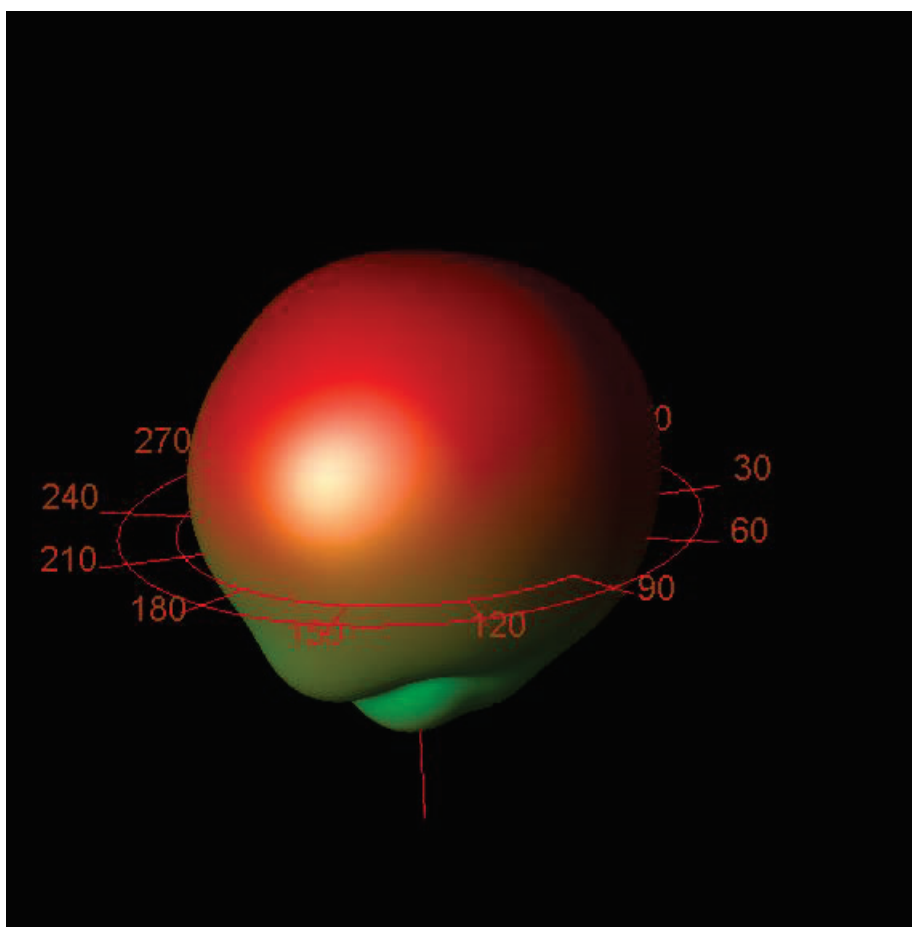


Figura 53. Diagrama de radiación antena de recepción.

Antenna Parameters		×
Frequency (GHz)		19
Input power (Watts)		0.00238863
Radiated power (Watts)		0.00244671
Directivity(dBi)		6.07885
Gain (dBi)		6.18319
Radiation efficiency (%)		100
Maximum intensity (Watts/Steradian)		0.000789329
Effective angle (Steradians)		3.09974
Angle of U Max (theta, phi)	141	54
E(theta) max (mag,phase)	0.739363	121.811
E(phi) max (mag,phase)	0.219251	-29.8245
E(x) max (mag,phase)	0.200249	-83.0755
E(y) max (mag,phase)	0.581488	-52.1453
E(z) max (mag,phase)	0.465296	-58.1891

OK

Figura 54. Parámetros de la antena de recepción.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Hemos obtenido también el corte del diagrama de radiación de la Figura 55, comprobando los diferentes parámetros electromagnéticos de la antena.

Frequency	E_max	Theta_max	Phi_max	Directivity_max	Gain_max	RadiatedPower	InputPower	Efficiency	CutType	CutAngle
1.000E10	0.195	135.000	39.000	3.298	3.271	2.977E-4	2.996E-4	0.994	Theta	90.000

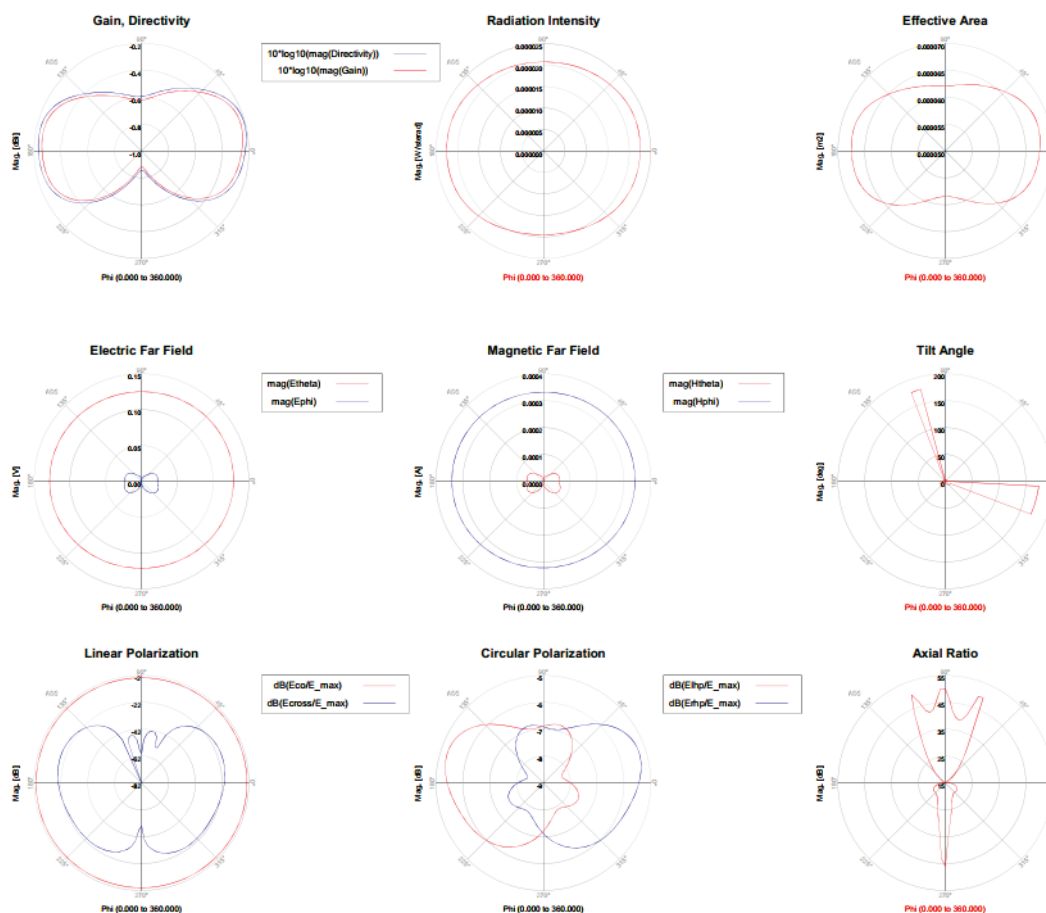


Figura 55. Corte diagrama de radiación antena de recepción.

Con esto, damos por finalizado el diseño de la antena de recepción, pasando a modelar los *arrays* correspondientes.

4.4 Modelado *array* de antenas

De igual manera, hemos establecido la separación que ha de haber entre cada parche, determinando que, al igual que en el *array* de transmisión, esta separación óptima es de $0,55\lambda$.

Hemos realizado los esquemas de recepción en ADS para los *arrays* de 2x2 y de 4x4, tal y como vemos en la Figura 56 y Figura 57.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

HARMONIC BALANCE

HarmonicBalance
HB1
Freq[1]=FC
Order[1]=5

PARAMETER SWEEP

ParamSweep
Sweep1
SweepVar="theta_degrees"
SimInstanceName[1]="HB1"
SimInstanceName[2]=
SimInstanceName[3]=
SimInstanceName[4]=
SimInstanceName[5]=
SimInstanceName[6]=
Start=-45
Stop=45
Step=15

S-PARAMETERS

S_Param
SP1
Start=20 GHz
Stop=40 GHz
Step=250 MHz

NETLIST INCLUDE

NetlistInclude
PinVoltageOutputPlan

```

[Var] VAR
[Eqn] VAR1
FC=19 GHz
landa=300000000/FC
theta_rad=theta_degrees*pi/180
theta_degrees=25
phi_rad=2*pi*d/landa*sin(theta_rad)
phi=phi_rad *180/pi
d=(8.7+6.2)*1e-3
    
```

```

[Var] VAR
[Eqn] VAR2
phase 1=0
phase 2=phase 1+phi
phase 3=phase 2+phi
phase 4=phase 3+phi
    
```

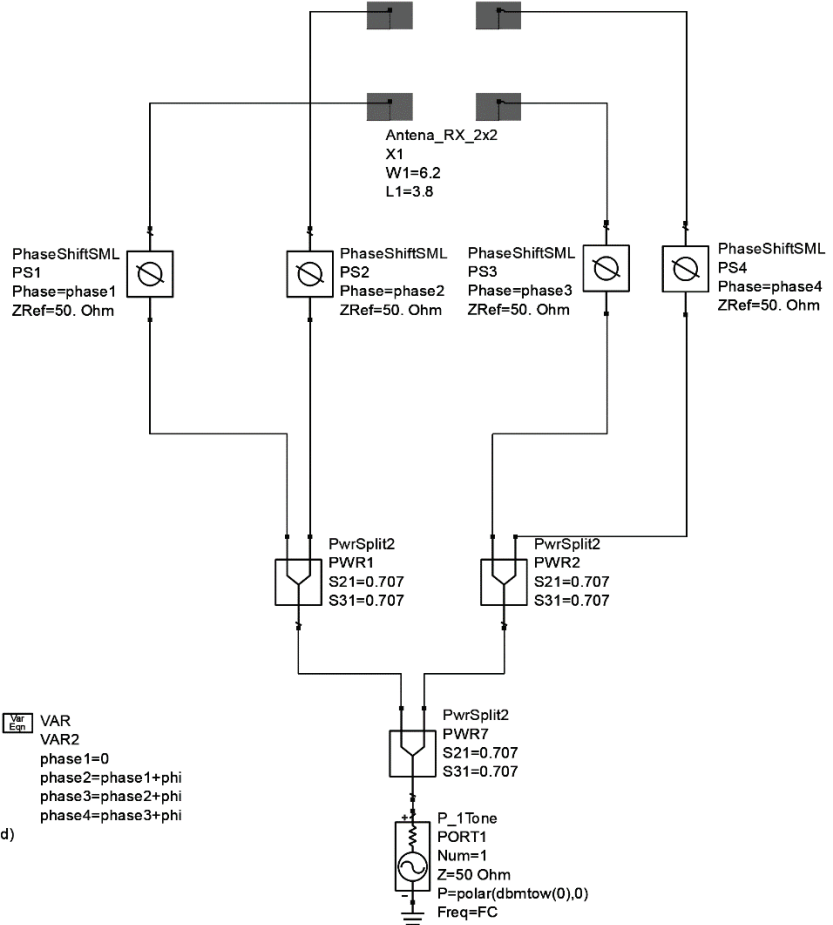


Figura 56. Esquema array 2x2 de recepción.

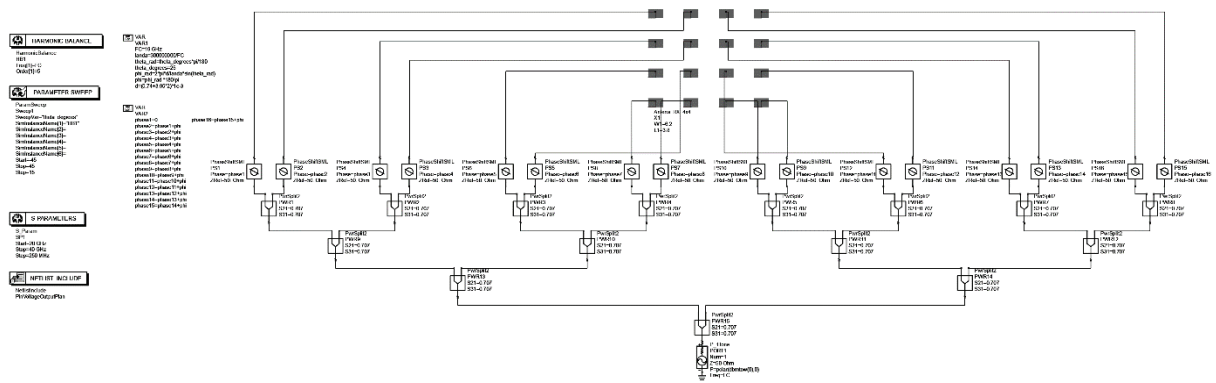


Figura 57. Esquema array 4x4 de recepción.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

La alimentación en este caso funcionará como en el caso de transmisión, pasando una vía desde el metal donde está el chip y hacia el metal de la antena.

Hemos obtenido los diagramas de radiación para los *arrays* de 2x2 y 4x4, mostrados en la Figura 58 y Figura 59, viendo que en este caso también aparecen los lóbulos secundarios que trataremos posteriormente en SystemVue.

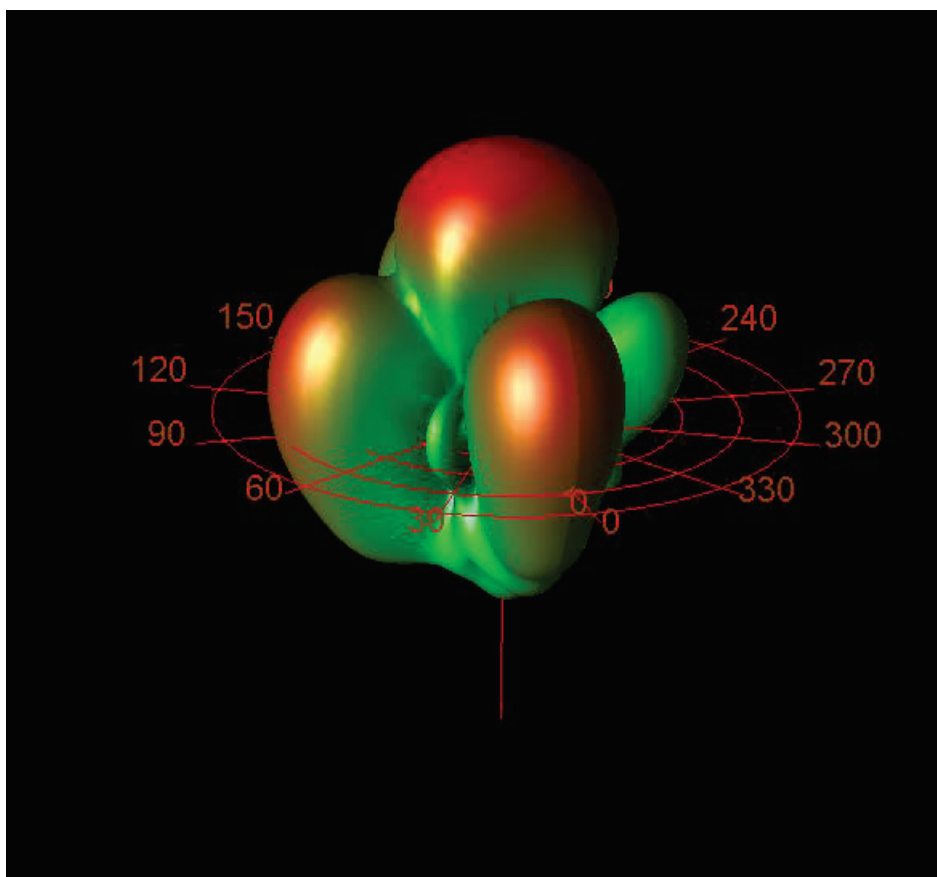


Figura 58. Diagrama de radiación array 2x2 de recepción ADS.

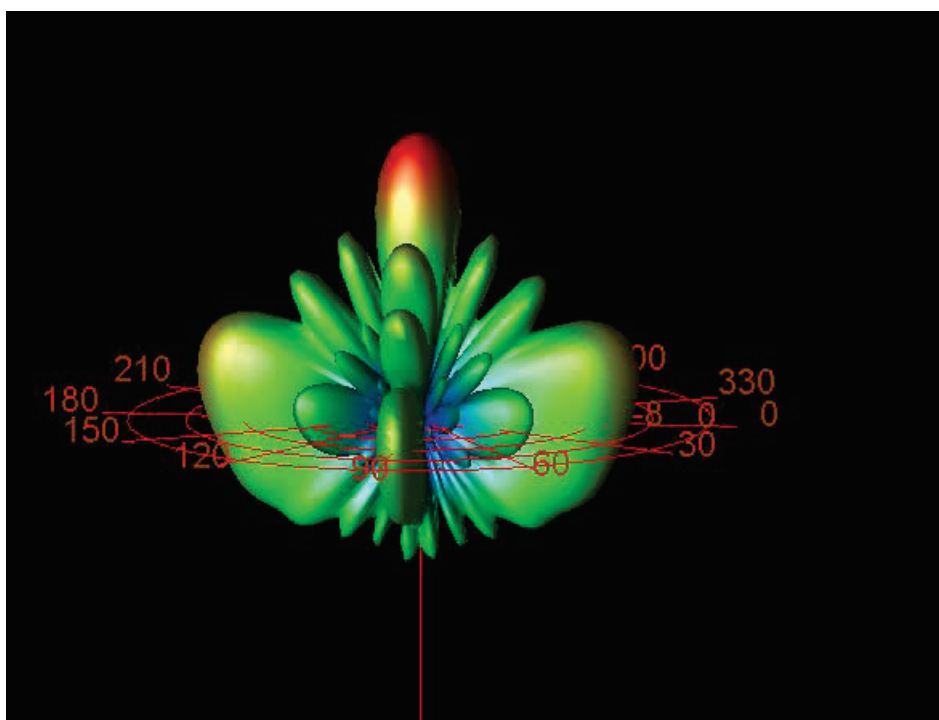


Figura 59. Diagrama de radiación array 4x4 de recepción ADS.

Además, para comprobar el funcionamiento, hemos obtenido los valores de las ganancias, con el fin de comparar con los valores teóricos. Numéricamente los representamos en la Figura 60, mientras que gráficamente lo vemos en la Tabla XIII.

Tabla XIII. Comparación valores de ganancia ADS y teórico en la recepción.

N.º de antenas	Ganancia teórica (dB)	Ganancia ADS (dB)
4	12,1	10
16	18,1	16,2

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

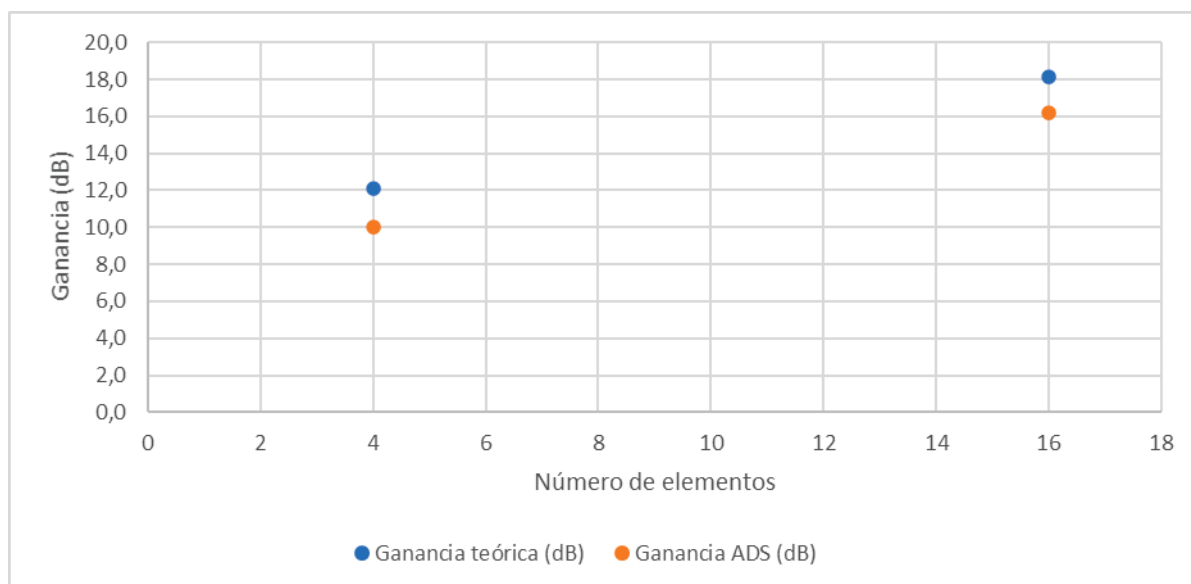


Figura 60. Comparación valores de ganancia ADS y teórico en la recepción.

Ya verificados los valores teóricos y de ADS, hemos procedido, al igual que en la transmisión, a trabajar con el programa SystemVue, generando los ficheros necesarios de la antena individual gracias a EMpro.

En este caso, para el modelado del *array* de recepción en SystemVue, hemos realizado algunos cambios sobre el esquema de transmisión, obteniendo el correspondiente a la Figura 61. Hemos usado como frecuencia de operación, al igual que en la transmisión, 19 GHz, que corresponde a la frecuencia central de la banda en la que queremos transmitir. En este caso, el valor correspondiente a la potencia de recepción, atendiendo a las especificaciones del proyecto, es de -120 dBm. Como en la transmisión, la primera forma de disponer las antenas con la que hemos trabajado es cuadrada.

Un añadido que tiene este esquema es un LNA, el cual lleva las especificaciones del sistema receptor del mismo proyecto, en específico la figura de ruido de 1.3 dB.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

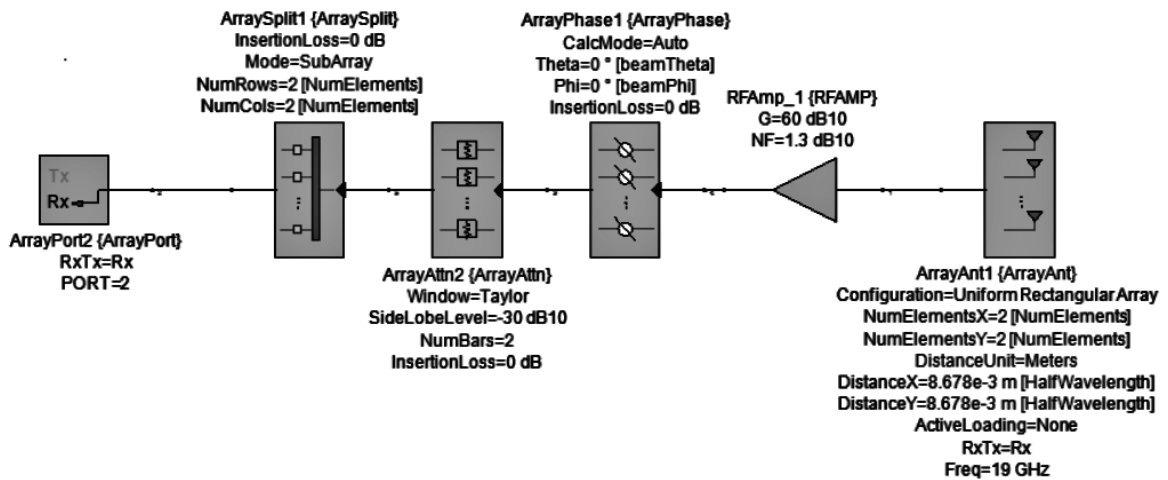


Figura 61. Esquema array de recepción SystemVue.

Hemos realizado las simulaciones necesarias para comparar con los valores teóricos y de ADS para los *arrays* de 2x2 y 4x4, obteniendo los patrones de radiación de la Figura 62 y Figura 63 respectivamente.

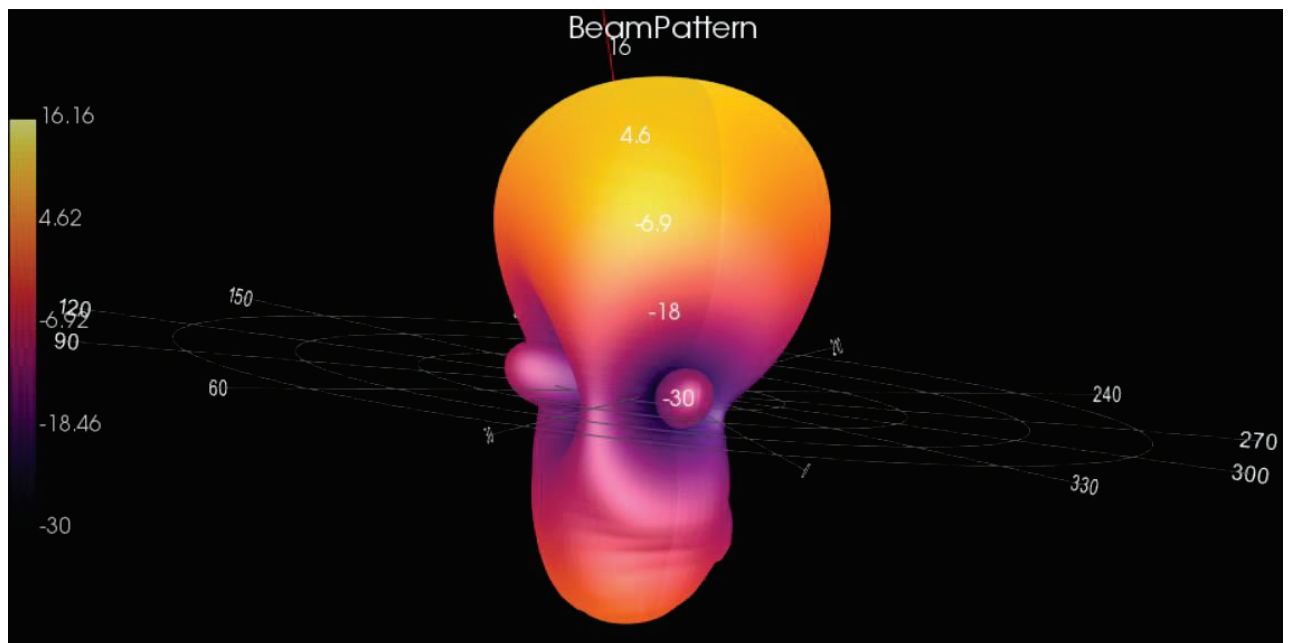


Figura 62. Diagrama de radiación array 2x2 de recepción SystemVue.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

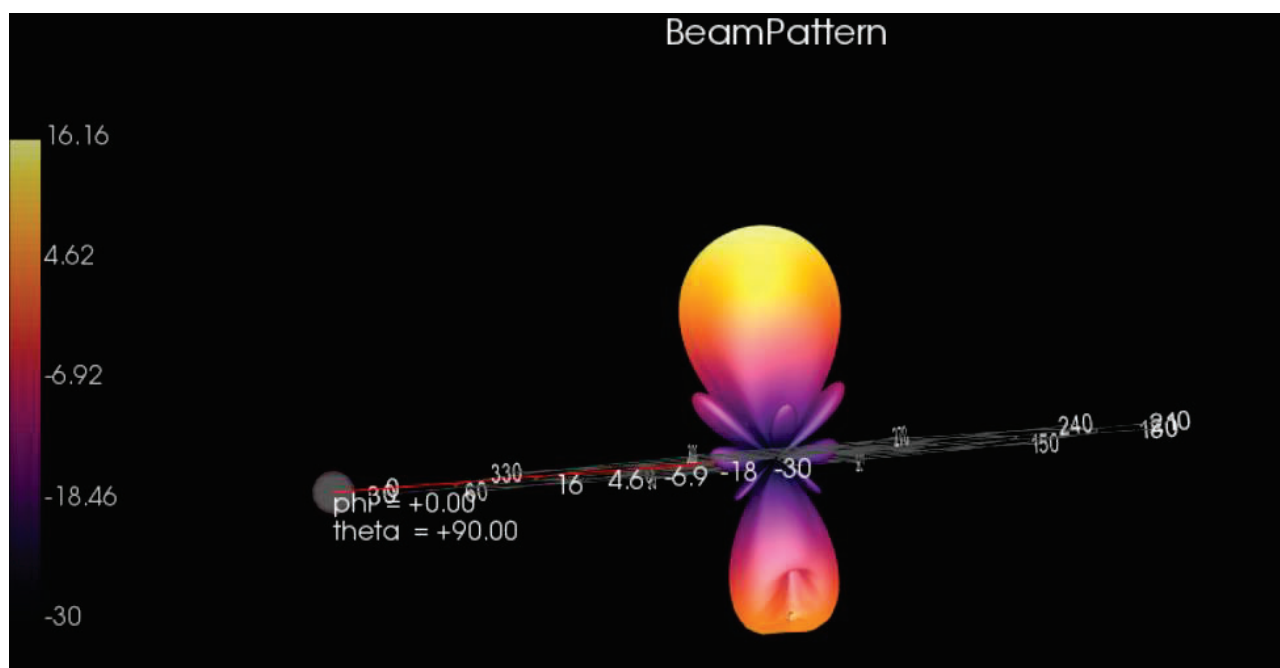


Figura 63. Diagrama de radiación array 4x4 de recepción SystemVue.

La comparación obtenida la reflejamos en la Figura 64, representada gráficamente en la Tabla XIV.

Tabla XIV. Comparativa ganancias en la recepción.

N.º de antenas	Ganancia teórica (dB)	Ganancia ADS (dB)	Ganancia SystemVue (dB)
4	12,1	10	10,7
16	18,1	16,20	16,1

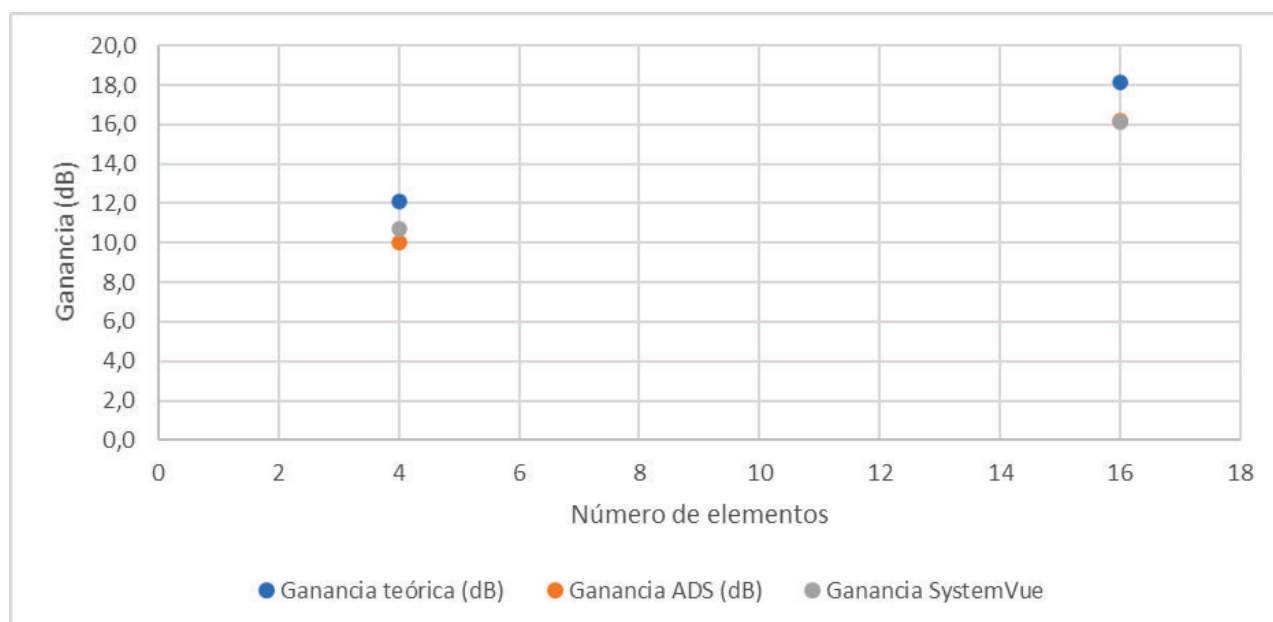


Figura 64. Comparativa ganancias en la recepción.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

El valor de ganancia teórica y de ambos programas para los elementos probados se alejan ligeramente. Esto puede ser debido a que, como ya comentamos, las fórmulas teóricas se cumplen siempre y cuando haya suficiente separación entre elementos, para que no sea posible la influencia entre ellos.

Para modelar el sistema de recepción también hemos de tener en cuenta la G/T. Para ello, primero vamos a obtener la ganancia para unos pocos elementos y realizar la extrapolación de los datos, con el fin de obtener una ecuación que nos de la ganancia para cualquier número de elementos. En la Tabla XV mostramos los resultados obtenidos, y en la Figura 65 la representación gráfica con la ecuación a la que responde estos datos y su coeficiente de determinación. Hay que tener en cuenta que, en este caso, la ecuación es para calcular NxN elementos.

Tabla XV. Ganancia en función de los elementos en la recepción.

Elementos	Ganancia (dB)
4	10,7
16	16,1
100	24,3
256	28,5
625	31,8
2500	38,3
5625	41,7
10000	44,4
22500	46,9

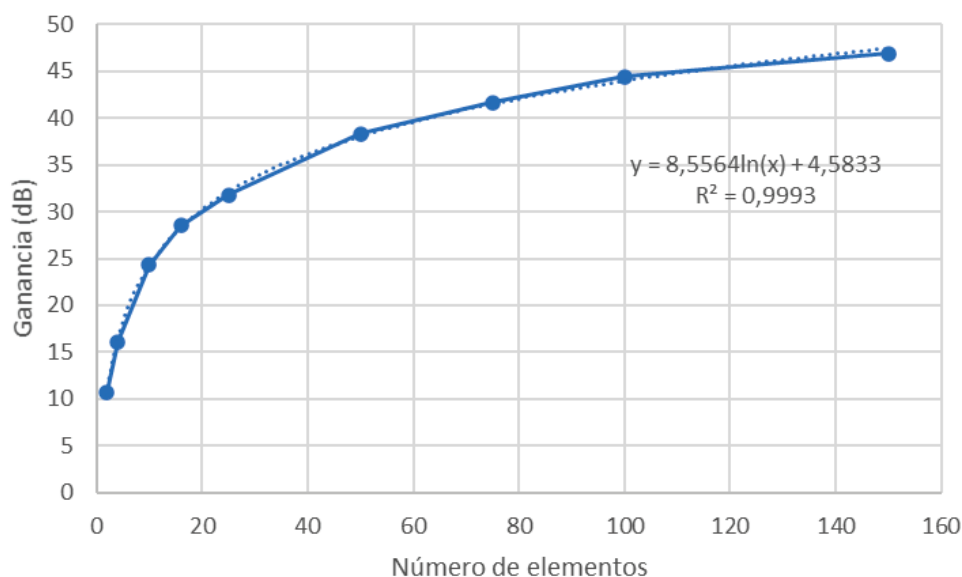


Figura 65. Ganancia en función de los elementos en la recepción.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Para el cálculo del ruido vamos a tener en cuenta dos factores: la temperatura de la antena y la figura de ruido del LNA.

Como ya hemos comentado, la figura de ruido está sujeta a las especificaciones del proyecto, y aplicando la Ecuación (35), obtenemos que la temperatura de ruido del LNA es de 101,2 K.

$$T_p = 290(10^{\frac{NF}{10}} - 1) \quad (35)$$

En el caso de la temperatura de la antena, utilizaremos una estimación para estaciones terrestres, que será de 50 K. Esta aproximación se debe a que la forma analítica de hallarla depende de los ángulos de elevación y azimut, descrita en la Ecuación (36) [40], donde $R(\theta, \phi)$ corresponde al patrón de radiación y $T(\theta, \phi)$ es la distribución de temperatura de la atmósfera. Este ángulo no se mantiene constante durante el día, y la influencia de elementos como el sol o el viento tampoco se mantiene constante, por lo que aplicar la forma analítica en este caso es poco fiable, y el impacto de la temperatura de la antena no es crítico.

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi R(\theta, \phi) T(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi \quad (36)$$

Entonces, el ruido total del sistema corresponde a la suma de la temperatura del LNA y de la antena, haciendo un total de 21,8 dBK, que se mantendrán constantes con respecto al número de elementos.

Al igual que en la transmisión, hemos configurado los *arrays* para configuraciones circular y hexagonal con la finalidad de, en conjunto con la cuadrada, hacer una comparación. En este caso, los valores se reflejan en la Tabla XVI, donde el número de antenas corresponde al número de antenas reales.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Tabla XVI. Ganancia para diferentes disposiciones de elementos en la recepción.

Cuadrado		Circular		Hexagonal	
N.º de elementos	Ganancia (dB)	N.º de elementos	Ganancia (dB)	N.º de elementos	Ganancia (dB)
64	22,4	61	22,6	61	25,9
144	25,8	125	25,8	101	28,6
256	28,3	253	28,9	252	32,5
529	31,4	509	31,8	499	36,5
1024	34,2	1021	34,8	1012	36,8

A partir de estos valores hemos obtenido las gráficas extrapoladas de la Figura 66, Figura 67 y Figura 68, en las que comprobamos, al igual que hicimos en el caso de la transmisión, su coeficiente de determinación es aproximado a uno, siendo una extrapolación perfecta la del *array* cuadrado al tener este valor igual a 1.

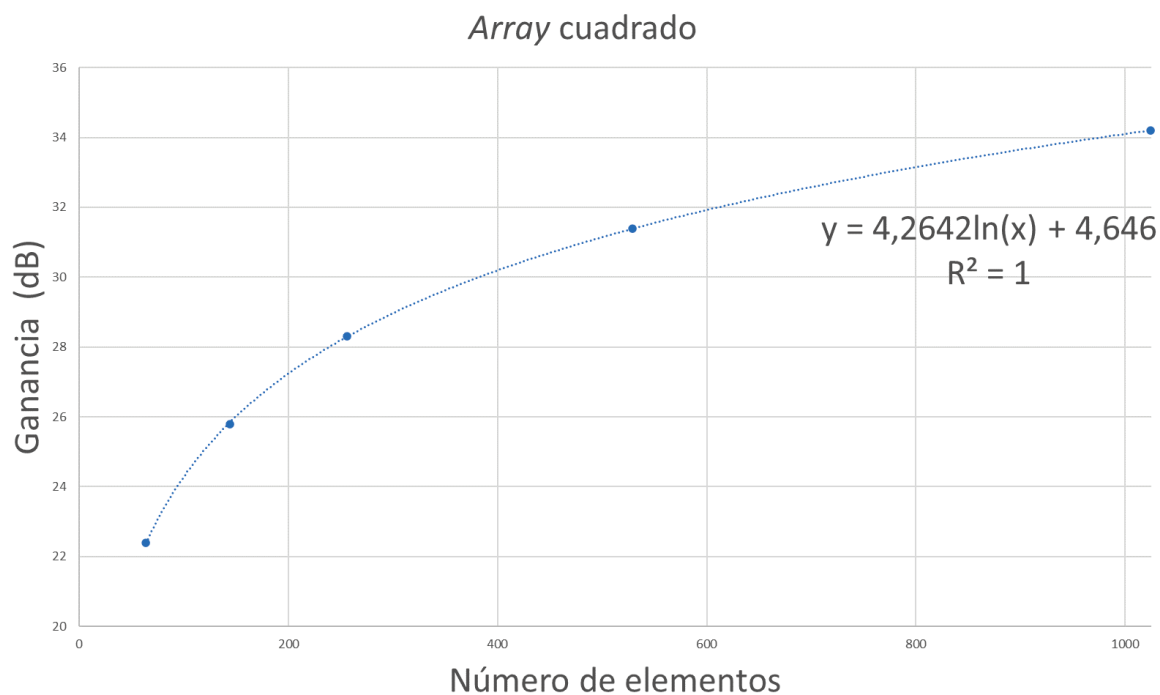


Figura 66. Gráfica array cuadrado de recepción.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

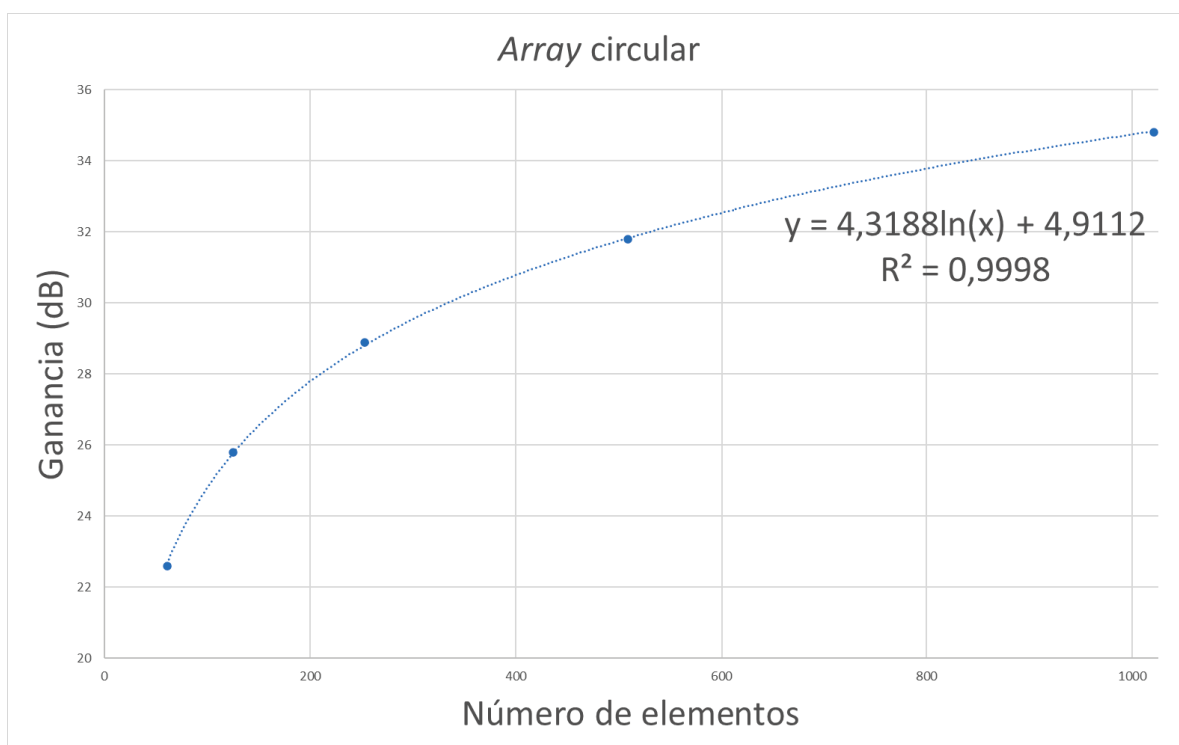


Figura 67. Gráfica array circular de recepción.

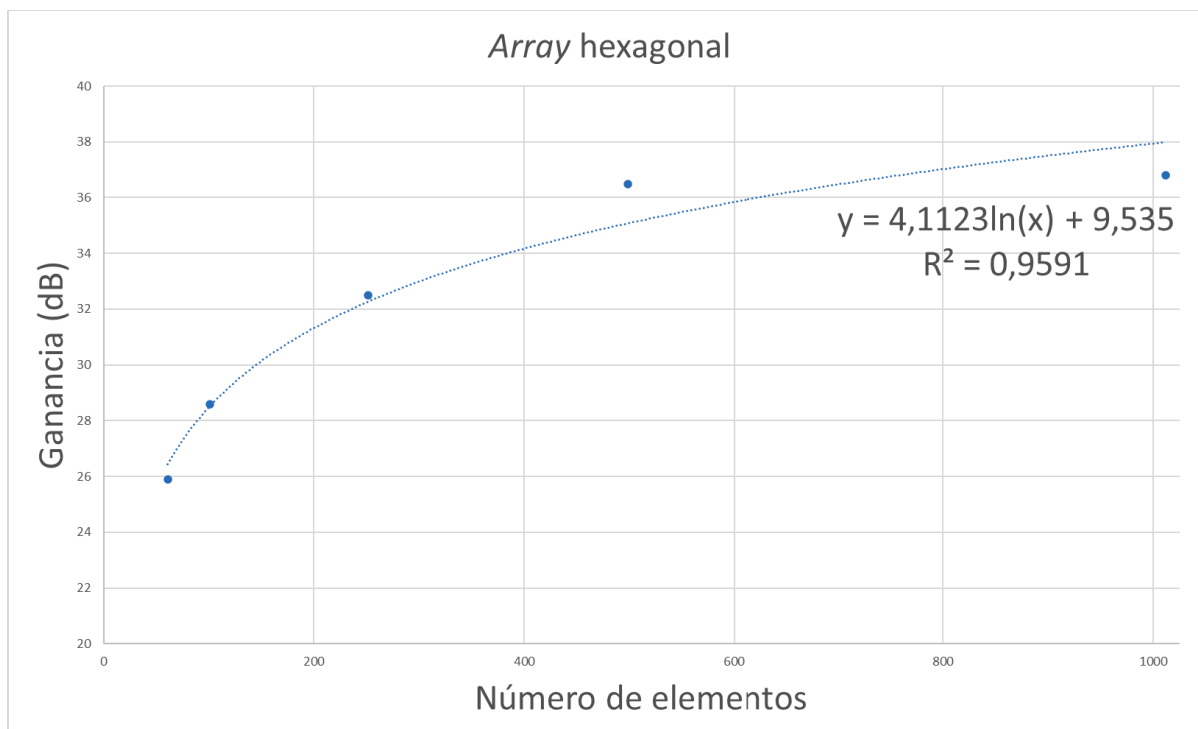


Figura 68. Gráfica array hexagonal de recepción.

Observamos también que obtenemos una mejor ganancia en el caso del *array* en configuración hexagonal seguido de la circular, aunque son configuraciones geométricamente más complejas a la hora fabricar.

4.5 Simulaciones finales recepción

En este caso, primero hemos verificado que los datos que hemos expuesto en el modelado cumplen con las especificaciones del proyecto, que son las recogidas en la Tabla XVII.

Tabla XVII. Especificaciones recepción.

G/T	25 dB/K
G	46 dB
Figura de ruido LNA	1,3 dB
Número de elementos	7500

Por un lado, teniendo en cuenta la aproximación de la temperatura de la antena y la figura de ruido, obtenemos un ruido total de 21,8 dBK.

Por otro lado, y aplicando la Ecuación (37), hemos obtenido 42,7 dB de ganancia, haciendo finalmente una G/T de 20,9 dB/K para nuestra antena utilizando los 7500 elementos. En el caso de querer cumplir con las especificaciones exactas con nuestra antena, podríamos subir la ganancia, y con ello el número de elementos, al ser el valor de la temperatura de la antena fijo. Aplicando la Ecuación (37), obtenemos que, en el caso de una configuración de *array* cuadrada, necesitaríamos unos 16300 elementos.

Posteriormente, y siguiendo con la línea del Capítulo 3, hemos buscado las especificaciones de ganancia de las antenas de recepción para los tres satélites, ya que no tenemos los valores de ruido ni de G/T para el *downlink* del *gateway*. Además, observamos que el valor de la ganancia es el más relevante a la hora del cálculo de número de elementos. En la Tabla XVIII mostramos los valores de las antenas de recepción.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Tabla XVIII. Valores antena de recepción.

Satélite	Ganancia Array (dB) [38]
Telesat	31,8
OneWeb	37,8
SpaceX	40,9

Para ello, primero hemos verificado la potencia a introducir en cada uno de los sistemas con la Ecuación (14), obteniendo los resultados de la Tabla XIX.

Tabla XIX. Potencia entregada a la carga para satélites de referencia.

Satélite	EIRP (dBm) [38]	Frecuencia	Distancia (km) [38]	FSPL	Pérdidas atmosféricas [38]	Ganancia elemento	P_{EL}
SpaceX	69,4	19	2439	-185,76	2,0	6,1	-112,2
OneWeb	68	19	1504	-181,56	2,0	6,1	-109,5
Telesat	64,8	19	1684	-182,54	2,0	6,1	-113,6

Esta potencia es la que hemos introducido en el sistema del *array* de antenas. Además, utilizando la Ecuación (37), hemos estimado el número de elementos necesarios para obtener los valores de ganancia. Finalmente, hemos obtenido, para la ganancia necesaria los valores de elementos recogidos en la

Tabla XX. Elementos obtenidos para satélites de referencia.

Satélite	Ganancia (dBi)	Elementos teóricos	Elementos obtenidos
Telesat	31,8	400	625
OneWeb	37,8	1521	2401
SpaceX	40,9	3025	4900

Al igual que pasó en la transmisión, existe una discrepancia entre los valores teóricos y los obtenidos. Esto se debe al mismo efecto de separación entre los elementos.

4.6 Conclusiones

Ya diseñada la antena y el *array* de transmisión, hemos replicado los pasos para obtener ambos en el caso de la recepción.

Hemos elegido un sustrato más adecuado para la antena de recepción, la hemos diseñado en ADS y hemos realizado pruebas sobre dos *array* de poco tamaño.

Ya completados todos los pasos en ADS, mediante el programa EMPro hemos obtenido los valores para trabajar en SystemVue, realizando simulaciones de varios *array* de distintas formas y tamaños.

Hemos alcanzado las especificaciones de potencia de recepción y número de elementos para las tres constelaciones de satélites LEO que hemos trabajado a lo largo de este documento.

Finalizado este capítulo, damos por terminado el *array* de recepción. En el Capítulo 5 daremos nuestras conclusiones del proyecto, dando por finalizado este TFM.

Capítulo 5. Conclusiones y líneas futuras

5.1 Conclusiones

Una vez finalizado las simulaciones finales tanto para transmisión como para recepción, vamos a analizar los diferentes resultados obtenidos.

El objetivo de este proyecto era el análisis y diseño de *arrays* de antenas en fase para constelaciones de satélites LEO, esto es, usar la banda de frecuencia de 17,8 – 20,2 GHz para la recepción y 27,5 – 30 GHz para la transmisión.

Para el diseño hemos elegido dos sustratos de Taconic, en el caso de la transmisión elegimos TLX-8 y para la recepción TLY-5. Esto se debe a las frecuencias a las que estamos trabajando. Una vez definido el material y el sustrato, hemos diseñado sobre *layout* la antena en ADS.

Ya teniendo la antena simulada, hemos procedido a modelar los *arrays* de transmisión y recepción. En ADS hemos simulado dos *arrays* de pocos elementos para verificar el funcionamiento, para posteriormente pasar a SystemVue. Hemos precisado de una herramienta intermedia para obtener el patrón de radiación de las antenas, EMPro.

Seguidamente hemos modelado *arrays* para diferentes configuraciones de los elementos: cuadrada, circular y hexagonal. La comparación de los resultados obtenidos para la transmisión lo mostramos en la Figura 70, mientras que para la recepción en la Figura 71. En ninguno de los casos el *array* en forma cuadrada es el más eficiente para conseguir prestaciones, pero sí es la solución más sencilla de abordar a nivel de fabricación.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

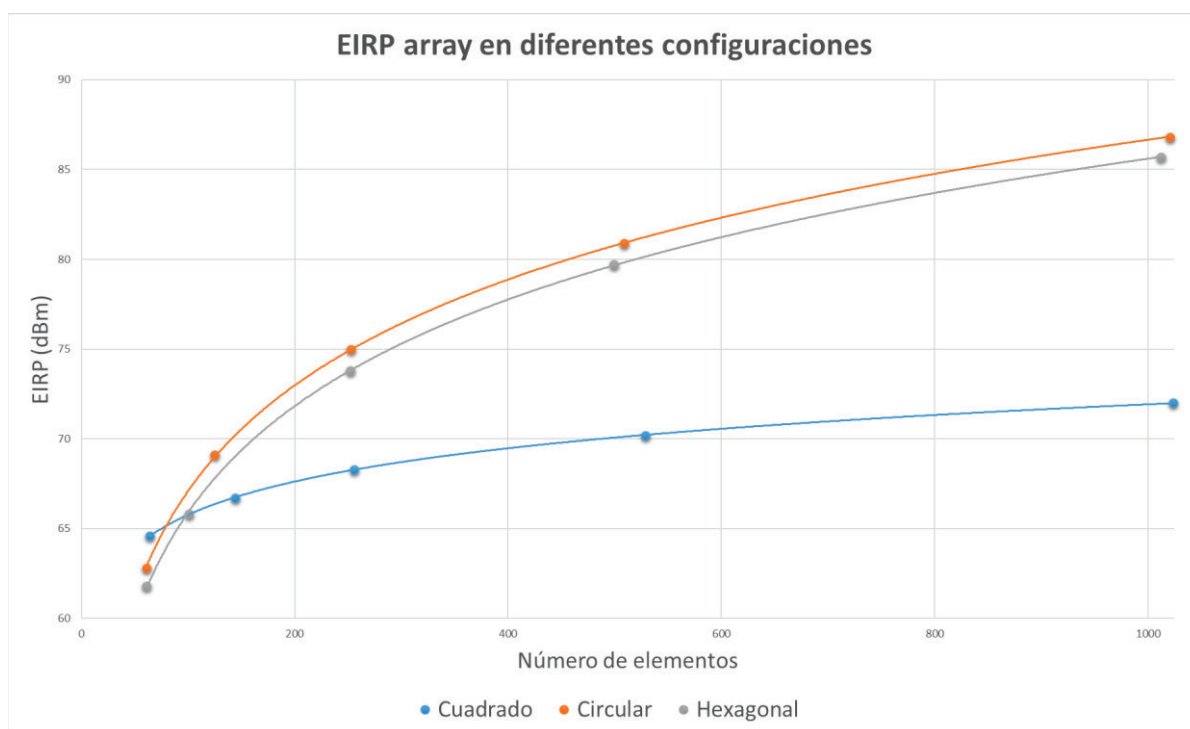


Figura 70. Comparación configuraciones de transmisión.

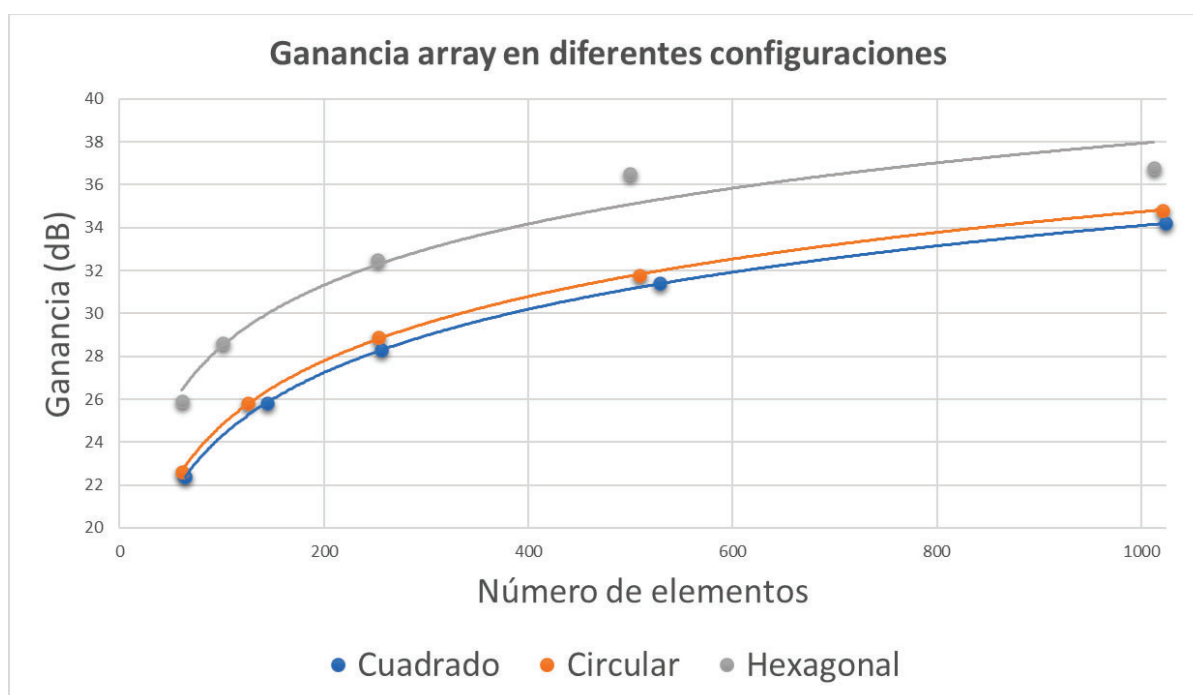


Figura 71. Comparación configuraciones de recepción.

Finalmente, hemos obtenido el número de elementos para transmisión y para recepción de tres constelaciones de satélites operativos: SpaceX, OneWeb y Telesat. En la Tabla XXI recogemos los datos con mayor relevancia a la hora del dimensionado del *array* de antenas para estos.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA
CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

Tabla XXI. Tabla resumen especificaciones satélites operativos.

	Transmisión			Recepción	
	EIRP (dBW)	Número de Elementos	Sensibilidad (dBm)	Ganancia (dBi)	Número de Elementos
SpaceX	68,4	4500	-112,2	40,9	4900
OneWeb	63,2	1700	-109,5	37,8	2401
Telesat	75,9	18500	-113,6	31,8	625

5.2 Líneas futuras

Continuando con la línea del proyecto, en el futuro podríamos proceder a la fabricación y medida de las antenas. Los materiales indicados tanto para la transmisión como para la recepción son materiales con valores reales obtenidos de la Guía de Selección de Productos de Taconic [34] [39]. Este proceso de fabricación de las antenas se abordaría como un proceso de fabricación de PCB (*Printed Circuit Board*) multicapa.

Una forma para aumentar el ancho de banda, y con efectos despreciables sobre la ganancia, los patrones de radiación y la adaptación de la impedancia es añadir un parche parásito adicional sobre cada antena, lo cual sería una opción para considerar si queremos hacer uso de dieléctricos más finos [41]. En la Figura 72 mostramos un *array* fabricado junto a parches parásitos.

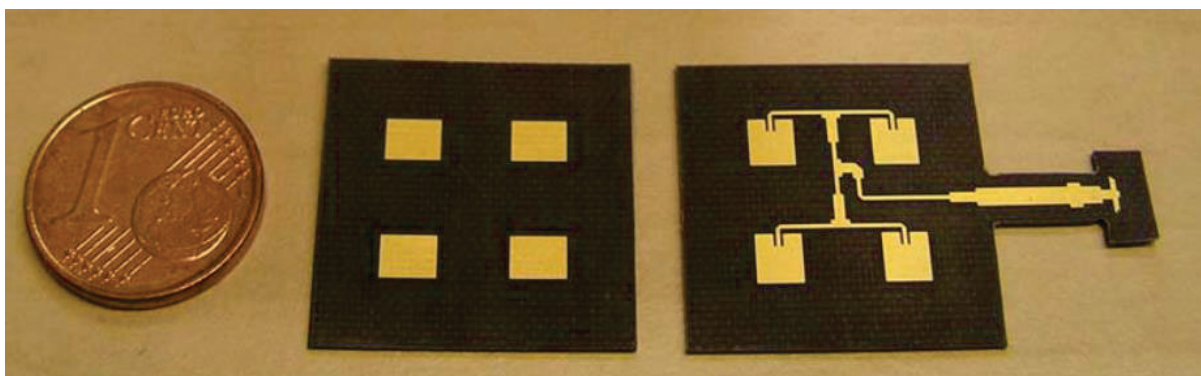


Figura 72. Array de antenas 2x2 fabricado con parche parásito [41].

Otra posibilidad de continuación es el diseño de circuitos para la tecnología de *arrays* de antenas en fase. Como hemos visto tanto en el esquema de transmisión como en el de recepción, el sistema necesita de diversos dispositivos para funcionar, como podría ser los desplazadores de fase o los divisores de potencia. En este caso, se abordaría desde el diseño del esquema y el *layout* de cada uno de los dispositivos. Una vez realizada esta tarea de diseño, se podría proceder a la fabricación y medida de estos dispositivos. En la Figura 73 vemos un ejemplo de sistema final, con los chips correspondientes para la transmisión o recepción, la alimentación de las antenas y los divisores de potencia Wilkinson entre otros.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA
CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

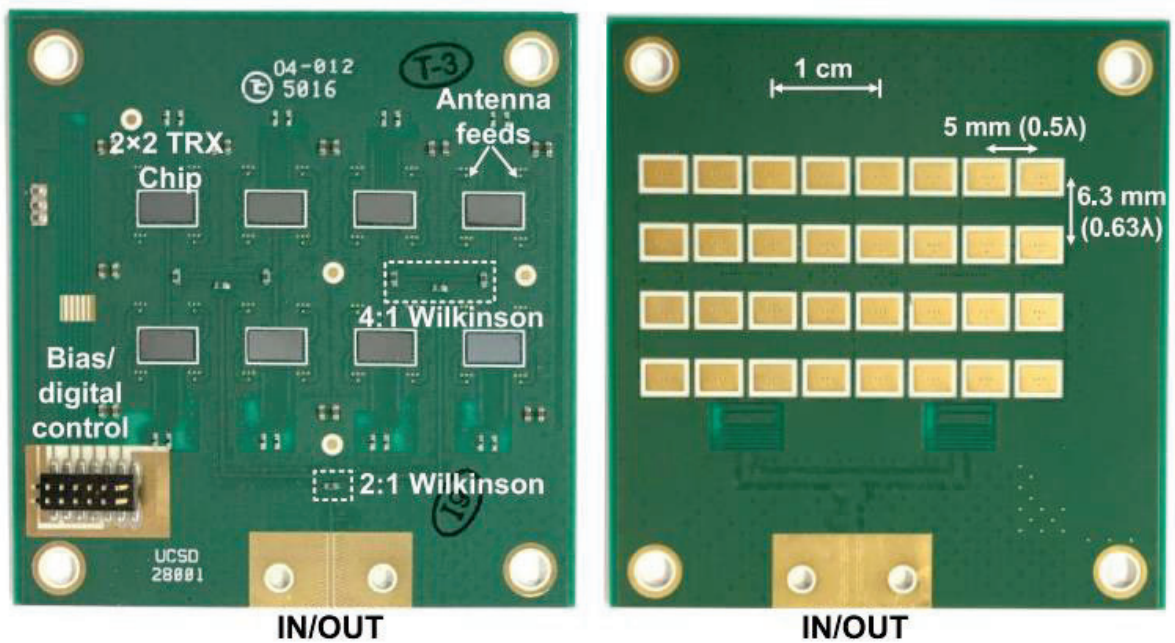


Figura 73. Sistema final para comunicaciones con array de antenas en fase [42].

Referencias

- [1] I. Leyva-Mayorga, B. Soret, M. Röper, D. Wübben, A. Dekorsy, and P. Popovski, "LEO Small-Satellite Constellations for 5G and Beyond-5G Communications."
- [2] ESA, "Low Earth orbit." .
- [3] R. Zhang, Y. Ruan, Y. Li, and C. Liu, "Interference-aware radio resource management for cognitive high-throughput satellite systems," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 1, pp. 1–14, 2020, doi: 10.3390/s20010197.
- [4] "Bandas de frecuencia satelital Ku y Ka - Comunicación Satelital." .
- [5] M. Schefer, "What Makes Ka-band Systems Tick? | Microwaves & RF," 2018. .
- [6] Gothenburg, "ECC REPORT 152 THE USE OF THE FREQUENCY BANDS 27.5-30.0 GHz AND 17.3-20.2 GHz BY SATELLITE NETWORKS," 2010.
- [7] T. Kadyrov, "Non-geostationary satellite systems and networks," 2020.
- [8] T. Kadyrov, "Workshop on the Efficient Use of the Orbit/Spectrum Resource," 2017.
- [9] J. Gilsenan, "Promoting a Competitive and Innovative Satellite Telecommunications Marketplace," 2015.
- [10] A. Aguilar *et al.*, "Tradespace exploration of the next generation communication satellites," 2019, doi: 10.2514/6.2019-0768.
- [11] "Kepler Communications Inc." .
- [12] "DRAFT ICAO TECHNICAL SPECIFICATION FOR AERONAUTICAL MOBILE SATELLITE (ROUTE) SERVICE (AMS(R)S) PROVIDED BY IRIDIUM SATELLITE SYSTEM."
- [13] M. E. Hines and W. Harold, "Phased *Array* Antennas," 1978. .
- [14] "Antenas en fase - Wikipedia, la enciclopedia libre." .
- [15] S. L. (WIMMIC) Wireless Innovative MMIC, "Memoria técnica Proyecto Acorán."
- [16] P. F. M. J. S. H. S.-N. S. Mousavi, "The phased *array* antenna system mounted on a test vehicle. | Download Scientific Diagram," 2009. .
- [17] R. C. Jelinek, Carl O., Drago, Daniel W., Dempsey, "Phased *array* antenna system using polarization phase shifting," 1994. .
- [18] ELE Times, "Antenna *Array* Testing - Conducted and Over the Air: The Way to 5G - ELE Times," Feb. 2017. .
- [19] "Antenna Patterns and Their Meaning - Cisco." .

ANÁLISIS Y DISEÑO DE ARRAYS DE ANTENAS EN FASE PARA CONSTELACIONES DE SATÉLITES LEO

- [20] H. Schmid, "Antenna theory and design," *Helv. Chim. Acta*, vol. 1, no. 30, pp. 255–262, 1967.
- [21] Kymeta Corporation, "Link Budget Calculations for a Satellite Link With an Electronically Steerable Antenna Terminal," no. June, pp. 1–23, 2019.
- [22] Juan Córcoles Ortega, "Diseño de antenas de tipo parche para un transceptor WiMAX basado en el chip Agradecimientos," 2014.
- [23] "IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas," *IEEE No 145-1973*, pp. 1–18, 1973, doi: 10.1109/IEEESTD.1973.7366738.
- [24] Hubregt J. Visser, *Array and Phased Array Basics*. 2005.
- [25] S. Kashyap and U. Raithatha, "Microstrip Patch Antenna Parameters, Feeding Techniques & Shapes of the Patch – A Survey," *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 6, 2015.
- [26] "Antenas FPV 5.8GHz para Drones de Carreras." .
- [27] "Microwaves101 | S-parameters." .
- [28] "What are S-Parameters? - everything RF." .
- [29] "Effective radiated power - Wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Effective_radiated_power (accessed Mar. 20, 2021).
- [30] "Antenna gain-to-noise-temperature - Wikipedia." https://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_gain-to-noise-temperature (accessed May 17, 2021).
- [31] "Phased Array Antennas."
- [32] W. Shin, "UC San Diego UC San Diego Electronic Theses and Dissertations Title Millimeter-wave Wafer-Scale Phased Arrays and Wireless Communication Circuits and Systems in SiGe and CMOS Technology," 2013. Accessed: Mar. 20, 2021. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/0zm481p7>.
- [33] "Atmospheric Effects Atmospheric Effects Attenuation by Atmospheric Gases."
- [34] Taconic, "TLX Family of High Volume Fiberglass Reinforced Microwave Substrat."
- [35] 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," *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 23, pp. 17444–17449, 2015.

- [36] S. Sharma, C. C. Tripathi, and R. Rishi, "Impedance Matching Techniques for Microstrip Patch Antenna," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 28, pp. 1–16, Feb. 2017, doi: 10.17485/ijst/2017/v10i28/97642.
- [37] B. C. Brock, "The application of taylor weighting, digital phase shifters, and digital attenuators to phased-*array* antennas.," Albuquerque, NM, and Livermore, CA, Mar. 2008. doi: 10.2172/932884.
- [38] I. del Portillo, B. G. Cameron, and E. F. Crawley, "A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband," *Acta Astronaut.*, vol. 159, no. February, pp. 123–135, 2019, doi: 10.1016/j.actaastro.2019.03.040.
- [39] Taconic, "TLY Family of Low Loss Laminates," no. 602.
- [40] "Lecture 7: Antenna Noise Temperature and System Signal-to-Noise Ratio."
- [41] D. Wolansky, P. Vsetula, J. Puskely, and Z. Raida, "Broadband small patch antenna *array* for Ka-band application," *2013 7th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2013*, pp. 907–910, 2013.
- [42] K. Kibaroglu, M. Sayginer, and G. M. Rebeiz, "A Low-Cost Scalable 32-Element 28-GHz Phased *Array* Transceiver for 5G Communication Links Based on a Beamformer Flip-Chip Unit Cell," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 53, no. 5, pp. 1260–1274, 2018, doi: 10.1109/JSSC.2018.2791481.

Anexos

HARMONIC BALANCE

HarmonicBalance
HB1
Freq[1]=FC
Order[1]=5

PARAMETER SWEEP

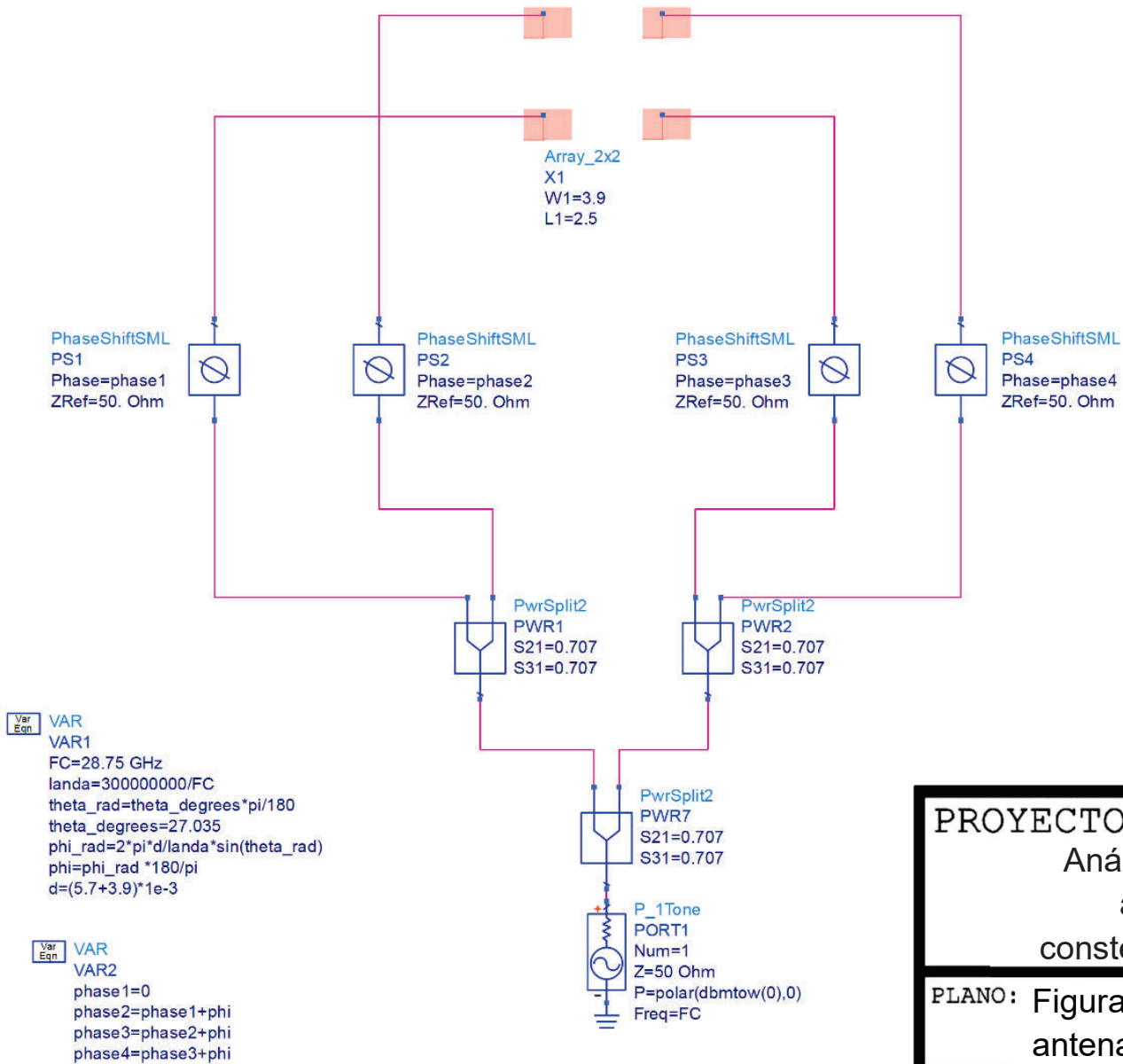
ParamSweep
Sweep1
SweepVar="theta_degrees"
SimInstanceName[1]="HB1"
SimInstanceName[2]=
SimInstanceName[3]=
SimInstanceName[4]=
SimInstanceName[5]=
SimInstanceName[6]=
Start=-45
Stop=45
Step=15

S-PARAMETERS

S_Param
SP1
Start=20 GHz
Stop=40 GHz
Step=250 MHz

NETLIST INCLUDE

NetlistInclude
PinVoltageOutputPlan



PROYECTO: Análisis y diseño de <i>array</i> de antenas en fase para constelaciones de satélites LEO		
PLANO: Figura 74. Esquema <i>array</i> de antenas 2x2 para transmisión.		
AUTOR:		
ESCALA:	FECHA:	Nº 1

HARMONIC BALANCE

HarmonicBalance
HB1
Freq[1]=FC
Order[1]=5

PARAMETER SWEEP

ParamSweep
Sweep1
SweepVar="theta_degrees"
SimInstanceName[1]="HB1"
SimInstanceName[2]=
SimInstanceName[3]=
SimInstanceName[4]=
SimInstanceName[5]=
Start=-45
Stop=15
Steps=15

S-PARAMETERS

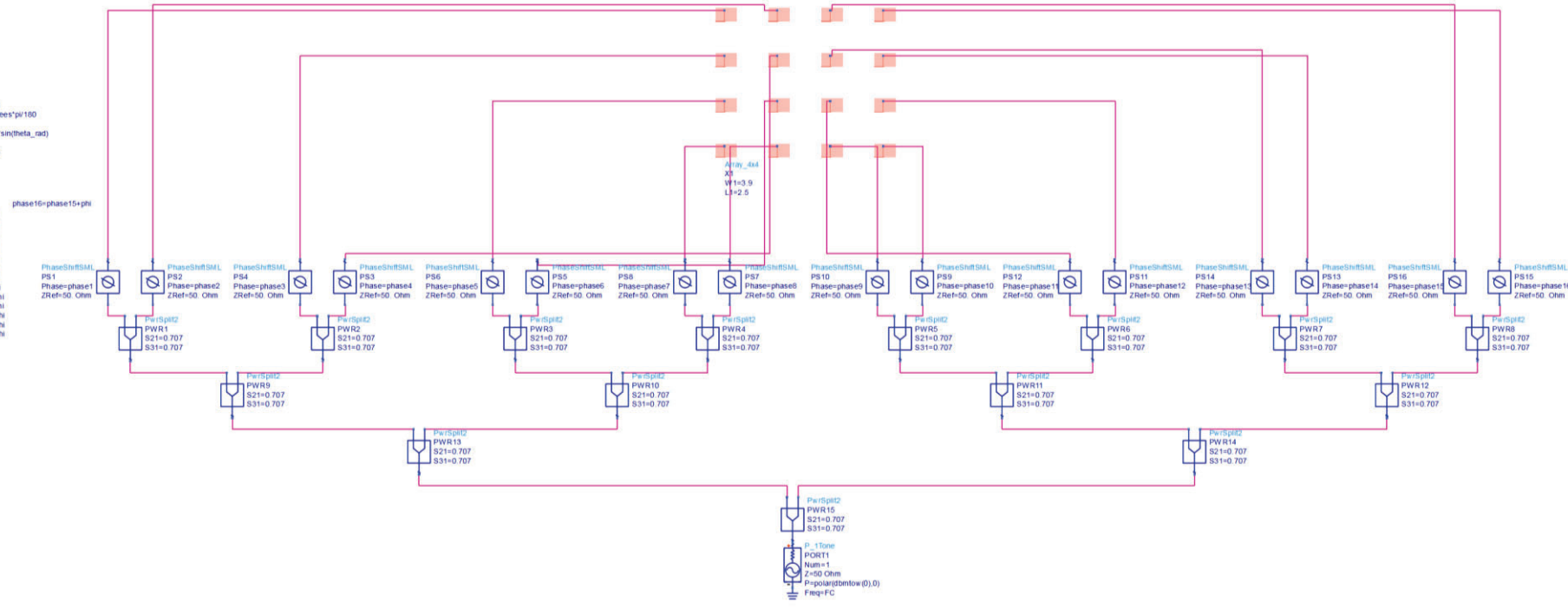
S_Param
SP1
Start=20 GHz
Stop=40 GHz
Step=250 MHz

NETLIST INCLUDE

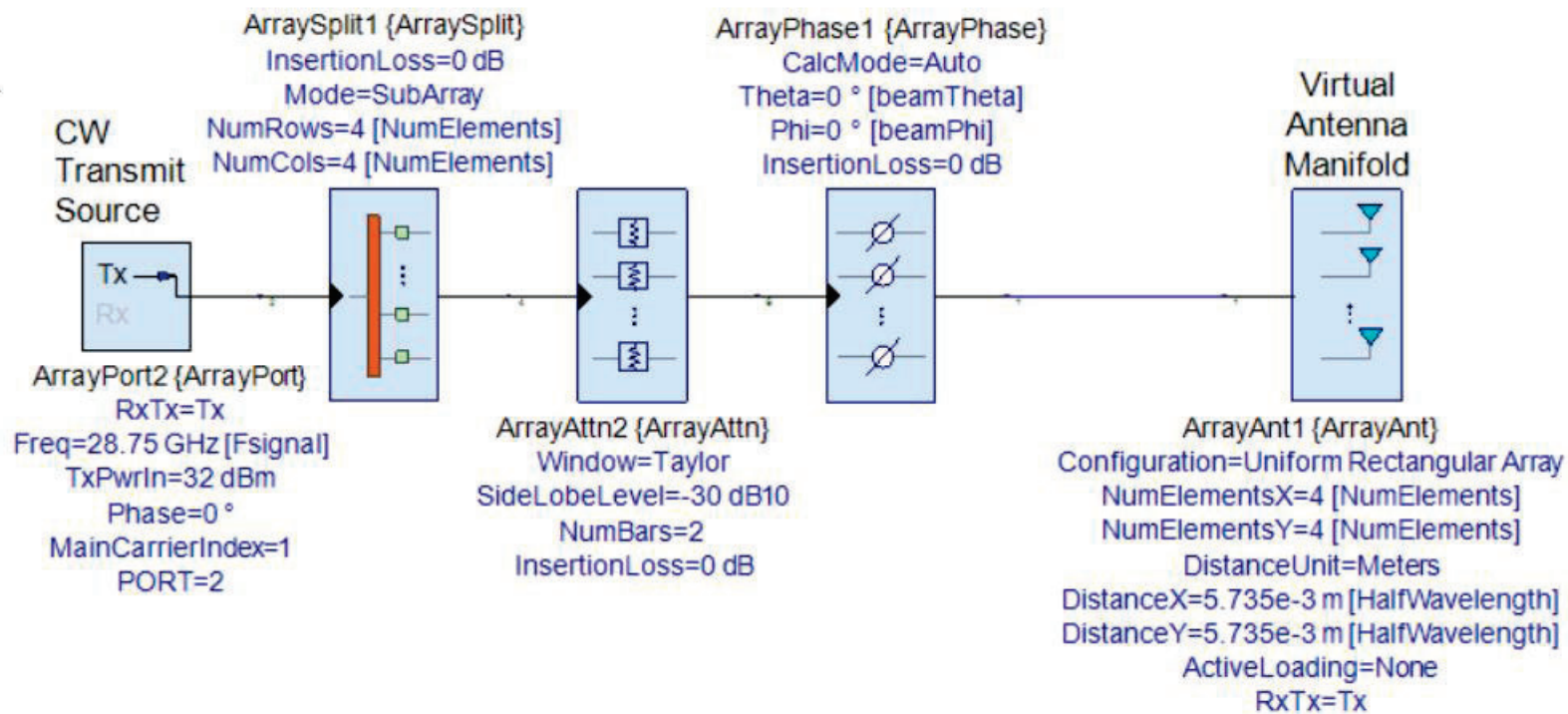
NetlistInclude
PerVoltageOutputPlan

VAR
VAR1
FC=19 GHz
lambda=300000000/FC
theta_rad=theta_degrees*pi/180
theta_degrees=25
phi_rad=2*pi*lambda*asin(theta_rad)
phi=phi_rad/180deg
d=(5.74+3.95271e-3

VAR
VAR2
phase1=0
phase2=phase1+phi
phase3=phase2+phi
phase4=phase3+phi
phase5=phase4+phi
phase6=phase5+phi
phase7=phase6+phi
phase8=phase7+phi
phase9=phase8+phi
phase10=phase9+phi
phase11=phase10+phi
phase12=phase11+phi
phase13=phase12+phi
phase14=phase13+phi
phase15=phase14+phi



PROYECTO: Análisis y diseño de <i>array</i> de antenas en fase para constelaciones de satélites LEO		
PLANO: Figura 75. Esquema array de antenas 4x4 para transmisión.		
AUTOR: Irene Merino Fernández		
ESCALA:	FECHA:	N° 2



PROYECTO:

Análisis y diseño de *array* de antenas en fase para constelaciones de satélites LEO

PLANO: Figura 76. Array de antenas para transmisión.

AUTOR:

Irene Merino Fernández

ESCALA:

FECHA:

Nº

HARMONIC BALANCE

HarmonicBalance
 HB1
 Freq[1]=FC
 Order[1]=5

PARAMETER SWEEP

ParamSweep
 Sweep1
 SweepVar="theta_degrees"
 SimInstanceName[1]="HB1"
 SimInstanceName[2]=
 SimInstanceName[3]=
 SimInstanceName[4]=
 SimInstanceName[5]=
 SimInstanceName[6]=
 Start=-45
 Stop=45
 Step=15

S-PARAMETERS

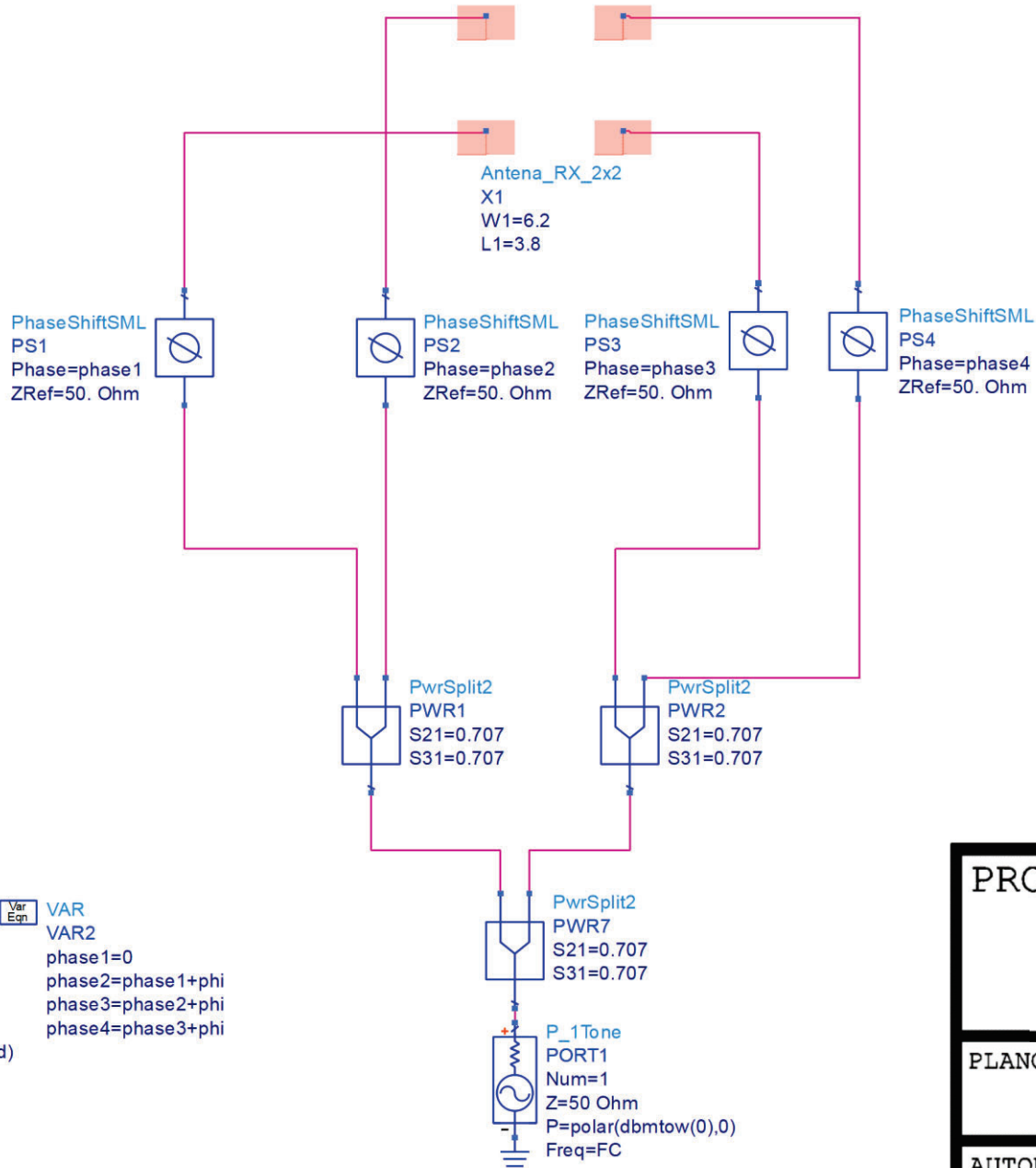
S_Param
 SP1
 Start=20 GHz
 Stop=40 GHz
 Step=250 MHz

NETLIST INCLUDE

NetlistInclude
 PinVoltageOutputPlan

Var Eqn VAR
 VAR1
 FC=19 GHz
 lambda=300000000/FC
 theta_rad=theta_degrees*pi/180
 theta_degrees=25
 phi_rad=2*pi*d/lambda*sin(theta_rad)
 phi=phi_rad *180/pi
 d=(8.7+6.2)*1e-3

Var Eqn VAR
 VAR2
 phase1=0
 phase2=phase1+phi
 phase3=phase2+phi
 phase4=phase3+phi



PROYECTO:
 Análisis y diseño de *array* de antenas en fase para constelaciones de satélites LEO

PLANO: Figura 77. Esquema array de antenas 2x2 para recepción.

AUTOR:
 Irene Merino Fernández

ESCALA:

FECHA:

N°
 4

HARMONIC BALANCE

HarmonicBalance
HB1
Freq1=FC
Order1=5

PARAMETER SWEEP

ParamSweep
Sweep1
SweepVar="theta_degrees"
SimInstanceName1="HB1"
SimInstanceName2=""
SimInstanceName3=""
SimInstanceName4=""
SimInstanceName5=""
SimInstanceName6=""
Start=45
Step=15

S-PARAMETERS

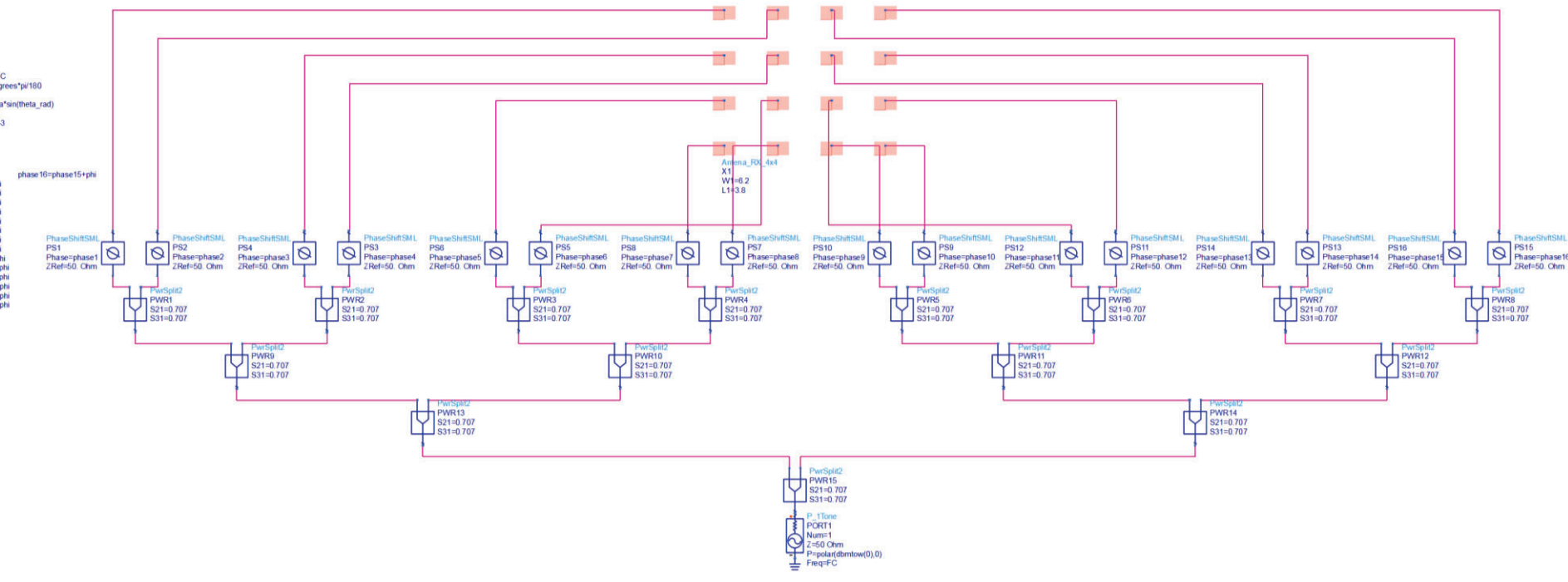
S_Param
SP1
Start=20 GHz
Stop=40 GHz
Step=250 MHz

NETLIST INCLUDE

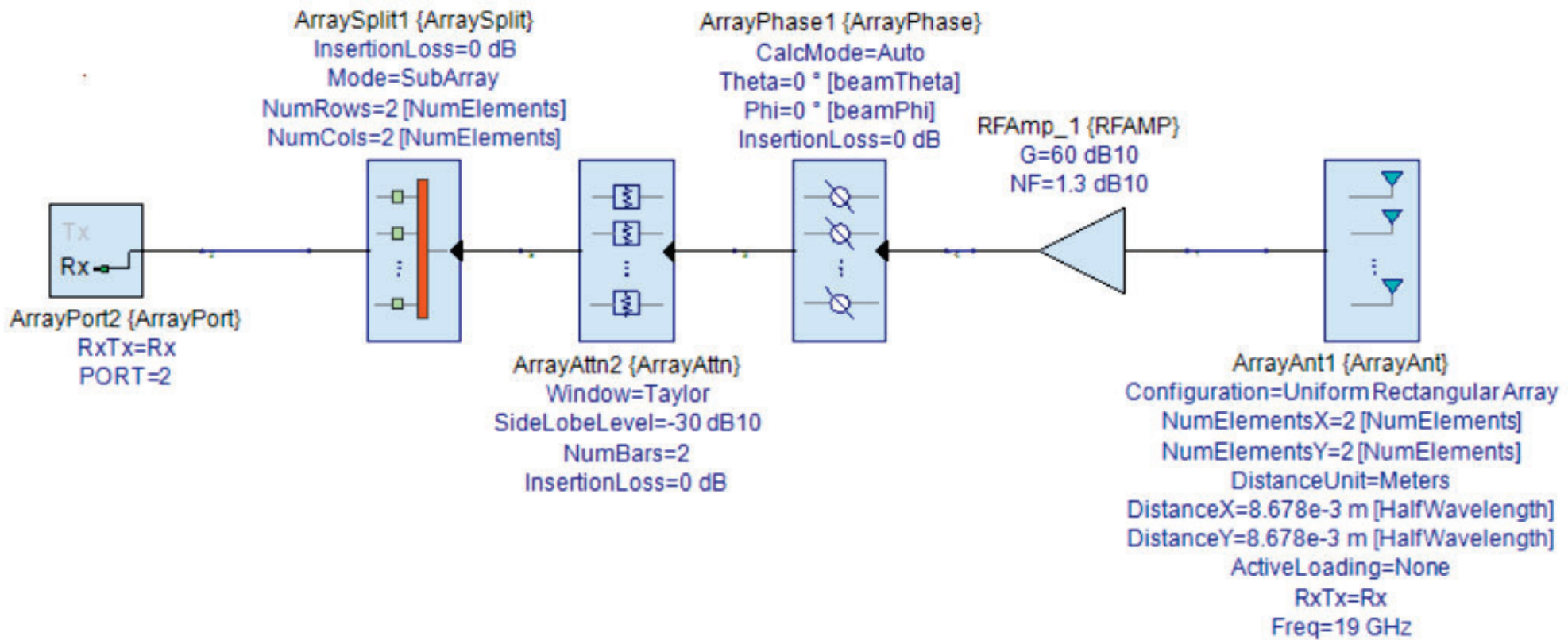
NetlistInclude
PinVoltageOutputPlan

VAR
VAR1
FC=19 GHz
lанда=30000000/FC
theta_rad=theta_degrees*pi/180
theta_degrees=25
phi_rad=2*pi*lанда*sin(theta_rad)
phi=phi_rad*180/pi
d=(6.74+3.95*2)*1e-3

VAR
VAR2
phase1=0
phase2=phase1+phi
phase3=phase2+phi
phase4=phase3+phi
phase5=phase4+phi
phase6=phase5+phi
phase7=phase6+phi
phase8=phase7+phi
phase9=phase8+phi
phase10=phase9+phi
phase11=phase10+phi
phase12=phase11+phi
phase13=phase12+phi
phase14=phase13+phi
phase15=phase14+phi
phase16=phase15+phi



PROYECTO: Análisis y diseño de <i>array</i> de antenas en fase para constelaciones de satélites LEO		
PLANO: Figura 78. Esquema array de antenas 4x4 para recepción.		
AUTOR: Irene Merino Fernández		
ESCALA:	FECHA:	N° 5



PROYECTO:

Análisis y diseño de *array* de antenas en fase para constelaciones de satélites LEO

PLANO: Figura 79. Array de antenas para recepción.

AUTOR:

Irene Merino Fernández

ESCALA:

FECHA:

N°

6