

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos de Autor.

CICESE © 2023, Todos los Derechos Reservados, CICESE

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California



Maestría en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones

Arreglos de antenas para radiación tipo Isoflux en satélites LEO con diferentes alturas orbitales

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Paulina Díaz De la Paz

Ensenada, Baja California, México

2023

Tesis defendida por

Paulina Díaz De la Paz

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza

Codirector de tesis

Dr. Roberto Conte Galván

Codirector de tesis

Dr. Jorge Enrique Preciado Velasco

Dr. Jorge Torres Rodríguez



Dra. María del Carmen Maya Sánchez

Coordinadora del Posgrado en Electrónica y Telecomunicaciones

Dra. Ana Denise Re Araujo

Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta Paulina Díaz De la Paz como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones.

Arreglos de antenas para radiación tipo Isoflux en satélites LEO con diferentes alturas orbitales

Resumen aprobado por:

Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza

Codirector de tesis

Dr. Roberto Conte Galván

Codirector de tesis

En los últimos años, las constelaciones de satélites en órbita baja han ganado popularidad como infraestructura para ofrecer el servicio de Internet satelital, y se espera que su presencia siga en aumento. Para minimizar la latencia en la transmisión de datos, estos satélites suelen situarse en el rango inferior y medio de la órbita baja terrestre. Comúnmente, los satélites de estas constelaciones emiten una radiación que consiste en un único haz que concentra la potencia en una sola dirección. Sin embargo, debido a la curvatura de la Tierra, las ondas electromagnéticas radiadas por el arreglo de antenas abordo del satélite viajan distancias diferentes. Las ondas que se desplazan en dirección del nadir del satélite hacen un recorrido más corto en comparación con las que se propagan en las direcciones más distantes a este. Este fenómeno ocasiona pérdidas de potencia en los bordes del área de cobertura. Para compensar estas pérdidas, se propone el uso de arreglos de antenas de radiación tipo Isoflux. Estos arreglos distribuyen la densidad de potencia de manera uniforme en el área de cobertura, aumentando la ganancia en direcciones donde el trayecto es más largo. Lograr este tipo de radiación para satélites en órbita baja se vuelve más desafiante. Debido a la proximidad del satélite a la Tierra, es necesario que la radiación se extienda sobre una gran parte del plano de elevación, requiriendo un haz Isoflux que sobrepasa los 100 grados. Esta tesis presenta 18 diseños de arreglos de antenas para satélites en las alturas orbitales de 340 km, 550 km y 1150 km. Para el diseño de estos arreglos, se emplean las geometrías lineales, planares y anillos concéntricos, tanto periódicas como aperiódicas. La distribución de excitaciones de amplitud y la separación entre elementos de antena se optimizan utilizando algoritmos genéticos. La presente tesis incluye un análisis comparativo de las prestaciones de radiación y cantidad de elementos de los diseños presentados, categorizados por altura orbital.

Palabras clave: arreglos de antenas, radiación Isoflux, satélites LEO, algoritmos genéticos

Abstract of the thesis presented by Paulina Díaz De la Paz as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Telecommunications.

Antenna arrays for Isoflux radiation in LEO satellites at various orbital altitudes

Abstract approved by:

Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza

Thesis Co-Director

Dr. Roberto Conte Galván

Thesis Co-Director

In recent years, the utilization of low-Earth orbit satellite constellations as infrastructure for providing satellite Internet services has experienced substantial growth. The rise of this trend is likely to continue. These satellites are typically placed in the lower to mid-range of low-Earth orbit in order to reduce latency in data transmission. It is common for the antenna arrays on these satellites to emit a single radiation beam that concentrates power in a singular direction. Due to the curvature of the Earth, the electromagnetic waves radiated by the antenna array travel different distances. Waves traveling in the satellite's nadir direction cover a shorter distance compared to those propagating in more distant directions. This phenomenon causes power losses at the edges of the coverage area. To compensate for these losses, the use of Isoflux radiation antenna arrays is proposed. These arrays distribute the power density evenly across the coverage area, increasing gain in directions where the path is longer. Achieving such radiation characteristics becomes more difficult for low-Earth orbit satellites. Due to the satellite's proximity to Earth, radiation needs to extend over a large portion of the elevation plane, requiring an Isoflux beam that exceeds 100 degrees. This thesis presents 18 antenna array designs for satellites at the orbital altitudes of 340 km, 550 km, and 1150 km. Linear, planar, and concentric ring geometries are employed, with both periodic and aperiodic antenna element distributions. The distribution of amplitude excitations and the spacing between antenna elements are optimized using genetic algorithms. This thesis includes a comparative analysis of the radiation performance and the number of elements of the presented designs, categorized by orbital altitude.

Keywords: antenna arrays, Isoflux radiation, LEO satellites, genetic algorithms

Dedicatoria

A mis padres, Erika y Ramón, y a mi hermano, Ramón.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado en su institución.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

A mis asesores de tesis, el Dr. Marco Panduro y el Dr. Roberto Conte, por su constante apoyo, guía y paciencia a lo largo de este proceso.

A los miembros de mi comité de tesis, el Dr. Jorge Preciado y el Dr. Jorge Torres, por la retroalimentación que fortaleció mi trabajo de investigación.

A mi familia y amigos, por su apoyo incondicional en todos los proyectos que emprendo.

A mi novio, Alfredo Salazar, por estar ahí para mí durante todo este proceso, a pesar de la distancia que nos separa.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xi
Capítulo 1. Introducción	
1.1. Antecedentes	1
1.2. Análisis del estado del arte	2
1.3. Planteamiento del problema	4
1.4. Justificación	7
1.5. Objetivos	8
1.5.1. Objetivo general	8
1.5.2. Objetivos específicos	8
1.6. Organización de la tesis	9
Capítulo 2. Satélites	
2.1. Historia de las constelaciones de satélites	10
2.2. Órbitas de los satélites artificiales	12
2.3. Máscara de radiación Isoflux para varias alturas orbitales	14
2.4. Conclusiones	18
Capítulo 3. Arreglos de antenas	
3.1. Diagrama de radiación	19
3.2. Variables de diseño	20
3.2.1. Excitaciones de amplitud	21
3.2.1.1. Rango dinámico	23
3.2.2. Posición de los elementos de antena	23
3.3. Factor de arreglo	25
3.4. Arreglo lineal	26
3.5. Arreglo planar	27
3.6. Arreglo de anillos concéntricos	28
3.7. Conclusiones	29
Capítulo 4. Metodología de diseño de sistemas de radiación tipo Isoflux	
4.1. Algoritmos genéticos	31
4.2. Implementación de los arreglos de antenas	34
4.2.1. Arreglo lineal	35
4.2.2. Arreglo planar	36
4.2.3. Arreglo de anillos concéntricos	36

4.3.	Función objetivo	38
4.4.	Proceso de diseño	39
4.5.	Conclusiones	40
Capítulo 5. Resultados		
5.1.	Órbita 340 km	42
	5.1.1. Arreglo lineal	42
	5.1.2. Arreglo planar	45
	5.1.3. Arreglo de anillos concéntricos	47
5.2.	Órbita 550 km	49
	5.2.1. Arreglo lineal	51
	5.2.2. Arreglo planar	53
	5.2.3. Arreglo de anillos concéntricos	55
5.3.	Órbita 1150 km	58
	5.3.1. Arreglo lineal	58
	5.3.2. Arreglo planar	59
	5.3.3. Arreglo de anillos concéntricos	62
5.4.	Análisis de resultados	65
5.5.	Conclusiones	67
Capítulo 6. Conclusiones		
6.1.	Conclusiones generales	69
6.2.	Aportaciones	70
6.3.	Trabajo a futuro	70
Literatura citada		72
Anexos		76

Lista de figuras

Figura	Página
1. Cobertura de la Tierra por un sistema de radiación direccional	5
2. Cobertura de la Tierra por un sistema de radiación Isoflux	5
3. Comparación de máscaras Isoflux para diferentes alturas orbitales LEO	6
4. Representación gráfica de la constelación de 27 satélites del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por las siglas en inglés de Global Positioning System)	11
5. Descripción de las órbitas GEO, MEO y LEO	13
6. Representación gráfica del modelo elipsoidal de la Tierra	14
7. Iluminación electromagnética sobre el ecuador terrestre	15
8. Máscara de radiación Isoflux para una altura orbital de 340 km	16
9. Máscara de radiación Isoflux para una altura orbital de 550 km	17
10. Máscara de radiación Isoflux para una altura orbital de 1150 km	17
11. Diagrama de radiación en coordenadas cartesianas	19
12. Diagrama de radiación en coordenadas polares	19
13. Diferentes distribuciones de excitaciones de amplitud	21
14. Diagramas de radiación generados por arreglos con diferentes distribuciones de excitaciones de amplitud	22
15. Diagramas de radiación para diferentes distancias entre dos elementos de antena	24
16. Comparación de diagramas de radiación para diferente número de elementos de antena	25
17. Arreglo lineal	27
18. Arreglo planar rectangular periódico	28
19. Arreglo planar aperiódico	28
20. Arreglo de anillos concéntricos	29
21. Cruce de dos puntos	33
22. Arreglo lineal con separaciones uniformes	35
23. Arreglo lineal con separaciones no uniformes	35
24. Arreglo planar con separaciones uniformes	36
25. Arreglo planar con separaciones no uniformes	36
26. Arreglo de anillos concéntricos uniforme	37
27. Arreglo de anillos concéntricos no uniforme	37
28. Metodología de diseño del arreglo de antenas	40
29. Patrón de radiación generado por el arreglo lineal uniforme diseñado para una altura orbital de 340 km	43

Figura	Página
30. Geometría del arreglo lineal uniforme	43
31. Patrón de radiación generado por el arreglo lineal no uniforme diseñado para una altura orbital de 340 km	44
32. Geometría del arreglo lineal no uniforme para la altura orbital de 340 km	44
33. Patrón de radiación generado por el arreglo planar uniforme diseñado para una altura orbital de 340 km	46
34. Geometría del arreglo planar uniforme	46
35. Patrón de radiación generado por el arreglo planar no uniforme diseñado para una altura orbital de 340 km	47
36. Geometría del arreglo planar no uniforme para la altura orbital de 340 km	47
37. Patrón de radiación generado por el arreglo de anillos concéntricos uniforme diseñado para una altura orbital de 340 km	48
38. Geometría del arreglo de anillos concéntricos uniforme para la altura orbital de 340 km	48
39. Patrón de radiación generado por el arreglo de anillos concéntricos no uniforme diseñado para una altura orbital de 340 km	50
40. Geometría del arreglo de anillos concéntricos no uniforme para la altura orbital de 340 km	50
41. Patrón de radiación generado por el arreglo lineal uniforme diseñado para una altura orbital de 550 km	51
42. Patrón de radiación generado por el arreglo de anillos lineal no uniforme diseñado para una altura orbital de 550 km	52
43. Geometría del arreglo lineal no uniforme para la altura orbital de 550 km	52
44. Patrón de radiación generado por el arreglo planar uniforme diseñado para una altura orbital de 550 km	53
45. Patrón de radiación generado por el arreglo no planar uniforme diseñado para una altura orbital de 550 km	54
46. Geometría del arreglo planar no uniforme para la altura orbital de 550 km	54
47. Patrón de radiación generado por el arreglo de anillos concéntricos uniforme diseñado para una altura orbital de 550 km	55
48. Geometría del arreglo de anillo concéntricos uniforme para la altura orbital de 550 km	56
49. Patrón de radiación generado por el arreglo de anillos concéntricos no uniforme diseñado para una altura orbital de 550 km	57
50. Geometría del arreglo de anillos concéntricos no uniforme para la altura orbital de 550 km	57
51. Patrón de radiación generado por el arreglo lineal uniforme diseñado para una altura orbital de 1150 km	59

Figura	Página
52. Patrón de radiación generado por el arreglo lineal no uniforme diseñado para una altura orbital de 1150 km	60
53. Geometría del arreglo lineal no uniforme para la altura orbital de 1150 km	60
54. Patrón de radiación generado por el arreglo planar uniforme diseñado para una altura orbital de 1150 km	61
55. Patrón de radiación generado por el arreglo planar no uniforme diseñado para una altura orbital de 1150 km	61
56. Geometría del arreglo planar no uniforme para la altura orbital de 1150 km	62
57. Patrón de radiación generado por el arreglo de anillos concéntricos uniforme diseñado para una altura orbital de 1150 km	63
58. Geometría del arreglo circular para la altura orbital de 1150 km	63
59. Patrón de radiación generado por el arreglo de anillos concéntricos no uniforme diseñado para una altura orbital de 1150 km	64
60. Geometría del arreglo de anillos concéntricos no uniforme para la altura orbital de 1150 km	65

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Comparación de resultados generados por los arreglos de antenas de radiación Isoflux para la altura orbital de 340 km	66
2. Comparación de resultados generados por los arreglos de antenas de radiación Isoflux para la altura orbital de 550 km	66
3. Comparación de resultados generados por los arreglos de antenas de radiación Isoflux para la altura orbital de 1150 km	67
4. Excitaciones de amplitud del arreglo lineal uniforme para el caso de la altura orbital de 340 km	76
5. Excitaciones de amplitud y separaciones entre elementos del arreglo lineal no uniforme para el caso de la altura orbital de 340 km	76
6. Excitaciones de amplitud del arreglo planar uniforme para el caso de la altura orbital de 340 km	77
7. Excitaciones de amplitud y posiciones de los elementos de antena del arreglo planar no uniforme para el caso de la altura orbital de 340 km	77
8. Excitaciones de amplitud del arreglo de anillos concéntricos uniforme para el caso de la altura orbital de 340 km	78
9. Excitaciones de amplitud y separaciones entre anillos del arreglo de anillos concéntricos no uniforme para el caso de la altura orbital de 340 km	79
10. Excitaciones de amplitud del arreglo lineal uniforme para el caso de la altura orbital de 550 km	80
11. Excitaciones de amplitud y separaciones entre elementos del arreglo lineal no uniforme para el caso de la altura orbital de 550 km	80
12. Excitaciones de amplitud del arreglo planar uniforme para el caso de la altura orbital de 550 km	81
13. Excitaciones de amplitud y posiciones de los elementos de antena del arreglo planar no uniforme para el caso de la altura orbital de 550 km	81
14. Excitaciones de amplitud del arreglo de anillos concéntricos uniforme para el caso de la altura orbital de 550 km	82
15. Excitaciones de amplitud y separaciones entre anillos del arreglo de anillos concéntricos no uniforme para el caso de la altura orbital de 550 km	83
16. Excitaciones de amplitud del arreglo lineal uniforme para el caso de la altura orbital de 1150 km	84
17. Excitaciones de amplitud y separaciones entre elementos del arreglo lineal no uniforme para el caso de la altura orbital de 1150 km	84
18. Excitaciones de amplitud y separaciones entre elementos del arreglo planar uniforme para el caso de la altura orbital de 1150 km	85

Tabla	Página
19. Excitaciones de amplitud y posiciones de los elementos de antena del arreglo planar no uniforme para el caso de la altura orbital de 1150 km	85
20. Excitaciones de amplitud del arreglo circular uniforme para el caso de la altura orbital de 1150 km	86
21. Excitaciones de amplitud y separaciones entre anillos del arreglo de anillos concéntricos no uniforme para el caso de la altura orbital de 1150 km	86

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

Según la definición de Cremins (2015), el inicio de la primera era espacial se sitúa a finales de la década de los 50 con el lanzamiento del primer satélite artificial, el Sputnik 1. Este momento histórico marcó el comienzo de una nueva etapa en la que la tecnología espacial propició la creación y avance de otras tecnologías. Por ejemplo, áreas como las comunicaciones, la observación de la Tierra y la navegación experimentaron avances notables gracias al rápido desarrollo de los satélites artificiales. En particular, las comunicaciones se han beneficiado enormemente de la presencia de satélites en órbita. Esto se debe a que un repetidor de señal situado a esa altitud tiene la capacidad de enviar señales a largas distancias, conectarnos con áreas remotas y proporcionarnos una red de comunicaciones de respaldo en caso de desastres naturales.

Uno de los elementos fundamentales para el éxito de estos sistemas de comunicaciones son las antenas a bordo del satélite. Estas antenas, que son la primera y última etapa en la recepción y transmisión de señales, se diseñan según los requerimientos específicos de cada aplicación. El patrón de radiación de una antena es un parámetro de gran relevancia en el proceso de diseño de una antena adecuada para un escenario de aplicación en particular. Este parámetro describe cómo una antena irradia energía en función de las coordenadas espaciales, lo que significa que tiene un impacto directo en la extensión geográfica de la cobertura de un satélite.

El patrón de radiación de una antena puede ser configurado mediante diversas técnicas. Por ejemplo, el Sputnik 1 utilizaba dos pares de antenas de látigo que generaban una radiación casi esférica. De esta manera, el satélite transmitía con la misma potencia en todas las direcciones, facilitando la recepción de la señal en la Tierra sin importar la orientación del satélite (Velinov, 2017). En los años siguientes, el uso de antenas reflectoras se convirtió en la estrategia principal para dar forma a la radiación en aplicaciones satelitales (Imbriale et al., 2012). Sin embargo, existen ciertas demandas de radiación que solo pueden ser satisfechas mediante la combinación de patrones de radiación provenientes de múltiples antenas.

Esta técnica, conocida como arreglo de antenas, brinda un mayor control sobre el comportamiento del patrón de radiación (Imbriale et al., 2012). El patrón de radiación generado por un arreglo de antenas puede ser ajustado mediante cinco parámetros de control. Estos parámetros incluyen el patrón de radiación de los elementos individuales, la disposición geométrica de los elementos de antena y la

distancia entre ellos, así como sus excitaciones de amplitud y fase (Balanis, 2016). El proceso de diseño de un arreglo de antenas consiste en encontrar la combinación de estos parámetros que resulte en el patrón de radiación deseado.

En aplicaciones satelitales, el patrón de radiación emitido por el arreglo de antenas debe recorrer largas distancias para alcanzar la superficie terrestre. Durante este trayecto, las ondas electromagnéticas experimentan pérdidas de potencia que aumentan con la distancia recorrida. Esta radiación que se emite hacia la Tierra se encuentra con la particularidad de que la superficie terrestre es curva. Debido a esta curvatura, las ondas que parten desde el arreglo de antenas a bordo del satélite recorren distancias variables. Aquellas que viajan en dirección del nadir (directamente debajo del satélite) recorren una menor distancia en comparación con las que viajan en las direcciones más alejadas a este.

Esta pérdida desigual de potencia puede ser mitigada mediante el uso de arreglos de antenas de radiación tipo Isoflux. Un arreglo de antenas de radiación Isoflux distribuye la densidad de potencia de manera uniforme, lo que proporciona una intensidad de señal similar para cualquier ubicación dentro del área de cobertura (Ibarra et al., 2015). La radiación tipo Isoflux ha demostrado su utilidad en la práctica, especialmente en los satélites del sistema de navegación y posicionamiento europeo Galileo (Montesano et al., 2007). El éxito del sistema Galileo respalda la viabilidad de este tipo de radiación, así como promueve la investigación y desarrollo de esta tecnología para satélites en diversos escenarios de aplicación.

1.2. Análisis del estado del arte

En la literatura académica, se encuentran diversos trabajos de investigación dedicados al estudio de los arreglos antenas de radiación tipo Isoflux para satélites ubicados en diferentes órbitas. Estos estudios se centran en la implementación de una configuración geométrica específica y la optimización de sus parámetros de diseño, principalmente a través de métodos heurísticos. El objetivo central de estos trabajos es diseñar arreglos de antenas de radiación tipo Isoflux que no solo mejoren las prestaciones de radiación, sino que también minimicen la complejidad total del sistema. A continuación, se proporciona una breve descripción de algunos de los trabajos de investigación más relevantes en este campo.

En su trabajo, Reyna et al. (2012) presentaron cuatro arreglos planares de radiación tipo Isoflux para satélites en órbita geostacionaria. Dos de los diseños tenían una disposición periódica de los elementos de antena, mientras que los otros dos eran aperiódicos. La optimización de las excitaciones de amplitud

y posición de los elementos se llevó a cabo mediante la aplicación de algoritmos genéticos. Tanto los arreglos planares aperiódicos como periódicos demostraron la capacidad de producir una radiación tipo Isoflux para un satélite en órbita GEO. Sin embargo, los arreglos planares aperiódicos exhibieron una mejor reducción del nivel de lóbulos laterales utilizando una menor cantidad de elementos de antena que su contraparte periódica.

La investigación de Viganö et al. (2010) presentó una nueva técnica analítica de síntesis de arreglos de antenas lineales con distribución dispersa para conformar patrones de radiación arbitrarios. En este estudio, la técnica se empleó para determinar la densidad y excitaciones de amplitud de los elementos de antena para un arreglo de radiación Isoflux. Para proveer una cobertura uniforme tanto en el plano de elevación como el azimutal, se consideró la implementación de un arreglo rectangular. Este arreglo se logró apilando los arreglos de antenas lineales, manteniendo la misma densidad de elementos en ambos ejes. Los arreglos rectangulares resultantes de 12x12 y 10x10 elementos fueron capaces de generar una radiación Isoflux para satélites en órbita media y geoestacionaria respectivamente.

En el trabajo de Jeong et al. (2017), se propuso un arreglo de anillos concéntricos con separación entre anillos no uniforme para un satélite en órbita media. Este arreglo consta de dos anillos con 8 y 12 elementos, respectivamente. Los elementos se colocan en pares, uno frente al otro y simétricos con respecto al origen, compartiendo la misma amplitud y fase. Para determinar el radio de los anillos y las excitaciones de amplitud y fase de los elementos, se empleó la técnica de optimización analítica de regresión por mínimos cuadrados. Los resultados de este estudio demuestran la utilidad de este método de optimización en la síntesis de un arreglo de antenas de radiación Isoflux para un satélite en una altura orbital de 23,616 km.

La investigación realizada por Ibarra et al. (2015) mostró tres arreglos de anillos concéntricos para satélites de órbita baja. Estos arreglos presentaron una distribución de elementos aperiódica. Para determinar tanto la separación entre los elementos de antena como sus excitaciones de amplitud, se empleó la técnica de optimización de evolución diferencial multiobjetivo. Los resultados de esta investigación demostraron que los arreglos propuestos son capaces de generar una radiación isoflux con buena precisión para satélites en una altura orbital LEO de 2000 km. La configuración que logró la radiación más precisa, en términos de cumplir con la máscara Isoflux, consistió en un arreglo compuesto por 12 elementos de antena distribuidos en dos anillos.

En el estudio realizado por El-Hassan et al. (2019), se presentó un arreglo de anillos concéntricos con distribución uniforme para un satélite en órbita baja. El arreglo consta de 93 elementos de antena dis-

tribuidos en cinco anillos alrededor de un elemento central. Las excitaciones de amplitud se optimizaron utilizando la técnica de enjambre de partículas. Todos los elementos dentro de un mismo anillo mantuvieron la misma excitación de amplitud, con el objetivo de lograr una radiación con simetría en el plano azimutal. Como resultado de esta investigación, se obtuvo un arreglo de antenas capaz de generar un haz Isoflux con una extensión de 100° .

Las investigaciones presentadas en este análisis han resaltado la versatilidad y aplicabilidad de los arreglos de antenas de radiación Isoflux. En esta sección, se han explorado diferentes enfoques y técnicas para el diseño de estos arreglos para satélites en diversas alturas orbitales. Sin embargo, es notable una brecha en la investigación, ya que existe una falta de estudios sobre arreglos de radiación Isoflux en órbitas bajas, particularmente por debajo de los 2000 km. A medida que surgen nuevas tecnologías en el ámbito de los arreglos de antenas, algunas de ellas podrían aplicarse para generar este tipo de radiación. Por lo tanto, es imperativo continuar investigando y desarrollando arreglos de antenas de radiación Isoflux, con el objetivo de proporcionar alternativas más eficientes a los arreglos de antenas convencionales destinados a satélites.

1.3. Planteamiento del problema

Uno de los patrones de radiación más empleados en aplicaciones satelitales es el patrón direccional (Imbriale et al., 2012). En Balanis (2016), se define una antena direccional como aquella que tiene la capacidad de transmitir o recibir ondas electromagnéticas más efectivamente en una cierta dirección. Este patrón de radiación, ilustrado en la figura 1, presenta algunas deficiencias en aplicaciones satelitales. Cuando las ondas electromagnéticas se propagan a través del espacio experimentan pérdidas que se incrementan con la distancia recorrida. Estas pérdidas denominadas pérdidas por espacio libre son más especialmente significativas en comparación a enlaces terrestres debido a la gran distancia que existe entre el transmisor y el receptor (Seybold, 2005).

Además, es importante tener en cuenta que al establecer un enlace satelital, la señal debe atravesar la atmósfera terrestre. Esto genera pérdidas adicionales en el enlace debido a la presencia de gases y vapor de agua en la atmósfera (Seybold, 2005). Las pérdidas de potencia en estas direcciones se hacen más notorias al llegar a la superficie curva de la Tierra. Esta curvatura provoca que las ondas que viajan en dirección del nadir del satélite recorran una menor distancia en comparación a las que viajan en las direcciones más alejadas a este. Si utilizamos un patrón de radiación que enfoca la potencia en una

sola dirección, obtenemos la intensidad máxima de señal en el centro del área de cobertura. Las zonas marginales de la cobertura, donde las ondas han recorrido una mayor distancia, reciben una intensidad de señal más débil.

Esto provoca que sea necesario desplegar satélites adicionales que fortalezcan la señal en estas áreas, con el fin de mejorar la calidad del servicio. Para solucionar esta problemática, se propone el uso de arreglos de antenas de radiación tipo Isoflux. El patrón de radiación que generan estos arreglos distribuye la densidad de potencia de manera uniforme sobre el área de cobertura. Esto teniendo en cuenta las diferentes pérdidas causadas por las fluctuaciones en la distancia entre el satélite y la superficie de la Tierra, tal como se ilustra en la figura 2. Mediante esta técnica, se logra recibir una intensidad de señal similar en todas las estaciones dentro de la zona de cobertura del satélite. Este enfoque tiene el potencial de prolongar el tiempo de visibilidad del satélite, y así aumentar el número de estaciones que pueden recibir atención por parte de el.

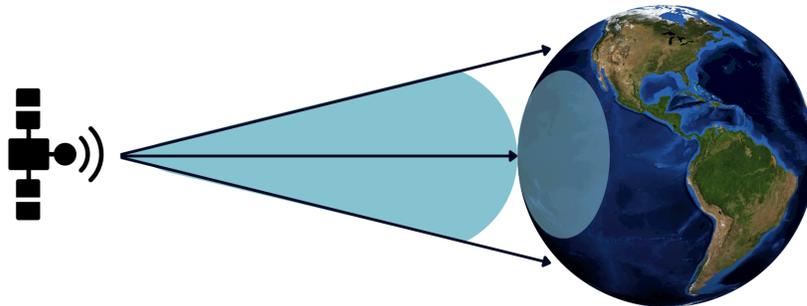


Figura 1. Cobertura de la Tierra por un sistema de radiación direccional

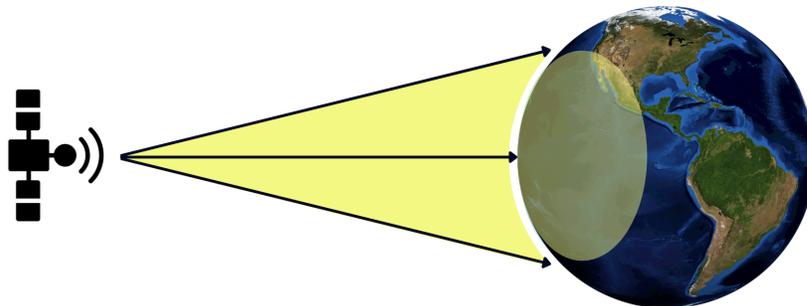


Figura 2. Cobertura de la Tierra por un sistema de radiación Isoflux

Las pérdidas causadas por la curvatura de la superficie terrestre se intensifican a medida que el satélite

se acerca al planeta. Desde la perspectiva del satélite, la forma curvada de la Tierra cambia en función de su altura orbital, es decir, la distancia que separa al satélite de la superficie terrestre en dirección al nadir. Para un satélite en órbita geostacionaria, la Tierra es tan pequeña que es posible cubrir su porción visible con un haz Isoflux de 18° de ancho (Ibarra et al., 2016). A medida que el satélite se acerca, este haz comienza a expandirse gradualmente. En órbitas bajas, el haz requerido para cubrir el campo de visión del satélite supera los 100° . Con el incremento del ancho del haz Isoflux, también se profundiza la diferencia entre su punto mínimo y máximo, tal como se observa en la figura 3.

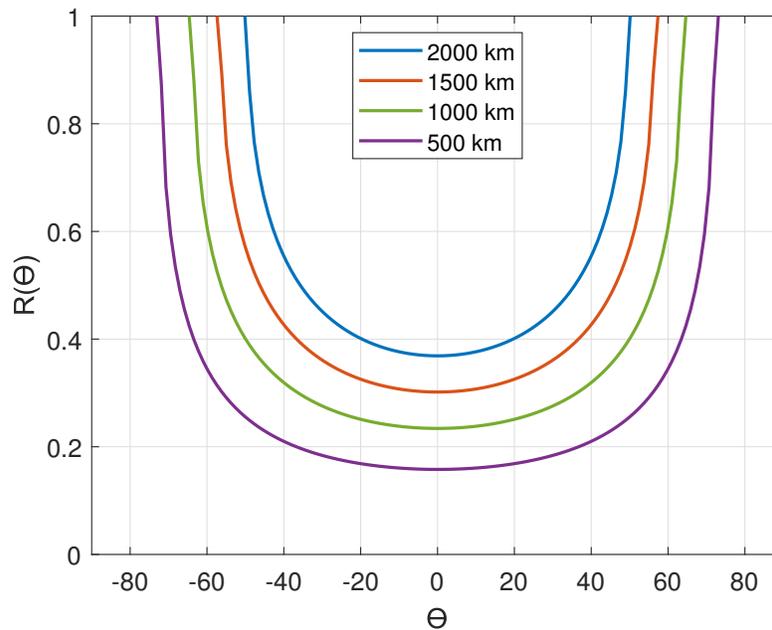


Figura 3. Comparación de máscaras Isoflux para diferentes alturas orbitales LEO

Esto plantea desafíos en el diseño de arreglos de antenas, ya que el haz Isoflux debe expandirse en un rango más amplio de grados y, al mismo tiempo, abarcar una gama más extensa de potencias. En la literatura, se han propuesto sistemas de antenas capaces de generar un patrón de radiación Isoflux para satélites en la órbita LEO. Sin embargo, estas investigaciones se concentran principalmente en el rango superior de esta órbita. Esta tesis se enfoca en el diseño de arreglos de antenas de radiación Isoflux para diversas alturas orbitales dentro del rango de la órbita LEO, centrándose principalmente en las altitudes orbitales inferiores y medias. Los arreglos de antenas de radiación Isoflux para satélites en las órbitas de 340 km, 550 km y 1150 km, los cuales son el foco central de esta investigación, requieren haces de 143° , 134° y 116° de extensión, respectivamente.

Para el diseño de arreglos de antenas que generen un haz Isoflux de esta extensión, se propone el uso

de diferentes configuraciones geométricas de arreglos de antenas. Estas son las configuraciones lineal, planar y de anillos concéntricos, con una distribución de antenas tanto periódicas como aperiódicas. Así mismo, para la síntesis de los arreglos, se propone el uso de algoritmos genéticos con el fin de optimizar las excitaciones de amplitud y de separaciones entre elementos. En esta tesis, se estudiará el rendimiento de los arreglos de la radiación Isoflux para satélites en las alturas orbitales mencionadas. La relevancia de esta investigación radica en el aumento de satélites en estas alturas orbitales y órbitas similares que se anticipa en los próximos años (CBO, 2023).

1.4. Justificación

Los satélites en órbita baja (LEO, por sus siglas en inglés de Low Earth Orbit) tienen la capacidad de establecer enlaces de subida y bajada significativamente más rápidos que aquellos ubicados en altitudes más elevadas. En satélites geoestacionarios, la latencia puede ser de hasta un cuarto de segundo, lo que puede causar problemas en algunos escenarios de aplicación (CBO, 2023). Así mismo, en ocasiones, la comunicación entre satélites es necesaria para enviar un mensaje desde un punto de la Tierra hacia otro. Esta comunicación intersatelital aumenta la latencia en todos los regímenes orbitales. Sin embargo, el tiempo de transito, es decir, el tiempo total transcurrido desde que el mensaje asciende al primer satélite hasta que desciende del último satélite, es considerablemente menor utilizando satélites LEO que utilizando satélites MEO o GEO (CBO, 2023).

Los satélites LEO se han convertido en una opción atractiva para proporcionar servicio de Internet satelital gracias a su capacidad para minimizar la latencia, un parámetro crucial en la evaluación de la calidad del servicio. No obstante, es importante destacar que los satélites LEO tienen campos de visión sustancialmente menores en comparación con los satélites en órbitas más altas (Kota et al., 2004). Esta limitación implica que una constelación de satélites en órbita baja requiere desplegar un gran número de unidades para lograr una cobertura completa de la superficie terrestre. Así mismo, contar con una constelación extensa de satélites tendría el potencial de evitar interrupciones abruptas en la cobertura en caso de la pérdida de uno de ellos.

Con una mayor cantidad de satélites de respaldo en órbita, sería posible sustituir rápidamente un satélite dañado por uno en funcionamiento (CBO, 2023). Las grandes constelaciones de satélites en órbita baja se han convertido en una realidad gracias a los avances tecnológicos que han posibilitado la fabricación y despliegue masivo de satélites LEO (Harrison, 2023). La constelación Starlink, desarrollada por SpaceX,

ha emergido como el líder destacado en el panorama de las constelaciones de satélites de órbita baja. Hasta julio de 2023, Starlink ha desplegado más de 4,500 de los 29,988 satélites aprobados por la Comisión Federal de Comunicaciones (Satariano et al., 2023; FCC, 2022). Esta proliferación de satélites ha motivado la creación de arreglos de antenas diseñados para estas alturas orbitales.

Los arreglos de antenas de radiación Isoflux, al proporcionar una intensidad de señal uniforme a todas las estaciones dentro de su área de cobertura, tienen el potencial de maximizar la eficiencia de un solo satélite. Esto podría reducir tanto la cantidad de satélites en la constelación principal como la cantidad de satélites de respaldo. El diseño de un arreglo de antenas también toma en cuenta las restricciones de tamaño y peso del satélite. Por lo tanto, algunas configuraciones de arreglos de antenas pueden ser más adecuadas en ciertos escenarios que en otros. Esta tesis presenta el diseño de diferentes arreglos de antenas y realiza un análisis de su rendimiento, con el objetivo de proporcionar a los diseñadores información esencial para la toma de decisiones.

1.5. Objetivos

Los objetivos de la presente tesis se exponen a continuación.

1.5.1. Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo de investigación es diseñar sistemas de radiación basados en arreglos de antenas para satélites LEO en alturas orbitales utilizadas en la constelación Starlink para mejorar las prestaciones de radiación.

1.5.2. Objetivos específicos

- Implementar diferentes configuraciones geométricas de arreglos de antenas y estudiar su efecto en el patrón de radiación.
- Aplicar técnicas de optimización evolutiva para determinar variables de diseño.

- Evaluar las prestaciones de radiación y la complejidad del sistema.

1.6. Organización de la tesis

La presente tesis se encuentra organizada de la siguiente manera. El capítulo 2 presenta un marco teórico del escenario de aplicación de los sistemas de radiación diseñados en esta tesis. En este capítulo se puede encontrar una breve descripción de las diferentes órbitas de los satélites artificiales, así como una explicación de la expresión matemática de la máscara de radiación Isoflux. En el capítulo 3 se abordan los fundamentos de arreglos de antenas, al igual que los parámetros de control utilizados en su diseño. Las geometrías lineales, planares y de anillos concéntricos se describen en este capítulo. Además, se explora la distribución no uniforme de excitaciones de amplitud y separación entre elementos de antena como técnicas de diseño de los agrupamientos de antenas.

En el capítulo 4 se describe la metodología de diseño de los arreglos de antenas de radiación tipo Isoflux. En este capítulo, se detalla el funcionamiento e implementación de los algoritmos genéticos utilizados para el diseño de los agrupamientos de antenas. El capítulo 5 expone los resultados obtenidos con cada configuración de arreglos propuesta, categorizados por altura orbital. También, se agrega un análisis comparativo de las prestaciones de radiación y cantidad de elementos de cada diseño presentado. Por último, en el capítulo 6 se dan a conocer las conclusiones generales de la tesis, así como se proponen algunos trabajos a futuro.

Capítulo 2. Satélites

La llegada de las grandes constelaciones de satélites ha marcado el comienzo de una tercera era espacial. El número de lanzamientos de satélites ha ascendido de 176 en 2016 a 2,380 en 2022 gracias a las mega constelaciones compuestas por cientos a miles de satélites en órbita baja (Harrison, 2023). SpaceX, con su constelación Starlink, sin duda ha generado la mayor contribución a este aumento. En julio de 2023, más de la mitad de todos los satélites activos en órbita pertenecen a Starlink y se proyecta que este número ascienda a las decenas de miles en los próximos años (Satariano et al., 2023). La creciente popularidad de esta constelación ha despertado la motivación de diseñar sistemas de radiación específicos para las alturas orbitales de sus satélites. Tal es el caso de esta tesis, donde el objetivo principal es sintetizar arreglos de antenas de radiación tipo Isoflux para satélites en las alturas orbitales de la constelación Starlink. En este capítulo, se establece un marco teórico que delinea este escenario de aplicación de los arreglos de antenas.

2.1. Historia de las constelaciones de satélites

El primer satélite artificial para telecomunicaciones fue puesto en órbita en diciembre de 1958. El satélite nombrado SCORE, por las siglas en inglés de Signal Communicating by Orbiting Relay Equipment, tenía la capacidad de recibir, grabar y retransmitir mensajes de voz de hasta cuatro minutos de duración (Ippolito, 2017). El potencial que tenían los satélites artificiales para relevar información entre dos estaciones terrenas en distintos puntos de la Tierra fue evidente inmediatamente. El Telstar 1 fue el siguiente en hacer historia en 1962. Durante su vida útil fue responsable de más de 400 transmisiones, entre ellas la primera transmisión transatlántica de televisión en vivo (NASA, 1965; Russo, 1993).

Luego de los éxitos de los primeros satélites experimentales, llegaron los satélites comerciales. El primero fue el Intelsat 1, que fue lanzado en 1965 para continuar la comunicación vía satélite entre Europa y Estados Unidos. La estación terrena europea y la estadounidense tomaban turnos para utilizar al satélite como repetidor de una única señal de televisión o 240 llamadas telefónicas (Ippolito, 2017). Tres satélites adicionales fueron puestos en órbita durante los siguientes dos años. Uno conectaba a Europa con América del Sur, mientras que los otros dos cubrían la región del océano Pacífico. Para el final de la década de los 60, el sistema de satélites Intelsat había alcanzado cobertura mundial (Russo, 1993).

Aunque el Intelsat 1 dio resultados satisfactorios durante el tiempo que se mantuvo activo, no hubiera sido capaz de proveer el servicio de telefonía y televisión a toda la Tierra por sí solo. Un solo satélite

que se encuentre a 36,000 km de distancia de la superficie terrestre (como era el caso del Intelsat 1) solo cubre aproximadamente el 33 % de la Tierra (Clarke, 1945). Para cubrir un área mayor se requiere forzosamente, poner uno o más satélites suplementarios en órbita. Durante las siguientes décadas, la utilización de varios satélites para lograr la cobertura parcial o total de la Tierra evolucionó hasta llegar a lo que hoy conocemos como una constelación de satélites.

En su trabajo, Wood (2003) describe a una constelación de satélites como un conjunto de satélites similares, de función y tipo similar, diseñados para estar en órbitas similares y complementarias con el mismo propósito y bajo el mismo control. En la figura 4, se observa una representación gráfica de este concepto. La primera generación de la constelación Iridium es uno de los ejemplos más notables del siglo XX. En la década de los 90s, Iridium fue diseñada como una red personal de comunicaciones inalámbricas. El segmento espacial estaba compuesto de 66 satélites, cuya función era proveer el servicio de telefonía para cualquier tipo de transmisión: voz, datos, *fax* o *paging* (Picasso, 2001).

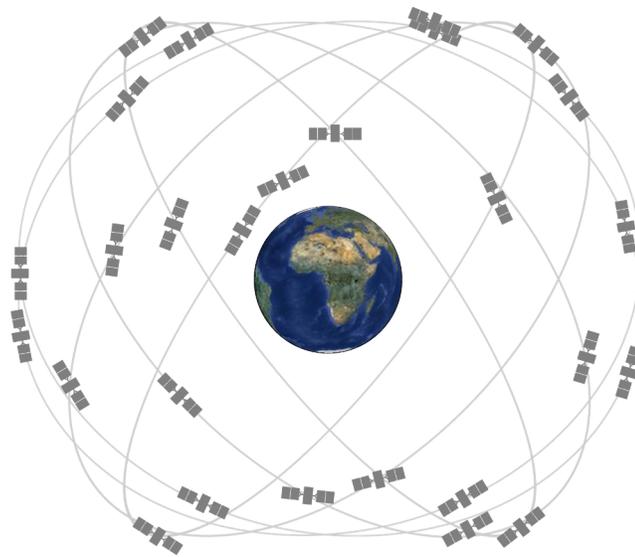


Figura 4. Representación gráfica de la constelación de 27 satélites del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por las siglas en inglés de Global Positioning System) (Extraído de GPS.gov (sf))

Los dispositivos Iridium que utilizaban los usuarios podían comunicarse con cualquier teléfono en la Tierra (Picasso, 2001). Este proyecto ambicioso fue uno de los primeros en su tipo y siguió en funcionamiento hasta que fue reemplazado por la segunda generación satélites en 2017 (Iridium, 2013). En la última década, las compañías de tecnología espacial han apostado por las constelaciones de satélites de comunicaciones. La demanda de servicios de telecomunicaciones no es la misma que era hace casi 70 años. Durante este transcurso de tiempo, han emergido un sinnúmero de tecnologías que no solo demandan

más capacidad de nuestras redes de comunicaciones si no también mayor calidad de servicio.

Con más de 4,500 satélites en órbita en julio del 2023, Starlink ha sido uno de los principales promotores de las mega constelaciones de satélites LEO (Satariano et al., 2023). Según el estudio realizado por Michel et al. (2022), el desempeño de Starlink al navegar la web supera al de las comunicaciones satelitales tradicionales y es comparable a una conexión por cable. Las métricas de calidad de servicio onLoad (mide el tiempo que tarda el buscador en activar el evento indicando la carga completa de todos los recursos de la página) y SpeedIndex (el tiempo que demora el contenido visual en presentarse al usuario) señalan que Starlink es de 75 % a 80 % más rápido que las comunicaciones satelitales tradicionales.

2.2. Órbitas de los satélites artificiales

La Tierra, la Luna, el Sol y los planetas ejercen fuerzas gravitacionales sobre un satélite que lo obligan a dar vueltas alrededor de la Tierra. La trayectoria que sigue es elíptica según lo describen las leyes de Kepler (Deakin, 2007). La tercera de ellas establece que el cuadrado del periodo orbital de un satélite (tiempo que le toma dar una vuelta completa alrededor de la Tierra) es directamente proporcional al cubo del eje semi mayor de su órbita. Esto implica que entre más alejado esté el satélite de la Tierra mayor será su periodo orbital (NASA, 2008). Dependiendo de su periodo orbital, los satélites se clasifican en geoestacionarios o no geoestacionarios (Kota et al., 2004).

Los satélites geoestacionarios o GEO (por las siglas en inglés de Geostationary Orbit) se encuentran a 35,786 km de separación de la superficie de la Tierra. Su periodo orbital de 24 horas provoca que desde la superficie terrestre parezcan estar fijos en el cielo. Los satélites no geoestacionarios (NGSO, por las siglas en inglés de Non-Geostationary Orbit), por el contrario, parecen estar en movimiento constante (Kota et al., 2004). Los satélites NGSO se dividen en dos categorías adicionales dependiendo de la distancia con la superficie de la Tierra, también conocida como altura orbital. Estas categorías son los satélites en órbita terrestre media (MEO, por las siglas en inglés de Medium Earth Orbit) y los satélites en órbita terrestre baja (LEO, por las siglas en inglés de Low Earth Orbit).

La órbita MEO comprende desde los 2000 km hasta justo debajo de la órbita GEO, donde el periodo orbital deja de ser de 24 horas. Los satélites de órbita baja tienen alturas orbitales de 2000 km o menores (Kota et al., 2004). La Figura 5 presenta un diagrama que ilustra las tres clasificaciones de satélites más reconocidas: GEO, MEO y LEO. Esta última ha sido la más atractiva para los diseñadores de

constelaciones de satélites en los últimos años. Una de las principales desventajas de las comunicaciones vía satélite es que las transmisiones suelen tardar más en llegar a su destino que las comunicaciones vía terrestre (Lee & Choi, 2019). Esto se debe principalmente a la distancia que existe entre el satélite y la Tierra.

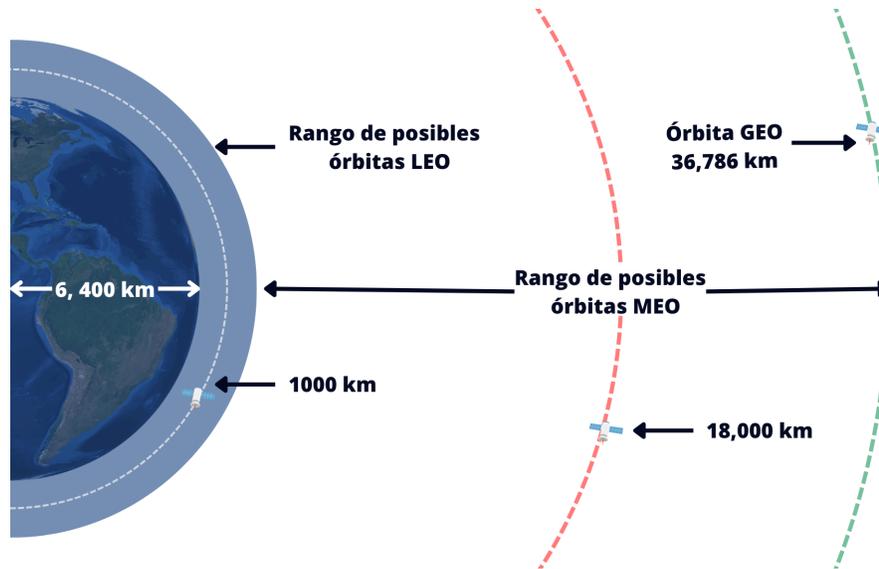


Figura 5. Descripción de las órbitas GEO, MEO y LEO (Adaptado de CBO (2023))

Una señal que viaja desde un punto A a un punto B utilizando satélites en órbita LEO tarda un cuarto del tiempo de lo que tardaría con satélites GEO. Así mismo, los satélites LEO son generalmente más simples y ligeros, por lo que su manufactura y lanzamiento suele ser menos costosos (CBO, 2023). Estas razones han llevado a preferir satélites en órbita baja para sistemas de comunicación vía satélite. Sin embargo, dado que los satélites LEO cubren áreas más pequeñas en comparación con aquellos en órbitas más altas, las constelaciones de satélites LEO requieren un mayor número de satélites para lograr la cobertura total de la Tierra (CBO, 2023).

Las mega constelaciones Proyecto Kuiper, OneWeb y Starlink, disponen de 588, 3,236 y 29,988 satélites respectivamente, según lo indican sus diseños (Kohnstamm, 2023; OneWeb, 2023; FCC, 2022). SpaceX, el líder actual en despliegue de satélites, ha realizado importantes cambios en el diseño de su constelación a lo largo del tiempo. En 2016, sometió un documento describiendo los detalles técnicos de la constelación Starlink a la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, por las siglas en inglés de Federal Communications Commission). Este primer diseño requería 4,425 satélites con alturas orbitales dentro de un rango de 1,110 km a 1,325 km. Los primeros en ser desplegados serían los satélites posicionados a una altitud orbital de 1,150 km (SpaceX, 2016).

Años más tarde, SpaceX pide autorización a la FCC de trasladar estos satélites a una órbita de 550 km, posteriormente reubicando el resto a órbitas entre 540 km y 570 km (SpaceX, 2018; FCC, 2021). La modificación más reciente a la constelación Starlink se enlista en la petición de autorización a la FCC de lanzar y operar 29,988 satélites de altitudes entre en 340 km a 614 km (FCC, 2022). Las alturas orbitales de 340 km, 550 km y 1150 km empleadas en este trabajo de tesis, han sido seleccionadas con base en el diseño actual de constelación Starlink, así como los diseños anteriores.

2.3. Máscara de radiación Isoflux para varias alturas orbitales

La máscara de radiación Isoflux nos muestra como debe ser la radiación emitida por un sistema de antenas montado en un satélite para que exista una densidad de potencia uniforme sobre la superficie de la Tierra en el área de cobertura. Esto se logra si se compensan las pérdidas de potencia por propagación provocadas por la distancia recorrida por las ondas electromagnéticas (El-Hassan et al., 2019). La función que describe las variaciones en la distancia entre el satélite y la Tierra dentro del área de cobertura según nos alejamos del nadir será abordada en esta sección. El Manual del Sistema Geodésico Mundial -1984 (WGS 84 por las siglas en inglés de World Geodetic System-1984) presenta un elipsoide aplanado en los polos como un modelo de la Tierra.

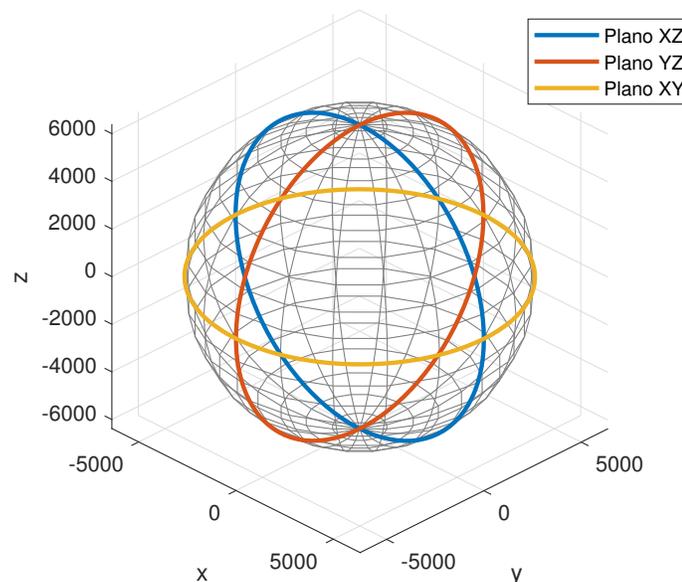


Figura 6. Representación gráfica del modelo elipsoidal de la Tierra

El elipsoide es formado al rotar la elipse del plano XZ (también llamado el plano del meridiano) alrededor de su eje menor. Por lo tanto, para describir al elipsoide se requieren dos parámetros geométricos: el semieje mayor y el semieje menor de la elipse del plano del meridiano. El semieje mayor también conocido como el radio ecuatorial de la Tierra se establece como 6,378.137 km en el modelo WGS-84. Del mismo modo, el valor del semieje menor o radio polar de la Tierra es de 6,356.752 km (WGS-84, 2002). En la figura 6, se muestran las elipses que se forman en los diferentes planos. La generación de la máscara de radiación Isoflux esta basada en este modelo de la Tierra visto desde un satélite a una altura h .

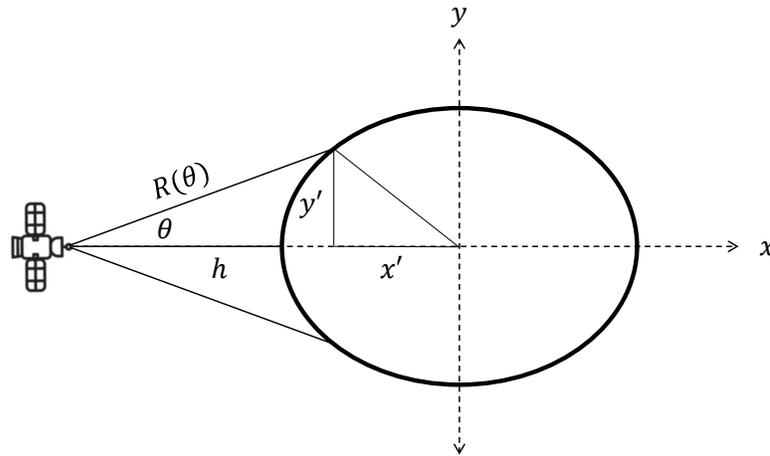


Figura 7. Iluminación electromagnética sobre el ecuador terrestre (Adaptado de Reyna et al. (2012))

Si consideramos que el satélite órbita alrededor del plano XY o plano ecuatorial de la Tierra, la radiación del sistema de antena a bordo del satélite iluminará una parte del ecuador. En Reyna et al. (2012) se presenta una expresión que relaciona la distancia R entre el satélite y un punto sobre el ecuador dentro del campo de visión a un ángulo de separación del nadir θ . Esta expresión parte de la ecuación canónica de la elipse (Ec.1) donde a es el radio ecuatorial de la Tierra y b es el radio polar de la Tierra. En el diagrama (Figura 7) propuesto por Reyna et al. (2012), se observa que las variables de la ecuación de la elipse x' y y' aparecen en las funciones trigonométricas seno y coseno del ángulo θ .

$$\frac{x'^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

$$y' = R(\theta)\text{sen}\theta \quad (2)$$

$$x' = (h + a) - R(\theta)\text{cos}\theta \quad (3)$$

Las ecuaciones (2) y (3) se sustituyen en (1) y se expanden algebraicamente para obtener la ecuación (4).

$$R^2(\theta) \left(\frac{\text{sen}^2\theta}{b^2} + \frac{\text{cos}^2\theta}{a^2} \right) + R(\theta) \left(\frac{-2(h+a)\text{cos}\theta}{a^2} \right) + \left(\frac{(h+a)^2}{a^2} - 1 \right) = 0 \quad (4)$$

La expresión que resulta de resolver esta ecuación cuadrática se utiliza como máscara de radiación Isoflux en este trabajo de tesis. De la expresión podemos derivar que la radiación del sistema de antena en el plano de elevación debe de ser más directiva conforme θ se aleja del nadir. La misma máscara puede ser utilizada para cualquier corte en el plano azimutal gracias a la simetría en el modelo elíptico de la Tierra. La representación gráfica de la máscara de radiación Isoflux para $h = 340\text{km}$, $h = 550\text{km}$ y $h = 1150\text{km}$ se ilustra en las figuras 8, 9, 10.

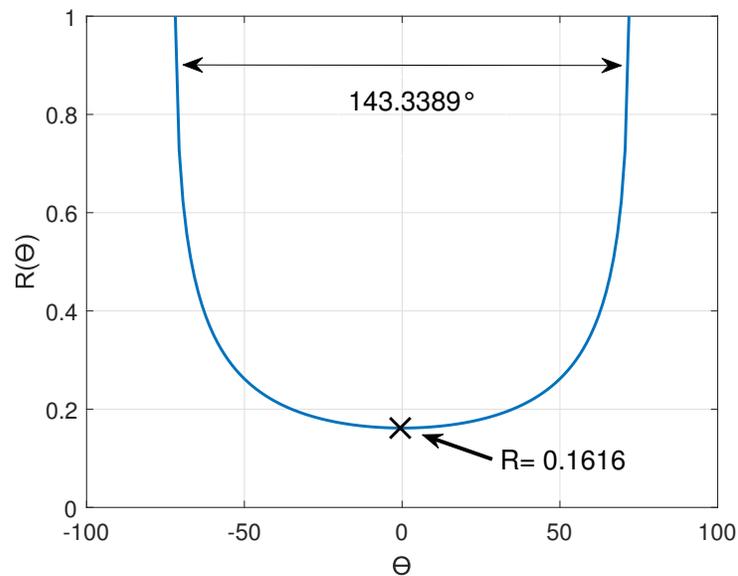


Figura 8. Máscara de radiación Isoflux para una altura orbital de 340 km

La extensión de la cuneta que traza la máscara de radiación Isoflux para órbitas LEO es considerablemente mayor que en el caso de las máscaras de radiación Isoflux GEO y MEO. Además, exhibe una diferencia más pronunciada entre los valores de intensidad de radiación mínimo y máximo. En el caso de GEO, la cuneta de la máscara de radiación Isoflux se extiende 18° , con un valor mínimo de intensidad de radiación de 0.74. En cambio, para una altura orbital MEO de 20,000 km, el ancho es de 28° , con un valor de intensidad de radiación mínimo de 0.62 (Ibarra et al., 2016).

Si comparamos la máscara para la altura orbital de 1150 km con la máscara MEO en 20,000 km, se evidencia un aumento de 93.18° en el ancho de la cuneta; además de una diferencia en la intensidad de radiación mínima de 0.45. Este fenómeno continua a medida que el satélite se acerca a la Tierra. Esto se hace evidente al analizar la gráfica de la máscara de radiación Isoflux para una altitud orbital de 340 km, la cual muestra una extensión de casi 150° y un valor mínimo de intensidad de radiación de 0.16.

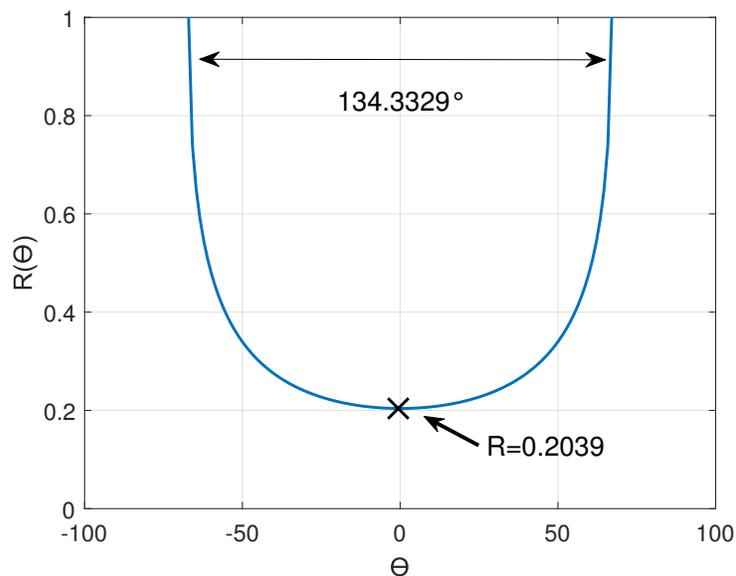


Figura 9. Máscara de radiación Isoflux para una altura orbital de 550 km

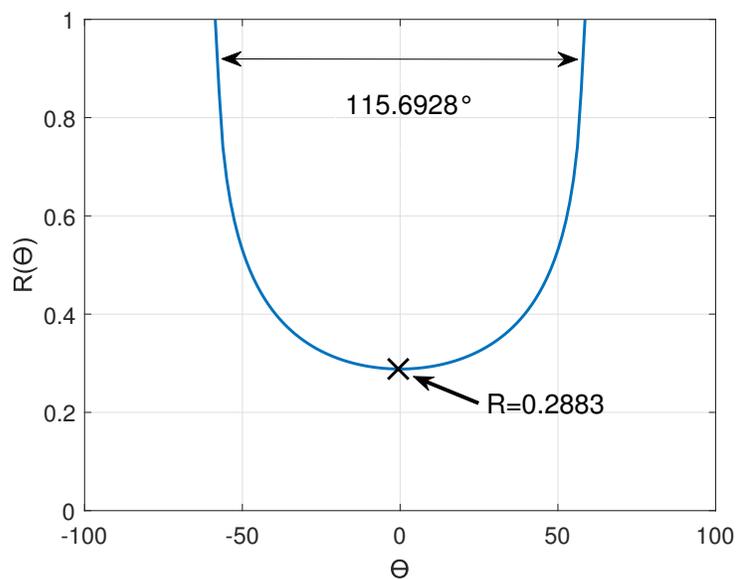


Figura 10. Máscara de radiación Isoflux para una altura orbital de 1150 km

2.4. Conclusiones

El estudio de sistemas de radiación tipo Isoflux para las alturas orbitales de 340 km, 550 km y 1150 km no solo beneficia a los satélites de Starlink, si no también al resto de los satélites en órbita baja. El amplio rango de las alturas orbitales que han formado parte del diseño de la constelación Starlink nos permiten observar el comportamiento de la radiación Isoflux en la mayor parte de la órbita LEO. Como se observa en las figuras 8, 9 y 10, la máscara de radiación Isoflux cambia significativamente para las diferentes alturas orbitales.

Esto implica que el proceso de diseño de un sistema de antena montado en un satélite en el rango superior de la órbita LEO difiere considerablemente de aquel montado en un satélite en el rango inferior. El cambio pronunciado entre el valor mínimo y máximo en la intensidad de radiación, así como la presencia de la cuneta Isoflux en más cantidad de ángulos, representa un mayor desafío en el intento por generar este tipo de radiación para las alturas orbitales más bajas. Sin embargo, en una era donde proliferan los satélites de órbita baja, estudiar los sistemas de antena de radiación tipo Isoflux para estas alturas orbitales es más relevante que nunca.

Capítulo 3. Arreglos de antenas

Existen aplicaciones donde las características de radiación requeridas no pueden lograrse utilizando una única antena. Sin embargo, es posible que un conjunto de elementos radiantes ordenados en una cierta geometría e interconectados eléctricamente puedan producir una radiación con las características deseadas (Balanis, 2016). La radiación emitida por cada elemento interfiere tanto de manera constructiva como destructiva, de tal modo que en conjunto puedan entregar el nivel de radiación adecuado en cada dirección según se desee. En este capítulo, discutiremos los arreglos de antenas, sus fundamentos y algunas variables a considerar durante su diseño. Estas variables incluyen la excitación de amplitud de los elementos, la separación entre ellos y su geometría, en particular, las configuraciones lineales, planares y de anillos concéntricos.

3.1. Diagrama de radiación

Las propiedades de la radiación generada por un conjunto de antenas se describen de manera matemática y gráfica mediante el patrón de radiación (Balanis, 2016). El patrón de radiación muestra como la potencia radiada por el arreglo de antenas varía en función de la dirección. Específicamente, llamamos diagrama de radiación a la representación gráfica de las propiedades de radiación del arreglo (Cardama Aznar et al., 2002). En este diagrama se puede emplear tanto un sistema de coordenadas esférico como cartesiano, aunque generalmente se opta por las coordenadas esféricas. En este contexto, θ es el ángulo de elevación y ϕ es el ángulo de azimuth.

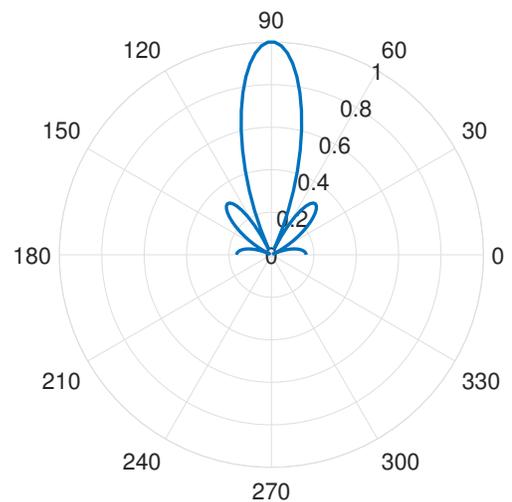
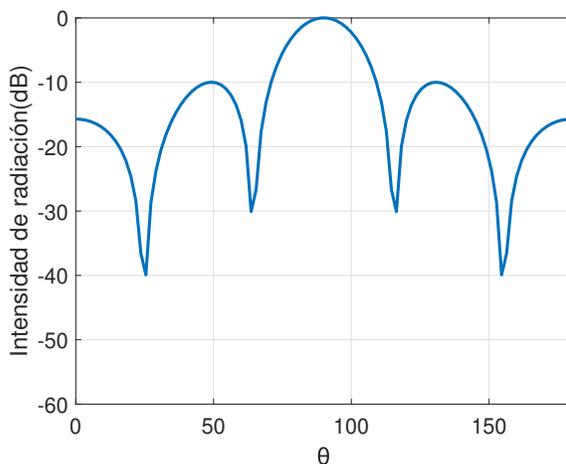


Figura 11. Diagrama de radiación en coordenadas cartesianas (Adaptado de Cardama Aznar et al. (2002))

Figura 12. Diagrama de radiación en coordenadas polares (Adaptado de Cardama Aznar et al. (2002))

Si bien un arreglo de antenas dispersa la energía en un espacio tridimensional, podemos obtener suficiente información sobre sus propiedades al representar su diagrama de radiación en dos dimensiones. La figura tridimensional se puede representar de manera bidimensional realizando un corte en un valor constante de ϕ o θ y graficando el patrón en función del plano perpendicular. En las figuras 11 y 12, se ilustran ejemplos de las representaciones polar y cartesiana de un diagrama de radiación en dos dimensiones. En estas gráficas se puede observar la variación de la intensidad de la radiación con respecto al ángulo de elevación para un corte en el plano azimutal. Frecuentemente, el diagrama de radiación se normaliza con respecto a su valor máximo, tal como se observa en las figuras 11 y 12 (Balanis, 2016).

3.2. Variables de diseño

En un arreglo de antenas, la radiación de dos o más elementos de antena interactúan entre sí para generar un patrón de radiación específico. Esto permite la creación de un conjunto de antenas en el que los campos provenientes de los elementos de antena se sumen de manera constructiva en ciertas direcciones, al mismo tiempo que se cancelan de manera destructiva en otras, de acuerdo con los requerimientos de radiación. Si consideramos que todos los elementos del arreglo de antenas son idénticos, existen cinco parámetros de control que pueden ser ajustados para configurar el patrón de radiación (Balanis, 2016):

- configuración geométrica del arreglo
- posición relativa entre los elementos
- excitaciones de amplitud de los elementos individuales
- excitaciones de fase de los elementos individuales
- patrón de radiación relativo de cada elemento de antena

El proceso de diseño de un arreglo de antenas comienza definiendo las características de radiación deseadas. A la aplicación de uno o varios métodos para determinar los parámetros de un arreglo que produzca el patrón de radiación esperado, se le llama síntesis del arreglo de antenas (Stutzman & Thiele, 2012). Aunque este enfoque se centra en encontrar la configuración del arreglo de antenas, así como sus dimensiones y distribución de excitaciones, los términos síntesis y diseño se emplean a menudo de manera intercambiable. En las siguientes subsecciones, se describen los controles empleados en la síntesis de los arreglos de antenas durante esta tesis.

3.2.1. Excitaciones de amplitud

Las excitaciones de amplitud aplicadas a los elementos de antena ofrecen una forma de manipular la radiación proporcionada por el arreglo. Existen distintas técnicas para determinar la distribución de excitaciones de amplitud de un arreglo de antenas que genere un patrón de radiación con las características deseadas. El proceso de encontrar las excitaciones de amplitud se conoce en inglés como “*amplitude tapering*” o “*amplitude weighting*” (Khasim et al., 2013). En esta subsección, se presentan algunas técnicas de distribución de excitaciones de amplitud y su impacto en el diagrama de radiación. En los ejemplos de distribuciones de amplitud que se abordan, los efectos se observan en un patrón de radiación direccional.

En un patrón direccional, se tiene un lóbulo principal donde se concentra la mayor intensidad de radiación y lóbulos laterales o menores, que usualmente representan radiación en direcciones no deseadas (Balanis, 2016). El impacto de la distribución de excitaciones de amplitud se analiza en estos ejemplos en términos del ancho del lóbulo principal y el nivel de los lóbulos laterales. Así mismo, para observar únicamente los efectos de las diferentes distribuciones de amplitud en el diagrama de radiación, se considera en todos los casos que los elementos están colocados en línea recta con un espaciado constante.

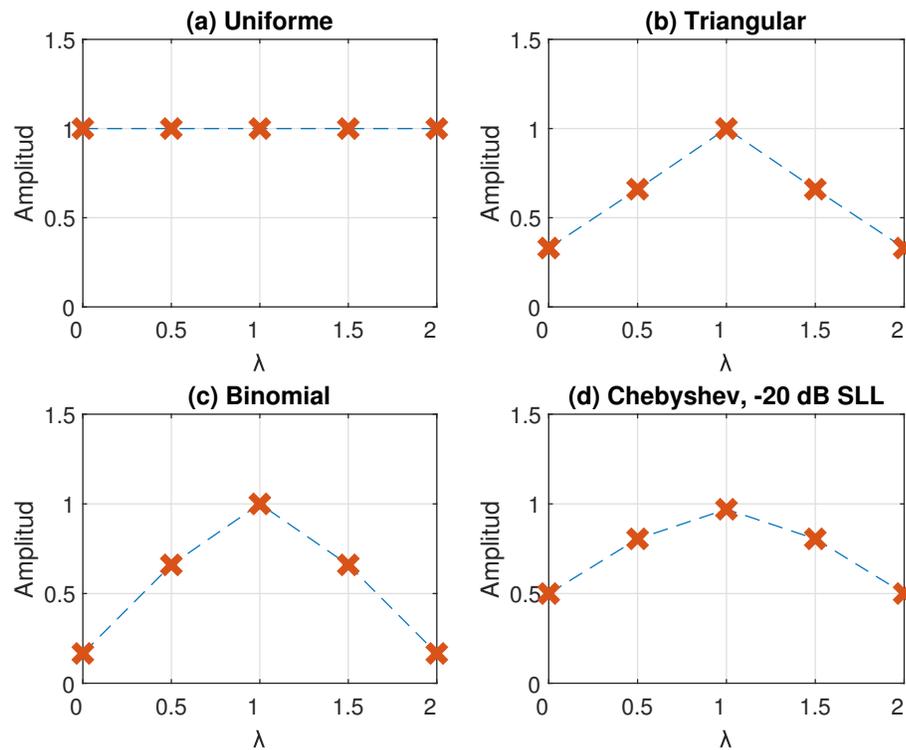


Figura 13. Diferentes distribuciones de excitaciones de amplitud (Adaptado de Stutzman & Thiele (2012))

En la figura 13 se observan las distribuciones de amplitud uniforme, binómica, triangular y Chebyshev para un arreglo de cinco elementos de antena. En una distribución de excitaciones de amplitud uniforme, todos los elementos de antena se alimentan con la misma amplitud. Este tipo de distribución no utiliza las excitaciones de amplitud como herramienta para lograr la radiación deseada. Sin embargo, aún es posible lograr dicha radiación modificando las excitaciones de fase o la separación entre los elementos de antena (Khasim et al., 2013). En la figura 14.a, se muestra el diagrama de radiación de un arreglo con una distribución de amplitud uniforme. Este diagrama se utiliza como punto de referencia para analizar cómo diversas distribuciones afectan el patrón de radiación. Los patrones generados por cada arreglo se observan en la figura 14.

Una distribución triangular puede reducir considerablemente los lóbulos laterales. No obstante, estos lóbulos aún exhiben diferentes niveles, siendo el primero de ellos el más pronunciado. Por otro lado, al emplear una distribución binomial, podemos eliminar por completo los lóbulos laterales a expensas de un haz principal más ancho (Stutzman & Thiele, 2012). Por último, una distribución Chebyshev permite establecer todos los lóbulos laterales a un mismo nivel. Utilizando este tipo de distribución es posible especificar un nivel de lóbulos laterales y mantener el menor ancho de haz posible correspondiente a dicho nivel de lóbulos laterales (Balanis, 2016).

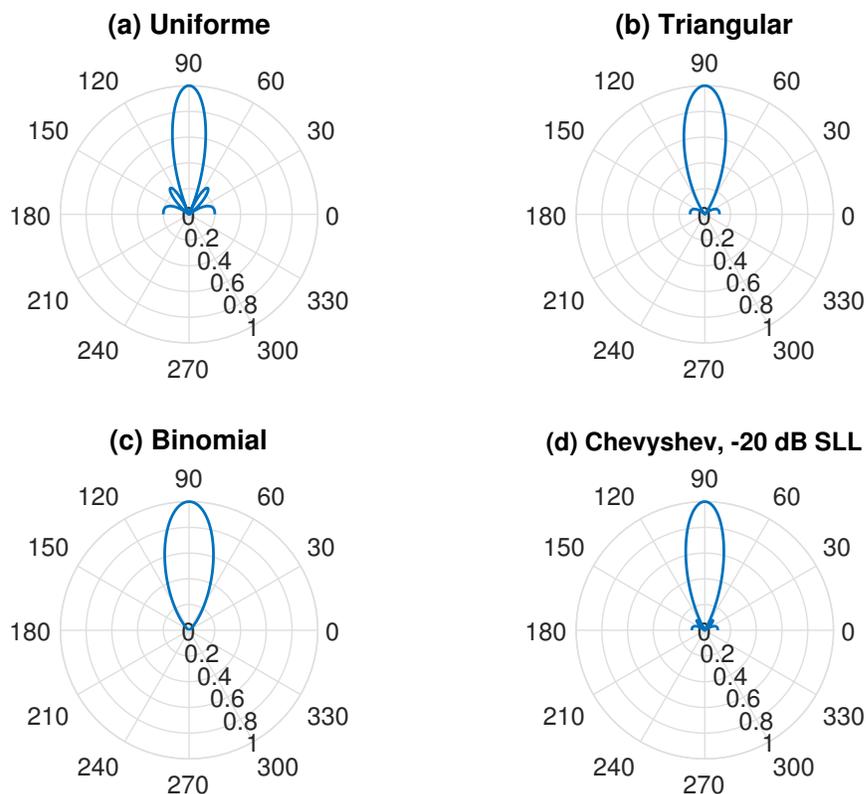


Figura 14. Diagramas de radiación generados por arreglos con diferentes distribuciones de excitaciones de amplitud (Adaptado de Stutzman & Thiele (2012))

Es relevante destacar que todas estas distribuciones reducen el nivel de lóbulos laterales a costa de aumentar el ancho del lóbulo principal (Stutzman & Thiele, 2012). La técnica de distribuciones de amplitud no solo es útil para modelar el tipo de patrón de radiación direccional, si no también, para patrones más complejos. Dependiendo del nivel de complejidad, es posible que los métodos determinísticos, como los ejemplos que se tratan en esta subsección, resulten insuficientes y sea necesario recurrir a métodos heurísticos (Greda et al., 2019).

3.2.1.1. Rango dinámico

El rango dinámico (DRR, por las siglas en inglés de Dynamic Range Ratio) se define como la diferencia entre el valor mínimo y máximo en una distribución de amplitud (Gholami et al., 2016). Un rango dinámico amplio provee una mayor flexibilidad en el diseño del arreglo de antenas. La capacidad para generar señales con amplitudes que varían significativamente facilita el control de las interferencias entre los campos de los elementos de antena. Esto abre oportunidades para crear patrones de radiación complejos que se ajusten a las necesidades específicas de la aplicación. Sin embargo, un rango dinámico demasiado amplio complica la red de alimentación del arreglo, aumentando el costo de manufactura (Gholami et al., 2016). En Sallam & Attiya (2020) se presenta la siguiente ecuación para determinar el DRR:

$$DRR = \frac{|Amplitud_{max}|}{|Amplitud_{min}|} \quad (5)$$

3.2.2. Posición de los elementos de antena

Las separaciones entre los elementos de antena ofrecen otro parámetro de control para configurar el patrón de radiación. Modificar la separación entre dos elementos de antena puede tener repercusiones importantes en el diagrama de radiación. Estos efectos se ilustran en la figura 15. La separación entre elementos se mide en unidades de longitud de onda (λ) y se expresa típicamente como un múltiplo de esta. En el estudio de Adnan et al. (2017), se concluye que cuando la separación entre los elementos es mayor que la mitad de la longitud de onda ($\lambda/2$), la directividad del patrón de radiación aumenta.

Por otro lado, cuando las separaciones son menores a $\lambda/2$, se observa el efecto contrario. Es importante mencionar que el aumentar o disminuir demasiado la separación entre los elementos de antena provoca la aparición de efectos no deseados.

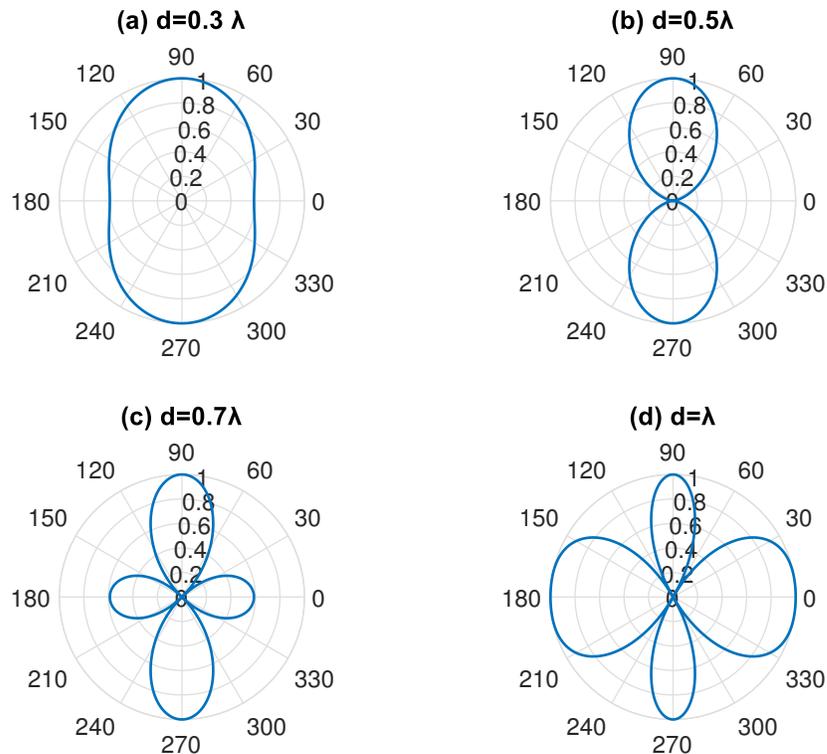


Figura 15. Diagramas de radiación para diferentes distancias entre dos elementos de antena (Adaptado de Cardama Aznar et al. (2002))

Uno de estos efectos no deseados se manifiesta como la presencia de múltiples lóbulos principales. A estos lóbulos los denominamos lóbulos de rejilla. Para evitarlos, se recomienda que la distancia entre elementos sea menor a una longitud de onda (Balanis, 2016). De la misma manera, durante el proceso de diseño de un arreglo de antenas, se busca evitar el fenómeno de acoplamiento mutuo. El acoplamiento mutuo sucede cuando el patrón de radiación individual de un elemento de antena se ve influenciado por los patrones de radiación de los elementos vecinos en la configuración (Balanis, 2016). Los efectos del acoplamiento mutuo entre dos elementos de antena son despreciables cuando la distancia entre ellos es mayor a $\lambda/2$ (Yuan et al., 2023).

Es posible incorporar separaciones no uniformes entre elementos de antena como una técnica de conformación del patrón de radiación deseado. Por ejemplo, una separación entre elementos no uniforme puede ser utilizada para lograr lóbulos laterales bajos sin necesidad de implementar una distribución de excitaciones de amplitud no uniforme (Hodjat & Hovanessian, 1978). Esta técnica puede ser implementada en

aplicaciones donde ajustar individualmente la excitación de amplitud de los elementos no es conveniente. No obstante, también puede ser utilizada en combinación con otras técnicas, como variaciones en las excitaciones de amplitud y fase.

Por último, las características de radiación deseadas pueden mejorarse mediante el incremento del número de elementos de antena (Rahman et al., 2017). No obstante, esta mejora conlleva un aumento en la complejidad del arreglo, que a su vez se traduce en un incremento en los costos de manufactura y tamaño del arreglo. En la figura 16 observamos la mejora de las prestaciones de radiación a través de una reducción del ancho de haz y lóbulos laterales.

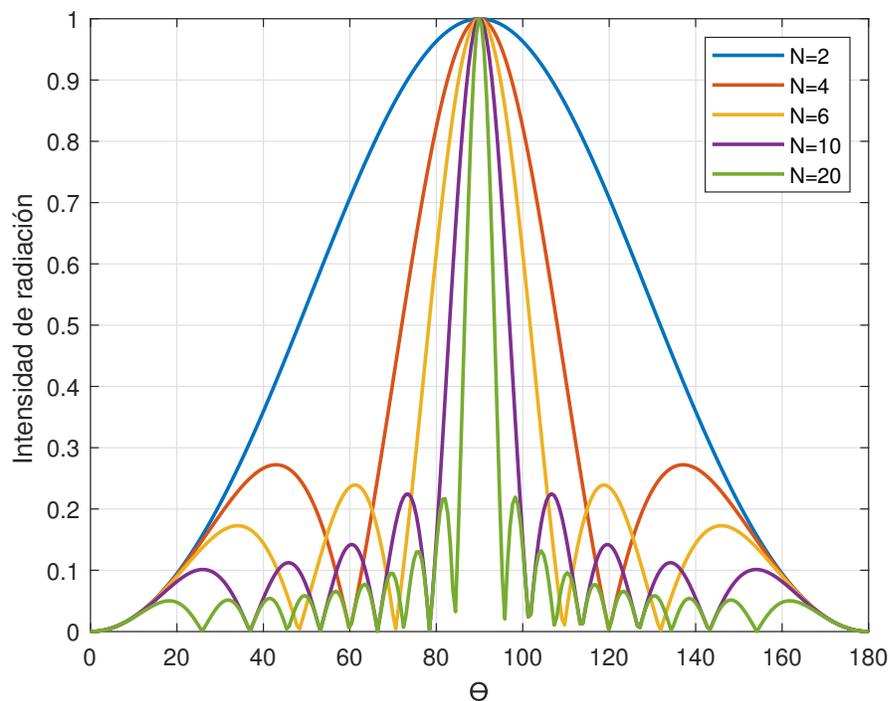


Figura 16. Comparación de diagramas de radiación para diferente número de elementos de antena (Adaptado de Rahman et al. (2017))

3.3. Factor de arreglo

El factor de arreglo describe como se combinan los campos de los elementos de antena individuales para producir un patrón de radiación total. Este factor es una función del número de elementos en el arreglo, la distancia entre ellos, sus amplitudes y fases relativas y su configuración geométrica (Balanis, 2016). La contribución conjunta de todos los elementos de antena se obtiene a través de la suma vectorial de los campos emitidos por los elementos individuales. En un arreglo donde todos los elementos son

idénticos, el campo total está dado por el producto del campo producido por un único elemento de antena, colocado en un punto de referencia (usualmente el origen) y el factor de arreglo (Balanis, 2016):

$$E[total] = E[un\ solo\ elemento\ en\ el\ punto\ de\ referencia] \times [factor\ de\ arreglo] \quad (6)$$

A esta ecuación se le denomina multiplicación de patrones. El factor de arreglo no depende de las características direccionales de los propios elementos radiantes, lo que permite formularlo considerando dichos elementos como fuentes isotrópicas. Una antena isotrópica es un concepto teórico donde una antena radia con la misma intensidad de radiación en todas las direcciones del espacio (Cardama Aznar et al., 2002). Se asume que la fuente isotrópica tiene la misma amplitud, fase y posición del elemento que está reemplazando. Al tratar los elementos de antena como fuentes isotrópicas, el campo total resultante mediante la multiplicación de patrones es igual al factor de arreglo.

La ecuación del factor de arreglo cambia en dependencia de la configuración geométrica del arreglo. Cuando los elementos de antena están colocados en diferentes configuraciones geométricas, la manera en que interactúan entre sí y se combinan para formar el patrón de radiación resultante varía significativamente. Por ejemplo, en un arreglo lineal, donde los elementos se colocan en línea recta, la radiación de un elemento solo interactúa con la radiación de los elementos que tiene a los costados. Por otro lado, en un arreglo planar uniforme, donde los elementos se encuentran organizados en filas y columnas, la radiación de un elemento interactúa no solo con la radiación de los elementos sobre su misma fila, si no también con la radiación de los elementos en las filas adyacentes. Las ecuaciones del factor de arreglo para las geometrías implementadas en esta tesis se abordan en las secciones 3.4, 3.5, 3.6.

3.4. Arreglo lineal

Los elementos de antena en un arreglo lineal se colocan sobre un eje tal como se ilustra en la figura 17. La combinación de los campos de N elementos de antena, considerando su configuración geométrica y bajo la suposición de que los elementos son isotrópicos, se expresa a través de la ecuación del factor de arreglo (Balanis, 2016):

$$FA = A_1 + A_2 e^{j(kd\cos(\theta)+\beta)} + \dots + A_N e^{j(N-1)(kd\cos(\theta)+\beta)} = \sum_{n=1}^N A_n e^{j(n-1)(kd\cos(\theta)+\beta)} \quad (7)$$

Donde $k = 2\pi/\lambda$, A_n es la excitación de amplitud del n -ésimo elemento, j es la unidad imaginaria, d es la separación entre elementos de antena, θ es el ángulo de elevación de la onda plana respecto al eje donde se extiende el arreglo y β es la diferencia en fase entre los elementos.

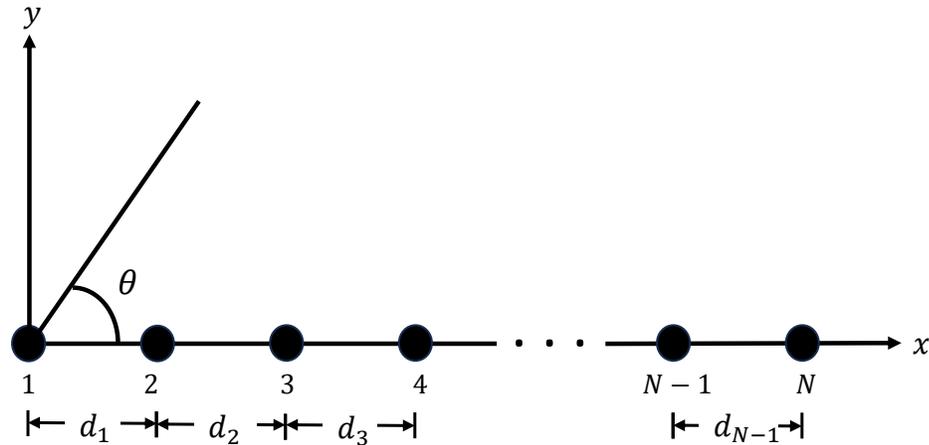


Figura 17. Arreglo lineal (Adaptado de Balanis (2016))

3.5. Arreglo planar

Los elementos de antena en un arreglo planar se colocan sobre un plano. Esta clase de arreglos puede adaptar diversas geometrías, tales como la circular o rectangular (He & Wang, 2023). Esta tesis aborda la implementación de dos variaciones geométricas de un arreglo planar. En primer lugar, se presenta un arreglo rectangular en el que los elementos se organizan en filas y columnas, tal como se observa en la figura 18. Posteriormente, se explora otro tipo de arreglo en el que los elementos de antena se distribuyen de manera dispersa en el plano. Un arreglo de antenas planar disperso contiene sustancialmente menos elementos de antenas que un arreglo planar rectangular con separaciones uniformes (IEEE,2014).

Los arreglos planares dispersos se dividen en dos categorías: arreglos planares dispersos y arreglos planares reducidos. En el primero, la disposición sigue siendo periódica, es decir, los elementos se colocan siguiendo un patrón regular. En el segundo, los elementos se distribuyen de manera arbitraria, sin mantener esta periodicidad. En ausencia de requisitos especiales, se puede utilizar el término arreglos planares dispersos para referirse a ambas clasificaciones de manera conjunta (He & Wang, 2023). En esta tesis, se implementa el arreglo de antenas reducido, el cual se ilustra en la figura 19.

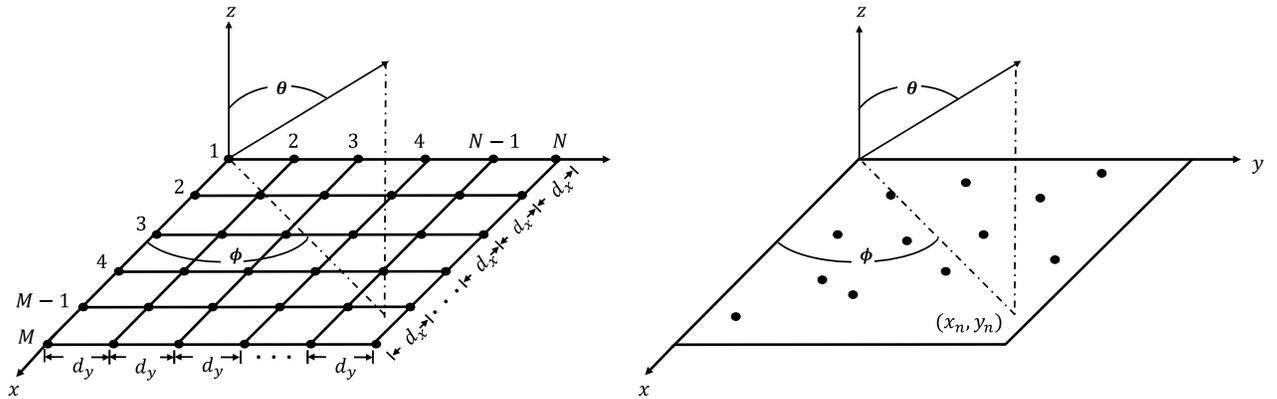


Figura 18. Arreglo planar rectangular periódico (Adaptado de **Figura 19.** Arreglo planar aperiódico (Adaptado de Reyna He & Wang (2023)) et al. (2012))

Un arreglo lineal genera un patrón de radiación con simetría de revolución alrededor del eje del arreglo. Organizar elementos en un plano bidimensional posibilita la creación de patrones de radiación más diversos, ya que la radiación se conforma y dirige en las dos coordenadas esféricas del espacio (θ y ϕ). Esto es gracias a que un arreglo planar no se ve limitado por las restricciones que impone la simetría de revolución (Cardama Aznar et al., 2002). El factor de arreglo de un arreglo planar está dado por la siguiente expresión (Reyna et al., 2012):

$$FA = \sum_{n=1}^N A_n e^{j[k(x_n \sin\theta \cos\phi + y_n \sin\theta \sin\phi)]} \quad (8)$$

Donde θ es el ángulo de la onda plana en el plano de elevación, ϕ es el ángulo de la onda plana en el plano de azimutal, x_n y y_n son las coordenadas en los ejes x y y respectivamente del n -ésimo elemento en el plano.

3.6. Arreglo de anillos concéntricos

Un arreglo de anillos es un arreglo planar donde los elementos de antena se colocan sobre una o varias circunferencias. Si estos círculos con diferentes radios comparten un centro, entonces el arreglo planar es un arreglo de anillos concéntricos (Haupt, 2008). La figura 20 es un diagrama de un arreglo de anillos

concéntricos compuesto por M anillos, cada uno con N_n elementos y con un radio dado por a_m . La separación entre elementos de antena en un anillo m puede ser tanto periódica o aperiódica. De la misma manera, la distancia entre anillos puede variar o mantenerse constante. El factor de arreglo para esta geometría esta dado por las ecuaciones 9 y 10 (Ibarra et al., 2015):

$$FA = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_n} A_n e^{jka[u \cos \Delta \phi_{mn} + v \sin \Delta \phi_{mn}]} \quad (9)$$

$$\Delta \phi_{mn} = \frac{2\pi \sum_{n=1}^{N_n} d_{mn}}{\sum_{n=1}^{N_n} d_{mn}} \quad (10)$$

Donde n es el enésimo elemento de antena en el anillo m ; $k = 2\pi/\lambda$ es la constante de fase; $u = \sin\theta\cos\phi$, $v = \sin\theta\sin\phi$ y d_{mn} es la longitud de arco desde el elemento n hasta el elemento $n + 1$ en el anillo m .

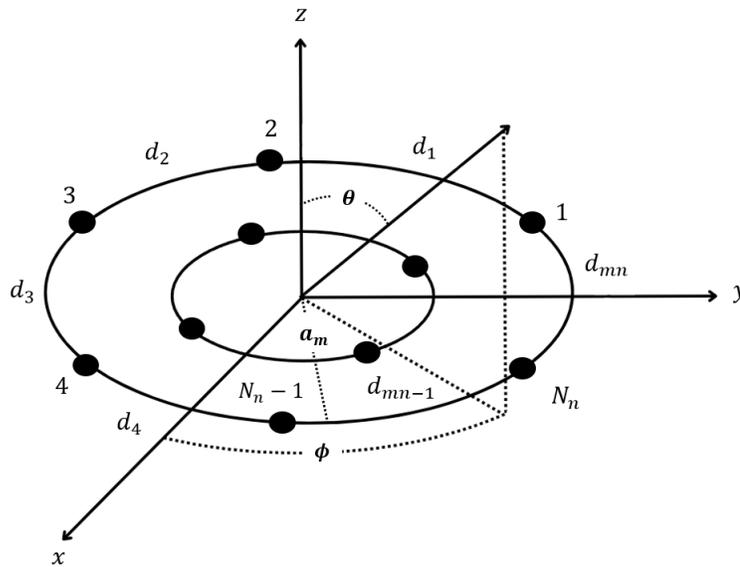


Figura 20. Arreglo de anillos concéntricos (Adaptado de Ibarra et al. (2015))

3.7. Conclusiones

Los arreglos de antenas son una herramienta que puede ser utilizada en un grupo diverso de aplicaciones. Esto es gracias a que tienen la capacidad de ser adaptados para cumplir las características requeridas por cada aplicación. En este capítulo, se han explorado algunos parámetros de los arreglos que pueden ser modificados según convenga, con el propósito de alcanzar el patrón de radiación deseado. La separación entre los elementos de antena, la amplitud y fase de los elementos individuales, así como la elección de

la geometría del arreglo, desempeñan un papel fundamental en el resultado final.

El cumplimiento de los estándares de calidad de la radiación según la aplicación del arreglo de antenas puede ser evaluado a través de instrumentos analíticos como el factor de arreglo y el diagrama de radiación. En este capítulo, se exploran diversas técnicas de diseño de arreglos de antenas que desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de esta tesis. Estas metodologías se aplican en la síntesis de arreglos de antenas con el propósito de lograr una radiación tipo Isoflux. La naturaleza de este tipo de radiación conlleva ciertas complejidades, como se ha abordado en el capítulo previo, lo cual implica que el diseño del arreglo requiere de la aplicación de individual o colectiva de las técnicas discutidas en el capítulo presente.

Capítulo 4. Metodología de diseño de sistemas de radiación tipo Isoflux

Sabemos que la radiación que emite un arreglo de antenas puede ser modificada a través de la configuración geométrica del arreglo. Otros parámetros que tienen algún efecto en la forma de la radiación son la cantidad y posición de los elementos antena individuales, así como sus excitaciones de amplitud y fase (Balanis, 2016). Los arreglos de antenas lineal, planar y de anillos de concéntricos se implementan en este trabajo para generar la radiación Isoflux para las alturas orbitales de 340 km, 550 km y 1150 km. Para cada una de las geometrías, se tienen dos casos de diseño que describen a continuación.

En el primero, las separaciones entre los elementos de antena se mantienen uniformes, mientras que las excitaciones de amplitud individuales son diferentes. En el segundo, cada uno de los elementos de antena tiene tanto excitaciones como separaciones no uniformes. La finalidad es encontrar los valores de separación entre elementos de antena y amplitudes que generen un patrón de radiación que se asemeje lo más posible a la máscara Isoflux. Para la búsqueda de estos valores, se utiliza la técnica de algoritmos genéticos.

4.1. Algoritmos genéticos

Para satélites en órbitas LEO, el haz principal del patrón de radiación se extiende por lo menos 100° (Ibarra et al., 2015). Este haz tiende a ensancharse conforme la altura orbital decrece. El diseño de arreglos de antenas para satélites en esta órbita se complica, ya que la radiación debe coincidir con la máscara Isoflux en una gran cantidad de grados (Ibarra et al., 2015). Una radiación con estas características se puede lograr si se encuentra el conjunto de excitaciones de amplitud y separaciones entre elementos de antena adecuados. Los métodos analíticos resultan insuficientes en esta búsqueda debido al gran número de combinaciones posibles. El tiempo requerido para encontrar la combinación óptima aumenta de manera exponencial, por lo que para esta clase de problemas de diseño estos métodos no son viables.

Para este tipo de búsquedas, una mejor opción es recurrir a métodos heurísticos. A pesar de que no se garantiza la obtención de la solución óptima, los métodos heurísticos son capaces de encontrar soluciones aceptables por medio de prueba y error, en una cantidad de tiempo razonable (Yang, 2020). Los algoritmos genéticos (AG) son un ejemplo de métodos de optimización heurísticos que han sido utilizados para el diseño de arreglos de antenas (Ares-Pena et al., 1999). Desarrollados en la década de los 60s y 70s por John Holland, los AG están basados en la teoría de evolución biológica por selección natural de

Darwin.

Su método de búsqueda utiliza operadores genéticos como el cruzamiento y recombinación, mutación y selección del más apto (Yang, 2020). El algoritmo en su forma más sencilla, misma que se utiliza en este trabajo de investigación, se compone de los siguientes pasos:

1. **Generar población inicial:** El AG comienza con un conjunto inicial de posibles soluciones aleatorias al que llamamos población. Cada solución es un individuo y cada individuo contiene un cromosoma. En este caso, los cromosomas están compuestos de un conjunto de valores de excitaciones de amplitud y separaciones entre elementos de antena. Un solo valor de amplitud o separación de un elemento de antena dentro del cromosoma es un gen. Todos los valores posibles que puede tomar un gen se denominan alelos.
2. **Cálculo de aptitud del individuo:** Se genera un factor de arreglo por cada individuo de la población. La aptitud de un individuo se determina a partir de la capacidad del factor de arreglo para cumplir con las características de radiación deseadas. Las métricas utilizadas para determinar la aptitud de un individuo se discuten en la sección 4.3.
3. **Selección de padres:** El criterio de selección se basa en dar mayor probabilidad de ser padres a los individuos más aptos, con el objetivo de mejorar la población en generaciones futuras. La técnica de selección utilizada en la implementación de los AG en esta tesis es la selección por jerarquías. En este método propuesto por Baker (1985), todos los individuos son ordenados de mayor a menor de acuerdo con su valor de aptitud. El valor esperado de cada individuo se calcula según su jerarquía como se muestra en la ecuación 11.

$$E(i) = Min + (Max - Min) \frac{jerarquia(i) - 1}{P - 1} \quad (11)$$

Donde P es el tamaño de la población y $Min = 2 - Max$. En Baker (1985), se recomienda $Max = 1.1$. El siguiente paso es aplicar otra técnica de selección llamada ruleta. Para esto, se genera un número aleatorio s entre 1 y P . Los valores esperados se suman uno a uno hasta que la suma sea mayor o igual a s . El individuo cuyo valor esperado logre que la suma cumpla con la condición es el seleccionado. La ruleta se gira P veces para elegir a todos los padres.

4. **Cruzamiento y mutación:** En el cruzamiento, un par de cromosomas padres se combinan para producir descendencia. En esta implementación de los AG se realiza un cruzamiento de dos puntos.

El procedimiento es el siguiente: dos posiciones se eligen aleatoriamente y ambas cromosomas se fragmentan en esos puntos para crear dos segmentos. El segmento del primer cromosoma pasa a ocupar el espacio del segmento en el segundo cromosoma y viceversa, tal como se ilustra en la figura 21.

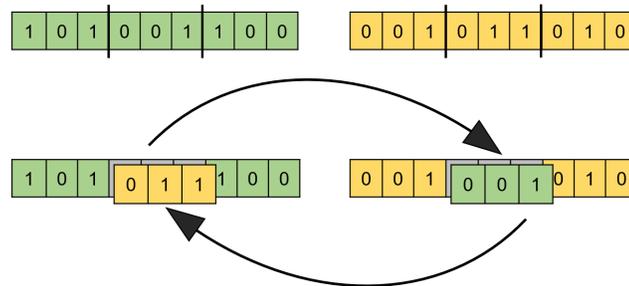


Figura 21. Cruce de dos puntos

Para mantener la diversidad en la población, algunos individuos mutan. La mutación de un individuo ocurre cuando se modifica un gen en su cromosoma arbitrariamente. En esta implementación de los AG, la probabilidad de mutación es del 10%. El gen que será modificado y el nuevo valor que lo reemplazará son generados aleatoriamente.

5. **Elitismo:** Una vez que se crea un conjunto nuevo de individuos a través del proceso de cruzamiento y mutación, es probable que algunos de los individuos de los cuales descendieron sean más aptos. Este nuevo conjunto de individuos formará la siguiente generación y los individuos de la población actual ya no formarán parte de ella a pesar de ser mejores. En De Jong (1975), se propone una estrategia de elitismo, que asegure que los mejores individuos entre los padres e hijos permanezcan en la generación subsecuente. En esta estrategia, los padres y los hijos se ordenan según su valor de aptitud y los primeros P individuos serán la nueva población. Este es el término de la primera iteración y el algoritmo vuelve a comenzar en el paso 2.

El AG termina cuando itera una cantidad de veces predeterminedada. Cada iteración representa una generación. Con cada generación, se busca que la población en general adopte características de los mejores individuos y como consecuencia se vuelvan más aptos. El objetivo es alcanzar a un fenómeno llamado convergencia donde todos los individuos comparten el mismo cromosoma. Conforme la población converge, el valor de aptitud promedio será igual al del mejor individuo (Beasley et al., 1993).

El tamaño de la población juega un papel importante en la efectividad de los AG. Si la población es muy

pequeña no existe diversidad suficiente entre los individuos. Esto puede causar convergencia prematura, lo que significa que el algoritmo tiende a favorecer en un inicio a un individuo aparentemente muy apto. Como resultado, se limita la búsqueda y genera una solución subóptima. Sin embargo, si la población es muy grande se requiere más tiempo computacional para evaluar a todos los individuos, sin aportar un beneficio adicional. Según Yang (2020), la investigación y la observación empírica sugieren que una población de 40 a 200 individuos es suficiente en la mayoría de los casos.

En este trabajo de investigación se estableció un tamaño de población de $P = 200$. El número de iteraciones fue variado para analizar los efectos de diferentes valores en obtención de la solución; se analizaron 2000, 3000 y 4000 generaciones. Los algoritmos genéticos son una excelente opción para encontrar soluciones a problemas complejos. Tienen la capacidad de explorar una gran cantidad de posibles soluciones y localizar a individuos prometedores rápidamente, incluso con poca información sobre el problema (Vie et al., 2021). No obstante, los AG también presentan algunas limitaciones. Una de las principales está relacionada con la configuración de parámetros y condiciones iniciales.

El tamaño de la población, el criterio de selección de individuos, el método de cruzamiento y la probabilidad de mutación son algunos de los parámetros que pueden afectar el desempeño del AG. El resultado de la combinación de las técnicas elegidas en cada etapa del AG tiene efectos variados en la obtención de la solución. Una selección inapropiada puede resultar en que el algoritmo converja prematuramente o que encuentre una solución inválida (Yang, 2020). Otra limitación es que para algunos casos el costo computacional es muy elevado. Cada miembro de la población debe ser evaluado individualmente.

A medida que el tamaño de la población crece o cuando se tiene un problema de mayor complejidad, el tiempo requerido por el algoritmo para alcanzar una solución viable se incrementa significativamente (Vie et al., 2021). El tiempo de ejecución del algoritmo se puede mejorar modificando las configuraciones de los parámetros, ya que algunas técnicas son menos computacionalmente costosas. Por lo que la configuración adecuada de los parámetros requerirá un análisis cuidadoso y experimentación para encontrar el equilibrio entre la calidad de la solución y el tiempo de ejecución.

4.2. Implementación de los arreglos de antenas

En esta sección, se proporcionan los intervalos de posibles valores de excitaciones de amplitud y separaciones entre los elementos de antena para cada una de las diferentes geometrías. El rango dinámico de

-14 a 14 se mantuvo para todos los casos de diseño. Cuando la excitación de amplitud de un elemento de antena es negativa significa que la señal en ese elemento sufrirá un cambio de fase de 180° . Considerar valores de excitación de amplitud positivos y negativos nos ofrece más grados de libertad en el proceso de optimización (Ibarra et al., 2015). Los rangos de separaciones entre elementos de antena se seleccionan en dependencia a la configuración geométrica del arreglo. En las subsecciones 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3, se presenta la metodología de selección de estos rangos para cada caso.

4.2.1. Arreglo lineal

La configuración geométrica más sencilla consiste en 14 elementos de antena en línea recta con una separación de 0.5λ , tal como se ilustra la figura 22. El número de elementos de antena se concretó a 14 después de realizar varias simulaciones con diferentes cantidades de elementos. Tras analizar los resultados, se determinó que este número de elementos de antena ofrecía el mejor desempeño en términos del error promedio en la radiación generada, en comparación con la máscara Isoflux. Esta cantidad también es empleada en el arreglo lineal aperiódico.

En este caso, la separación entre elementos se restringe a 0.4λ en el límite inferior para evitar los efectos del acoplamiento mutuo (Panduro et al., 2005). Así mismo, los elementos de antena deben tener una separación menor a λ para evitar lóbulos de rejilla (Balanis, 2016). Para esta configuración geométrica se abordaron tres casos de diseño diferentes, donde el límite superior se restringió a 0.7λ , 0.8λ y 0.9λ respectivamente. En la figura 23, se observa un arreglo lineal no uniforme donde el rango de separación es de 0.4λ a 0.8λ .

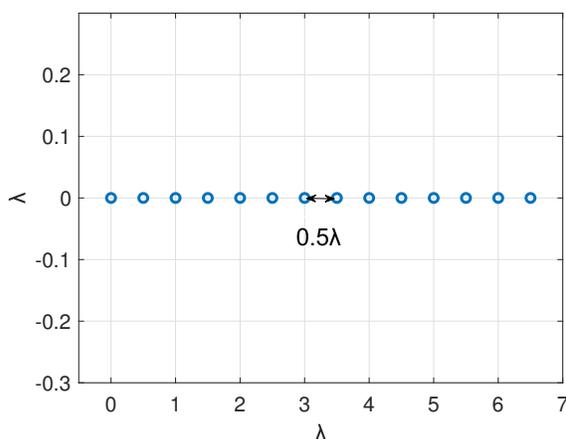


Figura 22. Arreglo lineal con separaciones uniformes

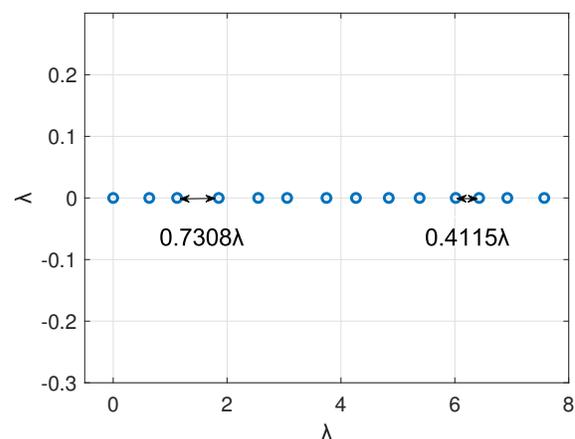


Figura 23. Arreglo lineal con separaciones no uniformes

4.2.2. Arreglo planar

Para el caso uniforme, se implementa un arreglo cuadrado de 14×14 elementos. La separación entre elementos es de 0.5λ al igual que en el arreglo lineal uniforme. Un fragmento del arreglo planar periódico adoptado en esta tesis se ilustra en la figura 24. El caso no uniforme se aborda de la siguiente manera: un número de elementos de antena se colocan arbitrariamente dentro de un área ubicada en el primer cuadrante del plano cartesiano. A diferencia de las demás configuraciones donde la optimización es de separaciones entre elementos de antena, en esta ocasión se optimizan sus posiciones dentro del plano.

La cantidad de elementos de antena y la apertura del arreglo fue alternada para analizar sus efectos en la calidad de las soluciones. El número de elementos de antena va desde los 8 hasta los 20 elementos, mientras que la apertura del arreglo va de los 5λ a 10λ . La restricción de separación mínima entre elementos de 0.5λ se mantiene para esta geometría. Esta se impuso calculando la distancia euclidiana entre todos los elementos de antena y utilizando los AG para descartar a aquellas soluciones donde los elementos tuvieran una proximidad menor a 0.5λ . El arreglo en la figura 25 es un arreglo planar no uniforme de 20 elementos con una apertura de 5λ .

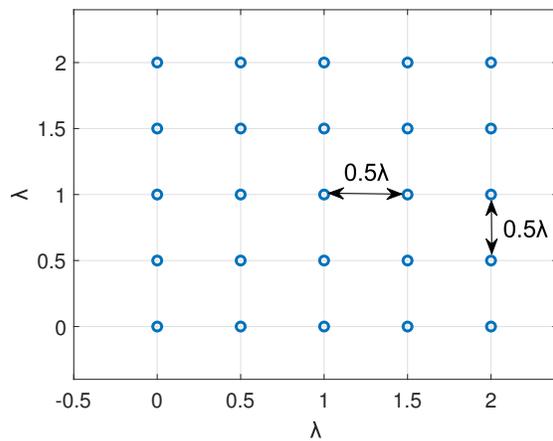


Figura 24. Arreglo planar con separaciones uniformes

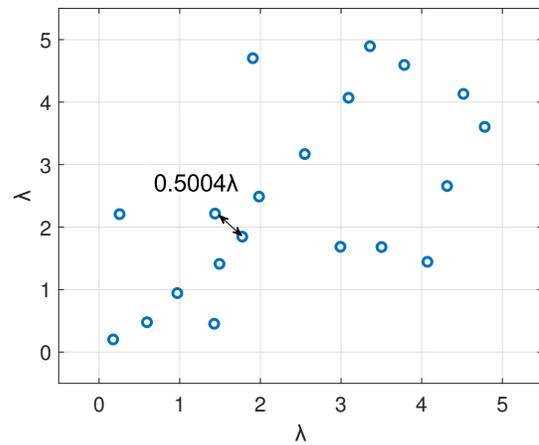


Figura 25. Arreglo planar con separaciones no uniformes

4.2.3. Arreglo de anillos concéntricos

Para el diseño de los arreglos de antenas de anillos concéntricos con distribución uniforme, se emplearon diferentes cantidades de anillos y elementos. La primera decisión de diseño consiste en seleccionar la

cantidad de anillos que conformarán el arreglo. En la presente tesis, los arreglos están compuestos desde uno hasta cinco anillos. La siguiente decisión es elegir la cantidad de elementos por anillo, para la cual se consideraron numerosas opciones. Esto con el objetivo de estudiar los efectos de modificar esta variable de diseño en la obtención de la radiación Isoflux. El radio del primer anillo se define en función de la cantidad de elementos espaciados a una distancia de 0.5λ , mientras que el resto de los anillos aumenta su radio 0.5λ por cada anillo adicional.

En la figura 26, se tiene un arreglo de antenas de anillos concéntricos con 30 elementos; 5 en el primer anillo, 10 en el segundo y 15 en el tercero. Para el arreglo de anillos concéntricos con distribución no uniforme, se tienen dos casos de diseño. En el primer caso, el arreglo se compone de un único anillo. El rango de posibles separaciones entre los elementos va desde 0.5λ hasta λ . En el segundo caso, el arreglo se compone desde tres hasta siete anillos. En esta configuración de arreglo de anillos concéntricos con separaciones no uniformes, los radios de los anillos tienen diferentes dimensiones.

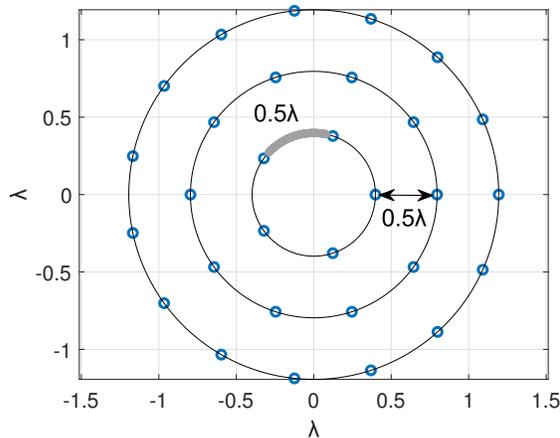


Figura 26. Arreglo de anillos concéntricos uniforme

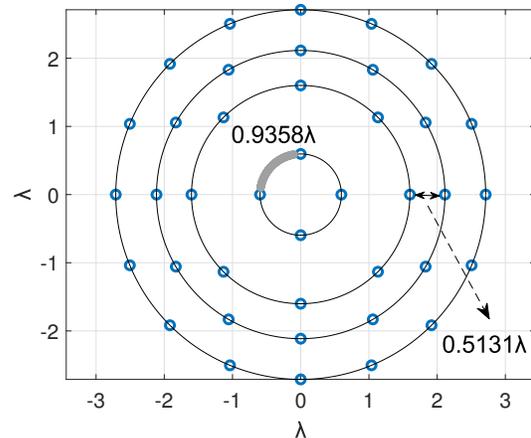


Figura 27. Arreglo de anillos concéntricos no uniforme

Las separaciones angulares entre elementos deben de ser por lo menos 0.5λ , por lo que el perímetro mínimo es la multiplicación de la cantidad de elementos del primer anillo por 0.5. El radio mínimo de este anillo se calcula a partir de este perímetro y el radio máximo se obtiene sumando una unidad al radio mínimo. El radio de los anillos subsecuentes se determina sumando un incremento al radio del anillo anterior. Utilizando los AG, se busca encontrar el radio del primer anillo y los incrementos correspondientes a los radios del resto de los anillos. Estos valores se encuentran restringidos dentro del rango definido por el radio mínimo y máximo. La cantidad de elementos de antena en esta geometría va desde 18 hasta los 252 elementos de antena.

En la figura 27, se ilustra un arreglo de antenas de anillos concéntricos con separación entre anillos no uniforme. Este arreglo está compuesto por 40 elementos; 4 en el primer anillo, 8 en el segundo, 12 en el tercero y 16 en el cuarto.

4.3. Función objetivo

La función objetivo es aquella que asigna un valor de aptitud a cada individuo según su competencia para resolver el problema en cuestión (Mitchell, 1998). En este problema de optimización, el cromosoma de cada individuo contiene un conjunto de excitaciones de amplitud o separaciones entre elementos que se utilizan para generar un factor de arreglo. En esta investigación, un individuo se considera apto cuando el factor de arreglo que produce tiene la capacidad de crear una radiación que presente una similitud sustancial con la máscara Isoflux. Esta capacidad se cuantifica a través de dos principales métricas; el error promedio y el error máximo.

La máscara Isoflux y el factor de arreglo se generan utilizando un conjunto de 600 muestras para el rango de valores de $\theta = -90^\circ$ hasta $\theta = 90^\circ$ y un solo corte azimutal en $\phi = 0^\circ$. Una tarea propuesta para la función objetivo es minimizar el promedio del error absoluto calculado para cada muestra entre el factor de arreglo y el estándar ideal, la máscara Isoflux. Una forma adicional de evaluar la aptitud de un individuo es mediante la determinación del error absoluto máximo en el factor de arreglo. Dado que existe simetría en el plano de elevación, únicamente es necesario evaluar las muestras desde el primer punto máximo de la máscara Isoflux hasta el punto más bajo. La formulación de estas dos funciones objetivo es la siguiente:

$$Error(m) = |R(\theta) - AF(\theta, \phi)| \quad (12)$$

$$FO_1 = \frac{\sum_{m=m_{max1}}^{m_{min}} Error(m)}{m_{min} - m_{max1} + 1} \quad (13)$$

$$FO_2 = Error_{max} \quad (14)$$

Donde m es el número de la muestra, m_{max1} es la muestra donde se encuentra el primer máximo de la máscara Isoflux y m_{min} es el punto mínimo de la máscara. Por último, se propone una tercera opción para la función objetivo donde el propósito es minimizar ambos parámetros simultáneamente.

$$FO_3 = \frac{\sum_{m=m_{max1}}^{m_{min}} Error(m)}{m_{min} - m_{max1} + 1} + Error_{max} \quad (15)$$

Se llevaron a cabo múltiples corridas del AG implementando diferentes funciones objetivo. La calidad de los resultados obtenidos tras cada corrida fueron evaluados a través de estos mismos dos parámetros: el error promedio y el error máximo. Este análisis permitió identificar la función objetivo más adecuada para resolver el problema de optimización. La complejidad de este problema depende de características como la altura orbital, la geometría del arreglo, así como la cantidad de elementos de antena y distintos rangos de posibles valores de excitaciones de amplitud y separaciones entre elementos. Cabe mencionar que en el caso del arreglo de antenas planar no uniforme, la tarea de la función objetivo incluye en todos los casos la obtención de una distancia euclidiana de al menos 0.5λ .

4.4. Proceso de diseño

Esta tesis tiene como objetivo desarrollar sistemas de radiación tipo Isoflux para diversas alturas orbitales en satélites LEO. Durante este capítulo se han abordado las distintas herramientas que se utilizan para este propósito. En la metodología de diseño se especifica el orden de implementación y adaptación de estas herramientas, de acuerdo con el problema de diseño en cuestión. Este proceso de diseño se representa en la figura 28. A continuación, se presenta una descripción de cada etapa que conforma el diagrama.

Como primer paso, se selecciona la altura orbital. La altura orbital seleccionada establecerá la dificultad del problema de optimización. Esto es debido a que la máscara Isoflux se ensancha significativamente conforme la altura orbital decrece. La selección de la altura orbital tiene un impacto sobretodo en la selección de la cantidad de elementos de antena y de la función objetivo. La geometría que sea seleccionada en la segunda etapa será evaluada por su capacidad de cumplir con la radiación Isoflux para la altura orbital previamente designada. Uno de los factores más significativos para el desempeño del arreglo de antenas con una cierta geometría es su cantidad de elementos de antena. La configuración de la cantidad de elementos en el tercer paso esta vinculado a los resultados obtenidos en corridas anteriores.

El rango de posibles valores de excitaciones de amplitud y separaciones entre elementos de antena se modifica en esta etapa de ser necesario. En el paso subsecuente, la función objetivo se ajusta en caso de

que la calidad de las soluciones no cumpla con las expectativas. Por último, se optimizan los valores de excitaciones de amplitud y separaciones entre elementos de antena utilizando algoritmos genéticos. El entorno de programación utilizado para la implementación de los AG en este trabajo de investigación es MATLAB. Este proceso de diseño es iterativo, es decir, el proceso se repite realizando algunas modificaciones que puedan resultar en la producción de mejores soluciones. Los resultados obtenidos mediante esta metodología de diseño se analizan en el siguiente capítulo.

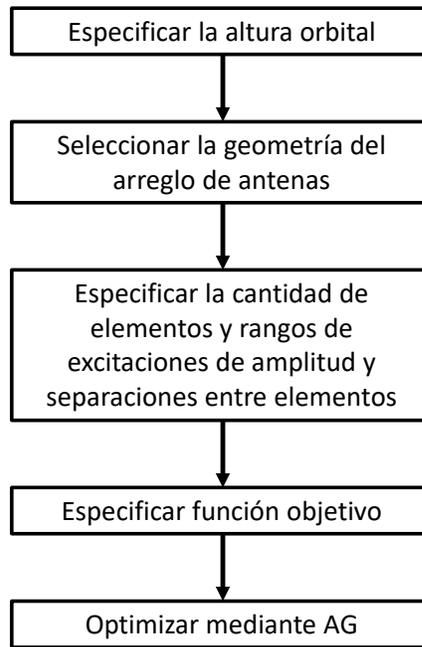


Figura 28. Metodología de diseño del arreglo de antenas

4.5. Conclusiones

El diseño de arreglos de antenas para radiación tipo Isoflux para satélites en las órbitas 340 km, 550 km y 1150 km requiere que todas las herramientas utilizadas trabajen armónicamente para producir resultados satisfactorios. Por ejemplo, un arreglo de antenas con una cierta geometría puede generar una solución viable para una de las alturas orbitales, mientras que para otra genera soluciones no satisfactorias o inaceptables. Una selección cuidadosa de cantidad de elementos en el arreglo, así como el rango de sus posibles valores de excitaciones de amplitud y separaciones aumenta la posibilidad de éxito para una cierta configuración del arreglo de antenas.

Conseguir excitaciones de amplitud y separaciones adecuadas mediante la optimización con algoritmos

genéticos depende también de su configuración. Las técnicas utilizadas en esta implementación de los AG, descritas en la sección 4.1, contribuyen a la producción de soluciones apropiadas que se presentan en el siguiente capítulo. La optimización mediante los AG ha sido sin duda uno de los componentes más importantes en esta investigación. Sin embargo, para los problemas más complejos como es el caso de los arreglos compuestos por una gran cantidad de elementos de antena los tiempos de ejecución son excesivamente prolongados.

Capítulo 5. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados del diseño de los arreglos de antenas de radiación tipo Isoflux para alturas orbitales de 340 km, 550 km y 1150 km. El algoritmo genético empleado para la optimización de las excitaciones de amplitud y el espaciado entre los elementos de antena se ejecutó de forma iterativa, arrojando un total de 378 soluciones viables. Los criterios de selección de resultados estuvieron sujetos a variaciones según cada caso. Las soluciones que demostraron el mejor compromiso entre las métricas de error promedio y error máximo para cada altura orbital y geometría se exponen en las siguientes secciones. Es importante mencionar que todas las soluciones fueron generadas por el algoritmo genético utilizando 600 muestras para el plano de elevación $\theta = [-90^\circ, 90^\circ]$ y un único corte en el plano azimutal en $\phi = 0^\circ$. Además, este capítulo incluye un análisis y comparación de los resultados obtenidos con cada configuración geométrica, para cada altura orbital, en relación con su desempeño en términos de la generación de la radiación Isoflux y la complejidad del sistema.

5.1. Órbita 340 km

La máscara Isoflux correspondiente a la altitud orbital de 340 km abarca gran parte del plano de elevación y presenta la caída de potencia más pronunciada. Debido a estas características, el diseño de los arreglos de antenas para esta órbita demandó un incremento de la cantidad de ajustes necesarios para alcanzar una solución viable. Esta solución se define por un error máximo inferior al 40 % y un error promedio por debajo del 15 %. De las 89 soluciones en total para esta órbita, 44 se generaron utilizando arreglos lineales, 25 con arreglos planares y 20 con arreglos de anillos concéntricos. A continuación, se presentan los resultados más destacados de cada geometría, tanto en su disposición periódica como aperiódica.

5.1.1. Arreglo lineal

El arreglo lineal uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 14 elementos de antena con una separación 0.5λ . La figura 29 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 6.11 %, siendo 20.03 % el valor más elevado. La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud fue llevada a cabo por el AG, empleando como función

objetivo la ecuación 15, multiplicada por un factor de dos. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 4000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 30. Los valores de excitaciones de amplitud se presentan en la tabla 4, la cual se encuentra en el anexo A.

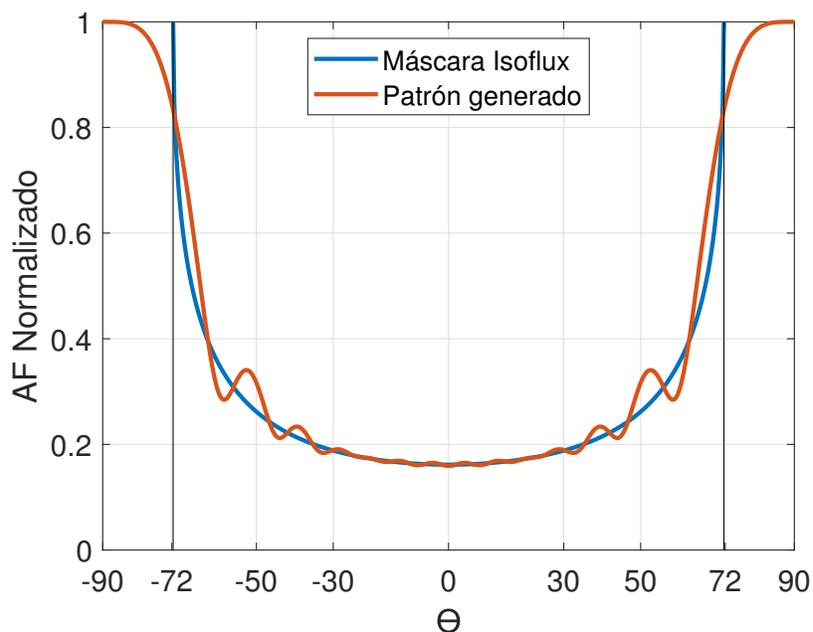


Figura 29. Patrón de radiación generado por el arreglo lineal uniforme diseñado para una altura orbital de 340 km

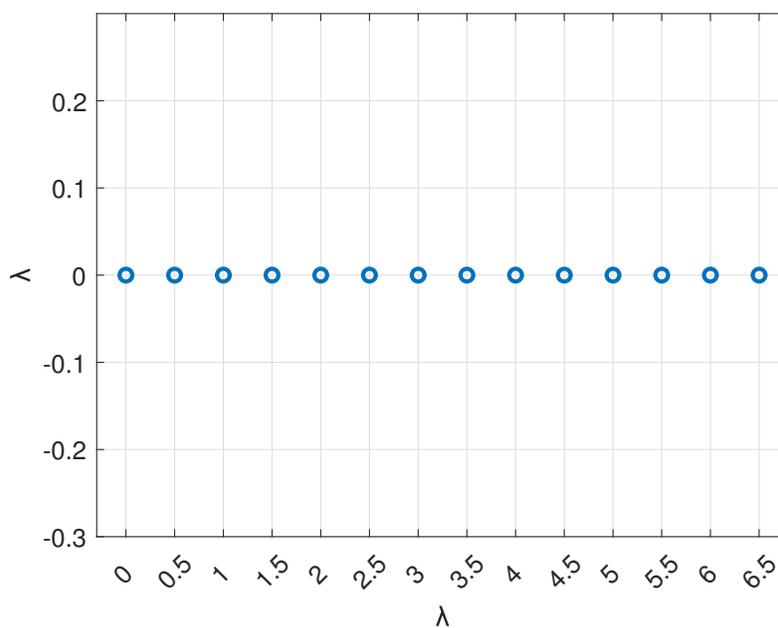


Figura 30. Geometría del arreglo lineal uniforme

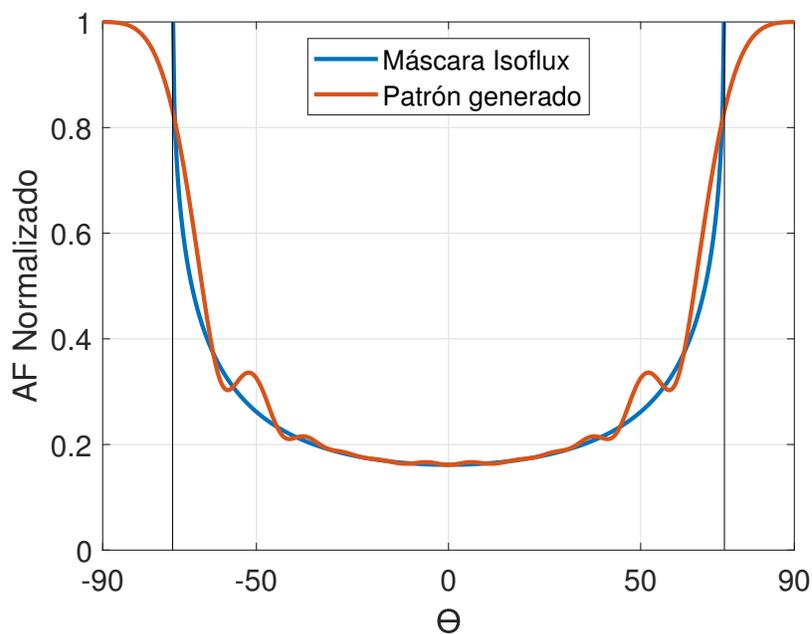


Figura 31. Patrón de radiación generado por el arreglo lineal no uniforme diseñado para una altura orbital de 340 km

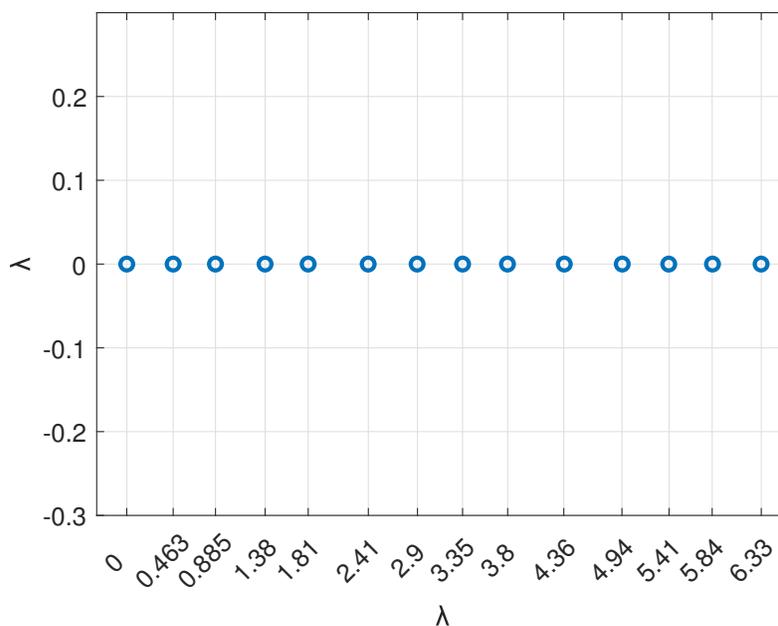


Figura 32. Geometría del arreglo lineal no uniforme para la altura orbital de 340 km

El arreglo lineal no uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 14 elementos de antena. La figura 31 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada

presenta un promedio del 5.4 %, siendo 20.9 % el valor más elevado. La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud y la separación entre elementos de antenas fue llevada a cabo por el AG, empleando como función objetivo la ecuación 15, multiplicada por un factor de dos. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La distancia entre elementos de antena se restringe al rango de 0.4λ a 0.6λ . La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 32. Los valores de excitaciones de amplitud y separación entre elementos se presentan en la tabla 5, la cual se encuentra en el anexo A.

5.1.2. Arreglo planar

El arreglo planar uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 196 elementos de antena. Estos elementos se ordenan en una matriz de 14 por 14 con una separación de 0.5λ entre ellos. La figura 33 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 4.9 %, siendo 24.37 % el valor más elevado. La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud fue llevada a cabo por el AG, empleando como función objetivo la ecuación 13. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 34. Los valores de excitaciones de amplitud se presentan en la tabla 6, la cual se encuentra en el anexo A.

El arreglo planar no uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 20 elementos de antena. La figura 35 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 7.32 %, siendo 26.65 % el valor más elevado. En esta geometría, los elementos de antena se encuentran distribuidos en un plano. En este caso de diseño, tanto las coordenadas en el eje x como en el eje y de la posición de los elementos se optimizan utilizando AG. En ambos ejes, las posiciones pueden variar en un rango de 0 a 5λ .

Para garantizar una distancia euclidiana mínima aceptable de 0.5λ , se incorpora esta restricción a la función objetivo. La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud y posiciones de los elementos fue realizada mediante el AG, empleando como función objetivo la ecuación 15, en conjunto con la restricción de distancia. En esta solución la separación mínima entre elementos es de 0.5021λ . Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación

de 2000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 36. Los valores de excitaciones de amplitud se presentan en la tabla 7, la cual se encuentra en el anexo A.

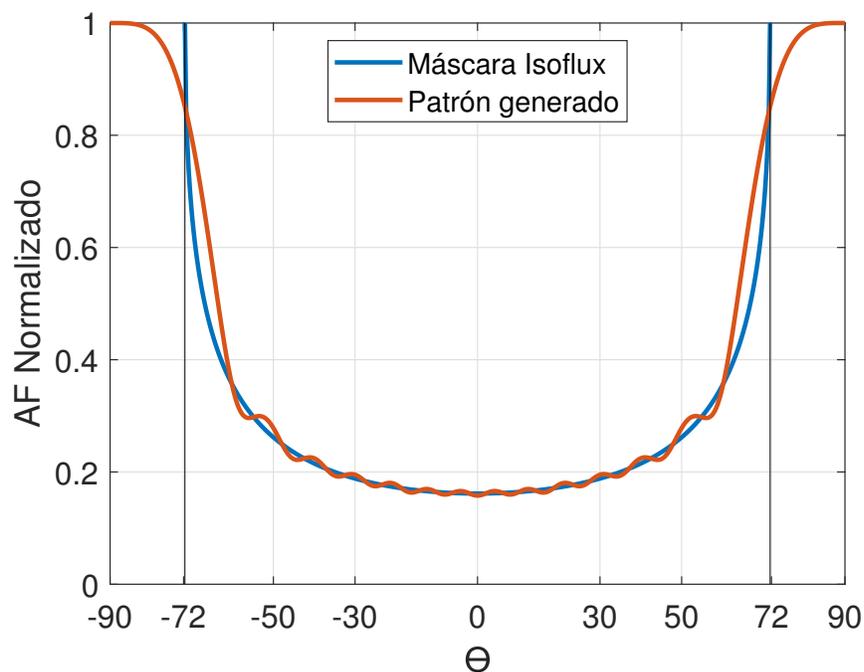


Figura 33. Patrón de radiación generado por el arreglo planar uniforme diseñado para una altura orbital de 340 km

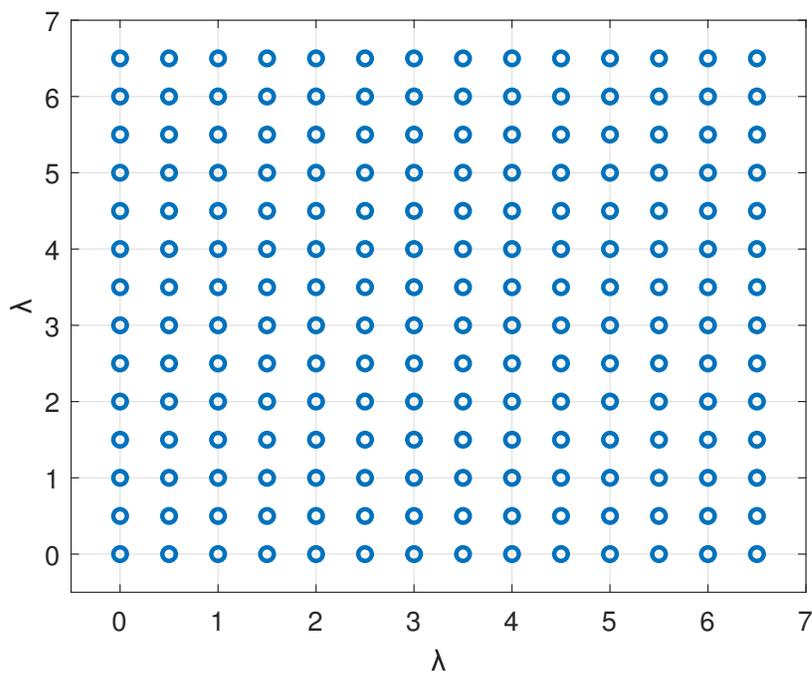


Figura 34. Geometría del arreglo planar uniforme

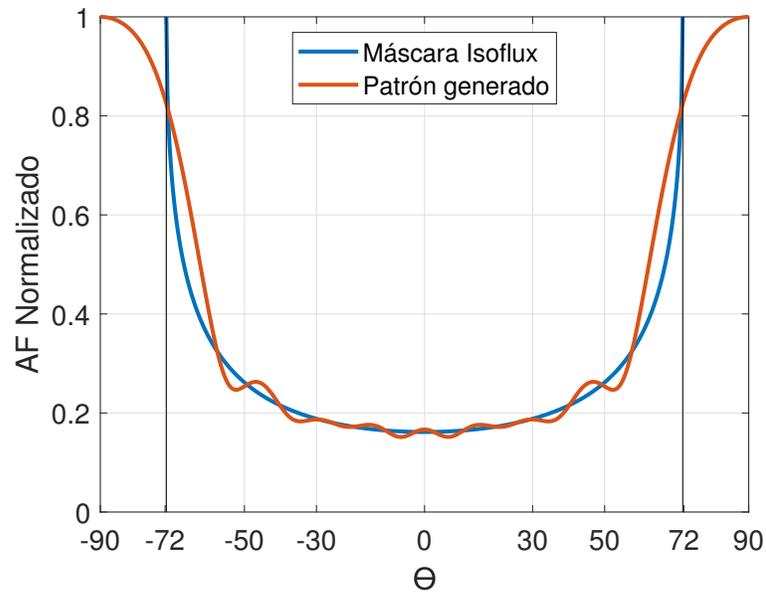


Figura 35. Patrón de radiación generado por el arreglo planar no uniforme diseñado para una altura orbital de 340 km

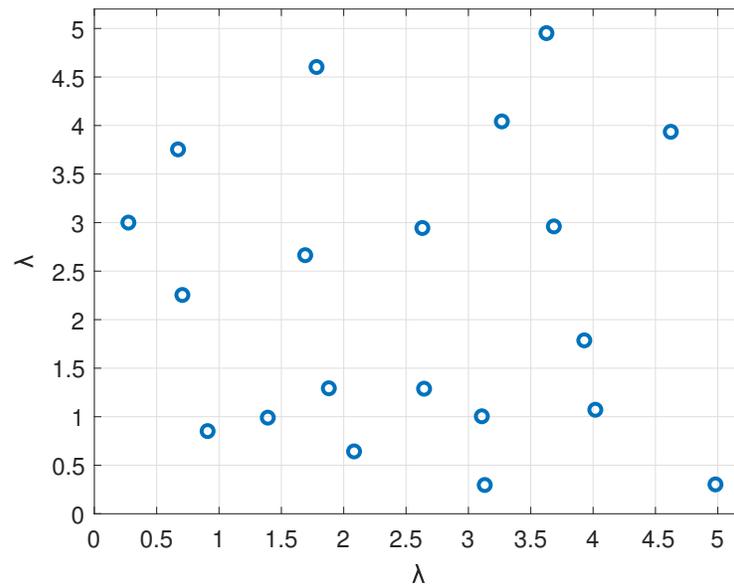


Figura 36. Geometría del arreglo planar no uniforme para la altura orbital de 340 km

5.1.3. Arreglo de anillos concéntricos

El arreglo de anillos concéntricos uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 120 elementos de antena distribuidos en cuatro anillos. La cantidad de elementos de antena en cada anillo aumenta en

múltiplos de 12 de manera progresiva. La separación entre elementos de antena (en longitud de arco) se mantiene constante en 0.5λ . La figura 37 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 6.56 %, siendo 23.97 % el valor más elevado.

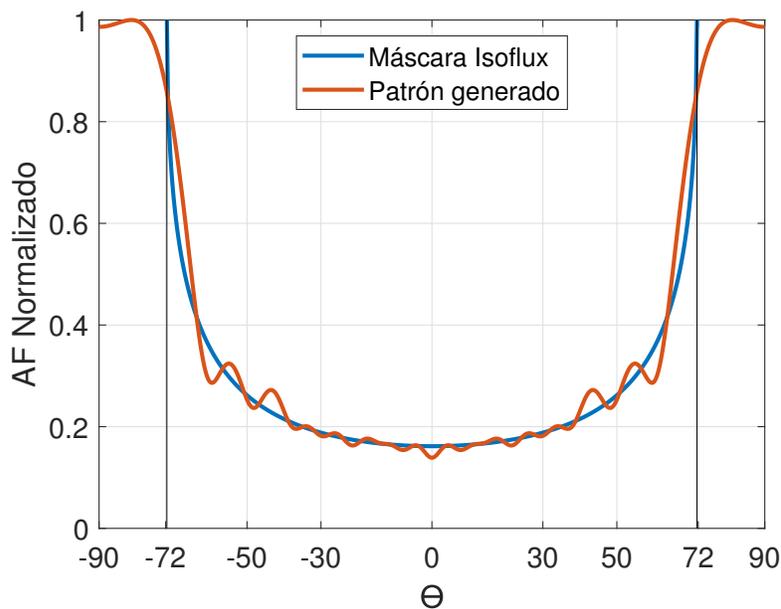


Figura 37. Patrón de radiación generado por el arreglo de anillos concéntricos uniforme diseñado para una altura orbital de 340 km

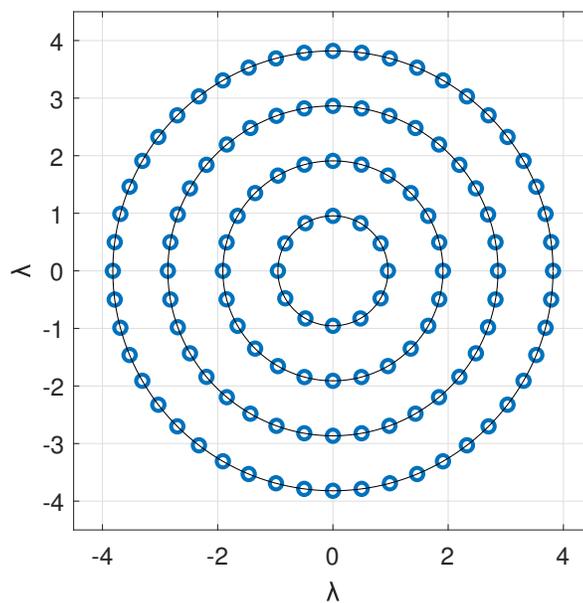


Figura 38. Geometría del arreglo de anillos concéntricos uniforme para la altura orbital de 340 km

La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud fue llevada a cabo por el AG, empleando como función objetivo la ecuación 15. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 38. Los valores de excitaciones de amplitud se presentan en la tabla 8, la cual se encuentra en el anexo A.

El arreglo de anillos concéntricos no uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 252 elementos de antena distribuidos en seis anillos. La cantidad de elementos de antena en cada anillo aumenta en múltiplos de 12 de manera progresiva. La figura 39 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 4.58 %, siendo 15.02 % el valor más elevado. En este caso de diseño se optimizan las separaciones entre anillos.

La separación mínima entre anillos se define a partir del radio que tendría el primer anillo si todos sus elementos tuvieran una separación de 0.5λ . Para establecer la separación máxima se suma 0.5λ a la separación mínima. Los elementos de antena se distribuyen de manera equidistante en el perímetro asociado al radio de cada anillo. Dicho radio se obtiene mediante la suma de las distancias calculadas, y posteriormente, se utiliza para determinar el perímetro correspondiente. En este arreglo, la menor separación entre elementos en un mismo anillo presenta una longitud de arco de 0.59λ .

La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud y separación entre anillos fue realizada mediante el AG, empleando como función objetivo la ecuación 15. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 40. Los valores de excitaciones de amplitud se presentan en la tabla 9, la cual se encuentra en el anexo A.

5.2. Órbita 550 km

A pesar de que la máscara Isoflux correspondiente a la altitud orbital de 550 km no es tan extensa como en el caso de 340 km, el diseño de arreglos de antena para esta órbita presenta desafíos similares. El proceso de diseño resultó en 129 soluciones viables, entre las cuales 45 se obtienen mediante arreglos lineales, 25 mediante arreglos planares y 59 mediante arreglos de anillos concéntricos. En este caso, una solución es considerada aceptable cuando su error máximo es inferior al 40 % y su error promedio está

por debajo del 10%. En las siguientes subsecciones, se exponen los resultados más notables para cada geometría, tanto en su configuración periódica como aperiódica.

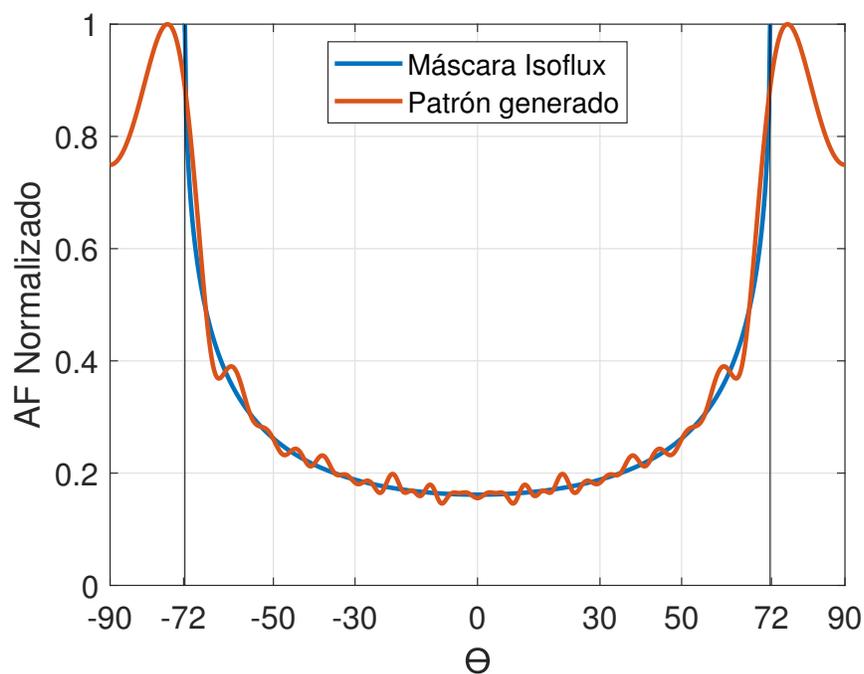


Figura 39. Patrón de radiación generado por el arreglo de anillos concéntricos no uniforme diseñado para una altura orbital de 340 km

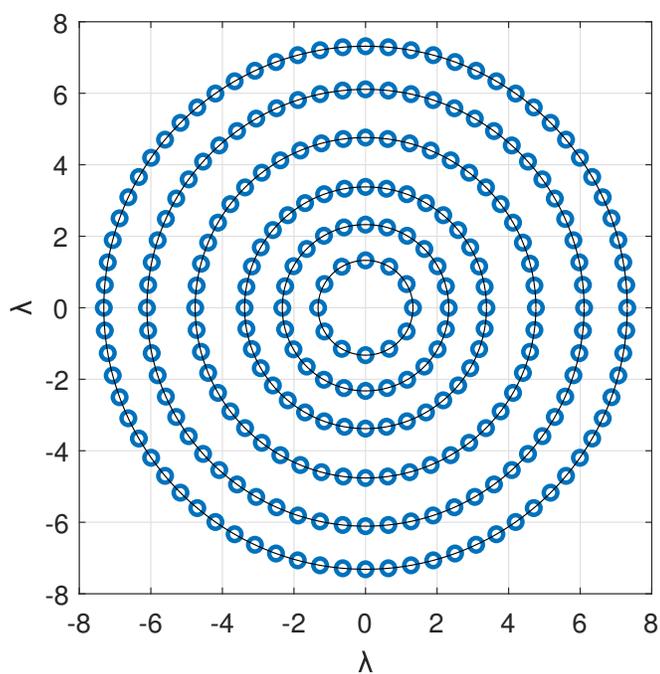


Figura 40. Geometría del arreglo de anillos concéntricos no uniforme para la altura orbital de 340 km

5.2.1. Arreglo lineal

El arreglo lineal uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 14 elementos de antena con una separación 0.5λ . La figura 41 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 3.6 %, siendo 20.04 % el valor más elevado. La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud fue llevada a cabo por el AG, empleando como función objetivo la ecuación 15, multiplicada por un factor de dos. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 30. Los valores de excitaciones de amplitud se presentan en la tabla 10, la cual se encuentra en el anexo A.

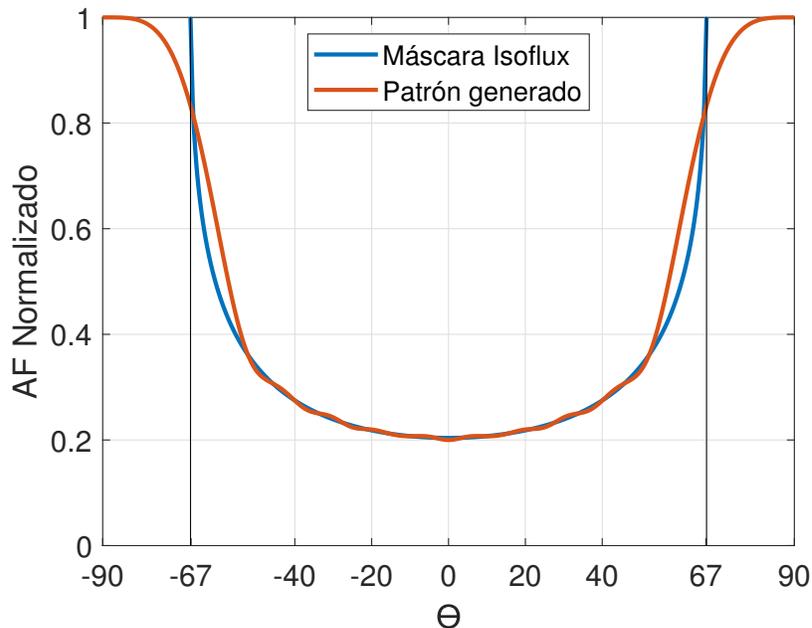


Figura 41. Patrón de radiación generado por el arreglo lineal uniforme diseñado para una altura orbital de 550 km

El arreglo lineal no uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 14 elementos de antena. La figura 42 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 3.29 %, siendo 22.58 % el valor más elevado. La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud y la separación entre elementos de antenas fue llevada a cabo por el AG,

empleando como función objetivo la ecuación 13. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La distancia entre elementos de antena se restringe al rango de 0.4λ a 0.7λ . La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 43. Los valores de excitaciones de amplitud y separación entre elementos se presentan en la tabla 11, la cual se encuentra en el anexo A.

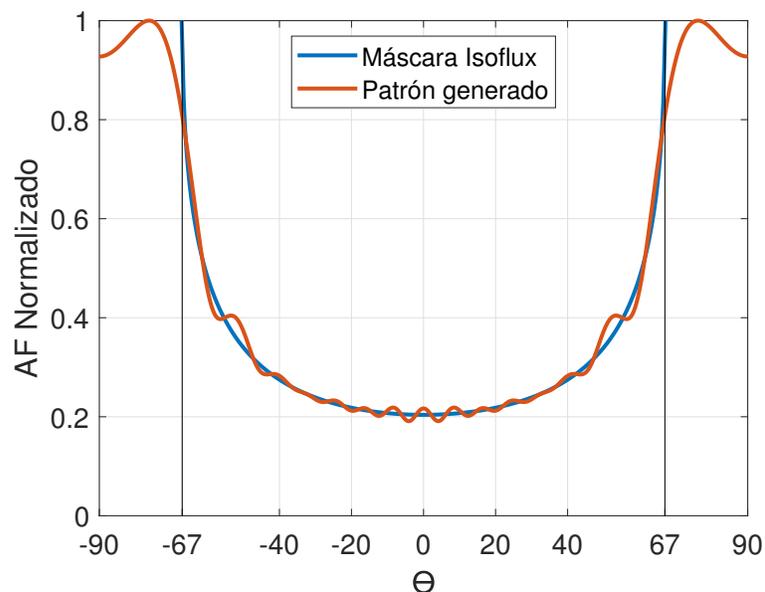


Figura 42. Patrón de radiación generado por el arreglo de anillos lineal no uniforme diseñado para una altura orbital de 550 km

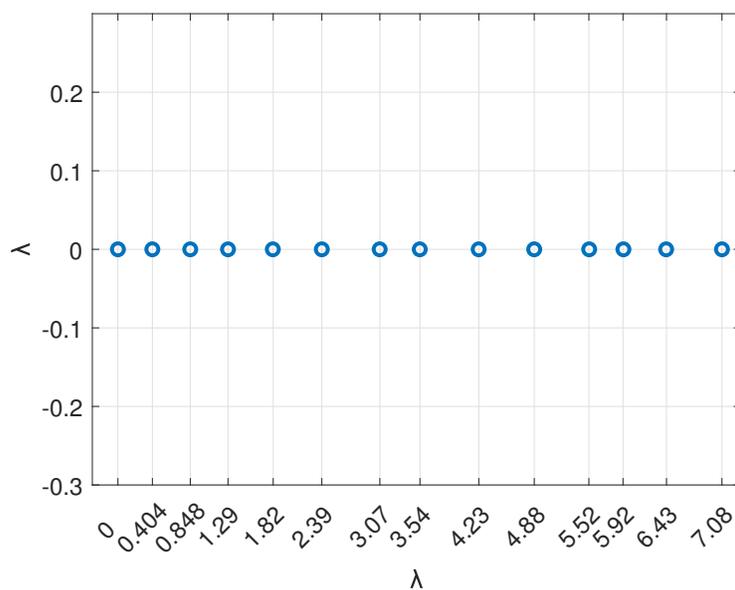


Figura 43. Geometría del arreglo lineal no uniforme para la altura orbital de 550 km

5.2.2. Arreglo planar

El arreglo planar uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 196 elementos de antena. Estos elementos se ordenan en una matriz de 14 por 14 con una separación de 0.5λ entre ellos. La figura 44 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 2.24 %, siendo 25.44 % el valor más elevado. La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud fue llevada a cabo por el AG, empleando como función objetivo la ecuación 13. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 34. Los valores de excitaciones de amplitud se presentan en la tabla 12, la cual se encuentra en el anexo A.

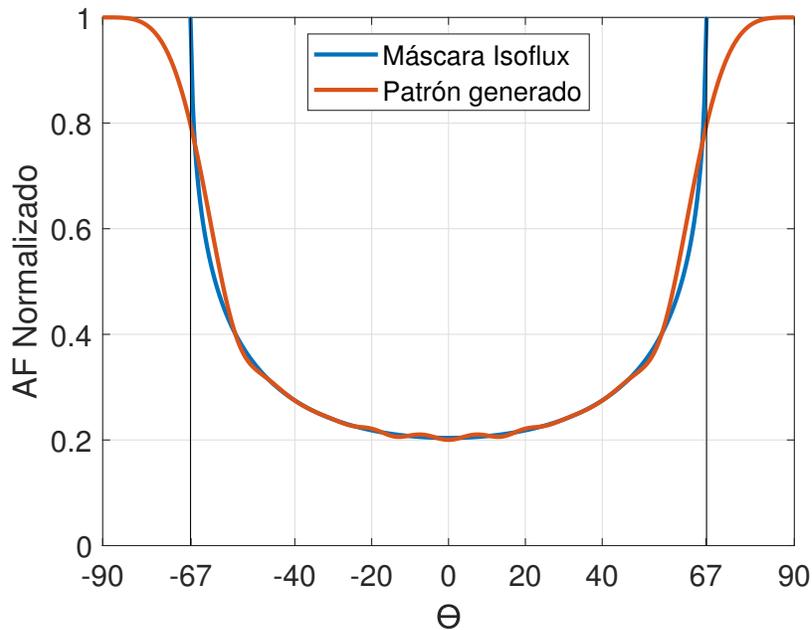


Figura 44. Patrón de radiación generado por el arreglo planar uniforme diseñado para una altura orbital de 550 km

El arreglo planar no uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 10 elementos de antena. La figura 45 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 6.84 %, siendo 20.9 % el valor más elevado. En esta geometría, los elementos de antena se encuentran distribuidos en un plano. En este caso de diseño, tanto las coordenadas en el eje

x como en el eje y de la posición de los elementos se optimizan utilizando AG. En el eje x , las posiciones pueden variar en un rango de 0 a 6.5λ y en el eje y , la posición se puede encontrar desde 1 a 7λ .

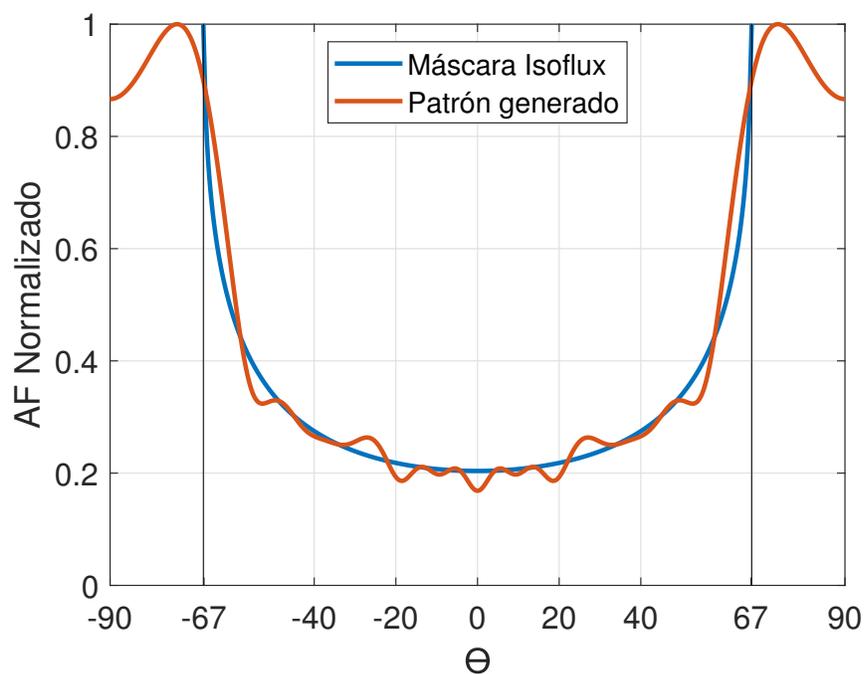


Figura 45. Patrón de radiación generado por el arreglo no planar uniforme diseñado para una altura orbital de 550 km

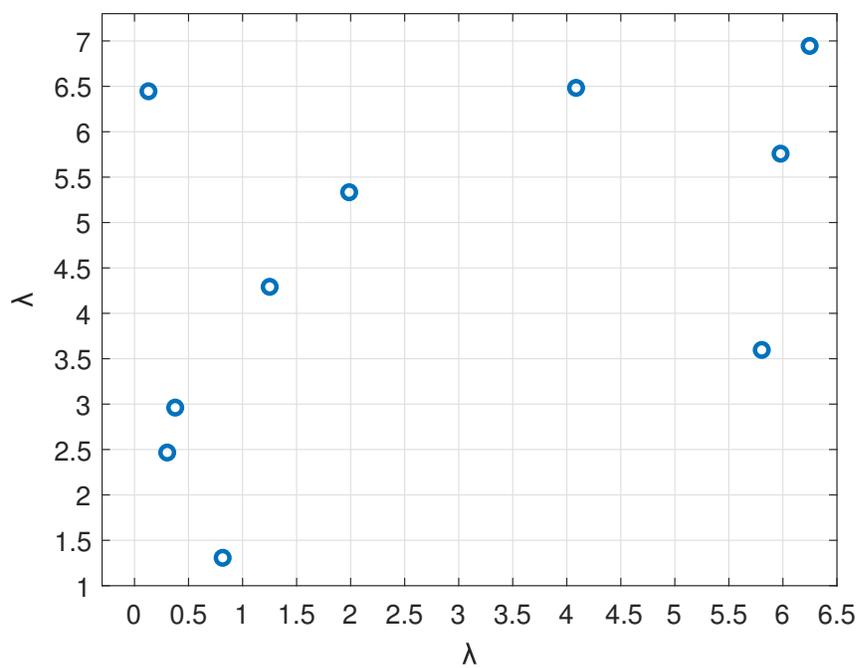


Figura 46. Geometría del arreglo planar no uniforme para la altura orbital de 550 km

Para garantizar una distancia euclidiana mínima aceptable de 0.5λ , se incorpora esta restricción a la función objetivo. La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud y posiciones de los elementos fue realizada mediante el AG, empleando como función objetivo la ecuación 13, en conjunto con la restricción de distancia. En esta solución la separación mínima entre elementos es de 0.5001λ . Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 46. Los valores de excitaciones de amplitud se presentan en la tabla 13, la cual se encuentra en el anexo A.

5.2.3. Arreglo de anillos concéntricos

El arreglo de anillos concéntricos uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 180 elementos de antena distribuidos en cinco anillos. La cantidad de elementos de antena en cada anillo aumenta en múltiplos de 12 de manera progresiva. La separación entre elementos de antena (en longitud de arco) se mantiene constante en 0.5λ . La figura 47 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 5.63 %, siendo 13.93 % el valor más elevado.

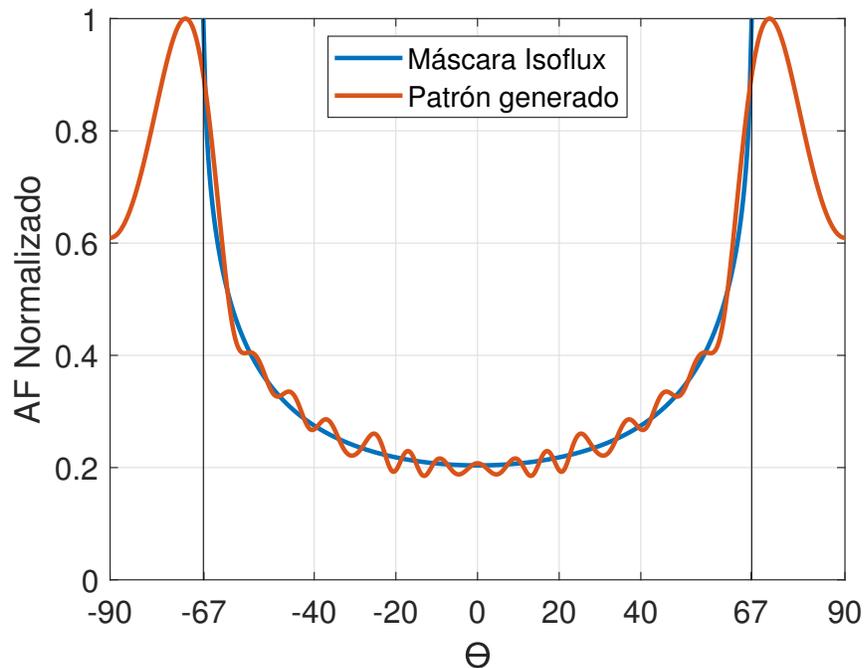


Figura 47. Patrón de radiación generado por el arreglo de anillos concéntricos uniforme diseñado para una altura orbital de 550 km

La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud fue llevada a cabo por el AG, empleando como función objetivo la ecuación 15. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 48. Los valores de excitaciones de amplitud se presentan en la tabla 14, la cual se encuentra en el anexo A.

El arreglo de anillos concéntricos no uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 180 elementos de antena distribuidos en cinco anillos. La cantidad de elementos de antena en cada anillo aumenta en múltiplos de 12 de manera progresiva. La figura 49 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 4.74 %, siendo 14.37 % el valor más elevado. En este caso de diseño se optimizan las separaciones entre anillos.

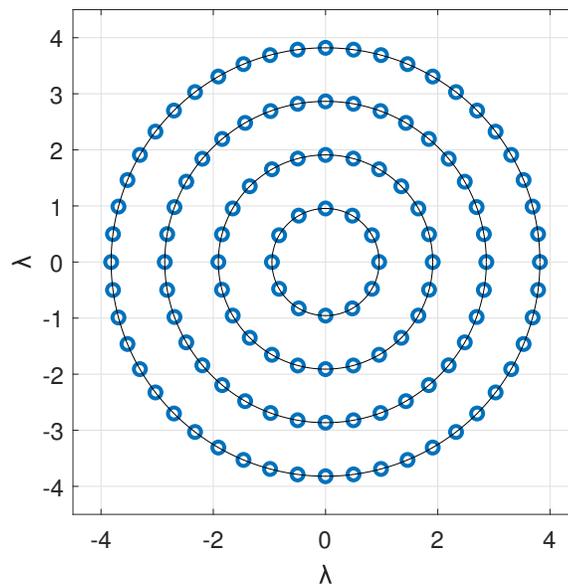


Figura 48. Geometría del arreglo de anillo concéntricos uniforme para la altura orbital de 550 km

La separación mínima entre anillos se define a partir del radio que tendría el primer anillo si todos sus elementos tuvieran una separación de 0.5λ . Para establecer la separación máxima se suma 0.5λ a la separación mínima. Los elementos de antena se distribuyen de manera equidistante en el perímetro asociado al radio de cada anillo. Dicho radio se obtiene mediante la suma de las distancias calculadas, y posteriormente, se utiliza para determinar el perímetro correspondiente. En este arreglo, la menor separación entre elementos en un mismo anillo presenta una longitud de arco de 0.5010λ .

La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud y separación entre anillos fue realizada mediante el AG, empleando como función objetivo la ecuación 15. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 50. Los valores de excitaciones de amplitud se presentan en la tabla 15, la cual se encuentra en el anexo A.

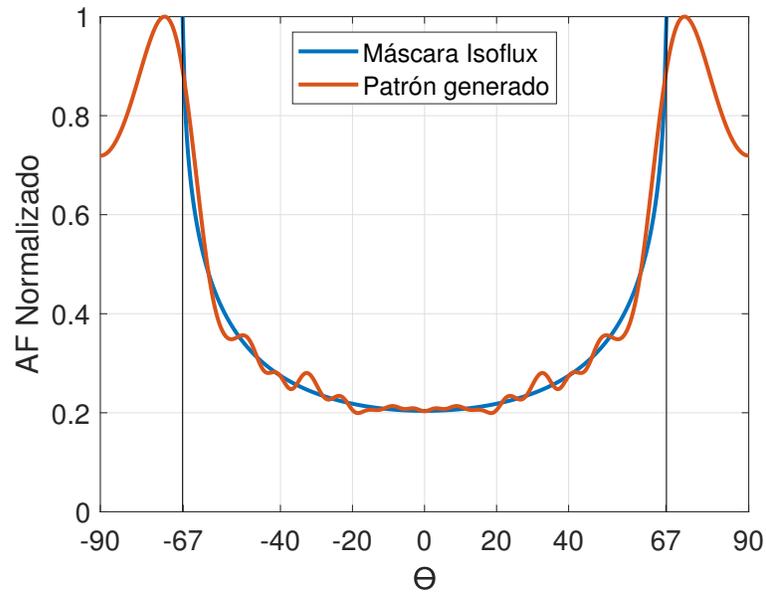


Figura 49. Patrón de radiación generado por el arreglo de anillos concéntricos no uniforme diseñado para una altura orbital de 550 km

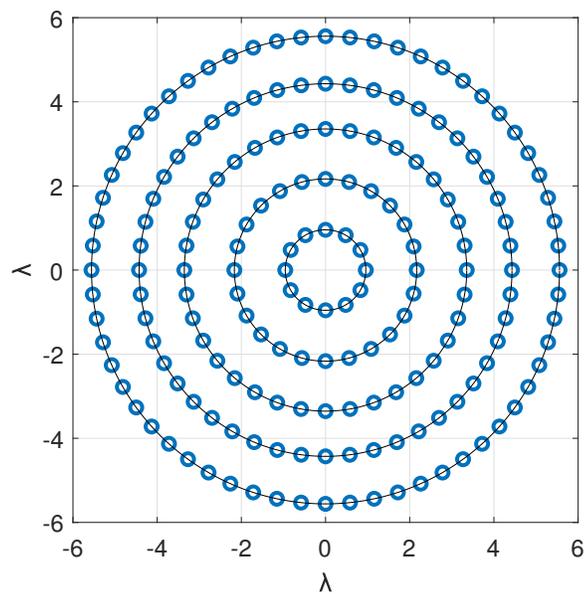


Figura 50. Geometría del arreglo de anillos concéntricos no uniformes para la altura orbital de 550 km

5.3. Órbita 1150 km

Es importante destacar que la literatura asociada al diseño de arreglos de antenas para radiación tipo Isoflux para órbitas LEO suele ser enfocada a la altura orbital de 2000 km. La máscara Isoflux para una altitud orbital de 1150 km, aunque menos extensa que la de 340 km y 550 km, plantea desafíos en el diseño de los arreglos de antenas igualmente significativos. Estos desafíos incluyen la necesidad de emplear un mayor número de elementos de antena, lo que complica la red de alimentación del arreglo. Además, utilizar una mayor cantidad de población e iteraciones en los algoritmos genéticos puede ser necesario en algunos casos, lo que resulta en un incremento en los costos computacionales.

El proceso de diseño realizado para los arreglos de esta altura orbital condujo a la generación de 160 soluciones viables, distribuidas de la siguiente manera: 45 a través de arreglos lineales, 34 mediante arreglos planares y 81 utilizando arreglos de anillos concéntricos. En este contexto, se define una solución como aceptable cuando su error máximo es inferior al 30 % y su error promedio se encuentra por debajo del 8 %. A continuación, se presentan los resultados más destacados para cada tipo de geometría, tanto en sus configuraciones periódicas como aperiódicas.

5.3.1. Arreglo lineal

El arreglo lineal uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 14 elementos de antena con una separación 0.5λ . La figura 51 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 2.88 %, siendo 10.57 % el valor más elevado. La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud fue llevada a cabo por el AG, empleando como función objetivo la ecuación 15, multiplicada por un factor de dos. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 30. Los valores de excitaciones de amplitud se presentan en la tabla 16, la cual se encuentra en el anexo A.

El arreglo lineal no uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 14 elementos de antena. La figura 52 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada

presenta un promedio del 2.62 %, siendo 10 % el valor más elevado. La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud y la separación entre elementos de antenas fue llevada a cabo por el AG, empleando como función objetivo la ecuación 13. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La distancia entre elementos de antena se restringe al rango de 0.4λ a 0.9λ . La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 53. Los valores de excitaciones de amplitud y separación entre elementos se presentan en la tabla 17, la cual se encuentra en el anexo A.

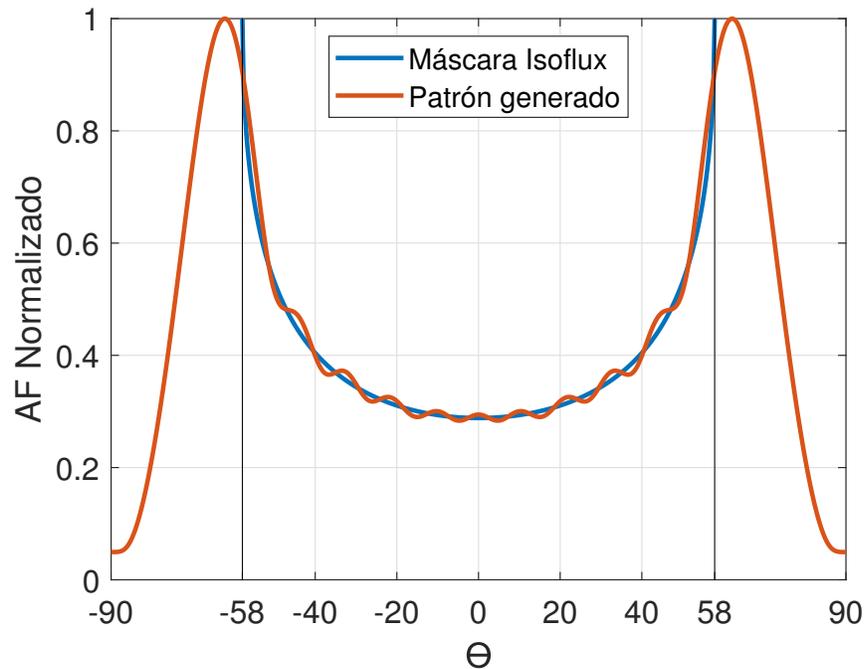


Figura 51. Patrón de radiación generado por el arreglo lineal uniforme diseñado para una altura orbital de 1150 km

5.3.2. Arreglo planar

El arreglo planar uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 196 elementos de antena. Estos elementos se ordenan en una matriz de 14 por 14 con una separación de 0.5λ entre ellos. La figura 54 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 2.25 %, siendo 11.59 % el valor más elevado. La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud fue llevada a cabo por el AG, empleando como función objetivo la ecuación 13. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación

de 2000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 34. Los valores de excitaciones de amplitud se presentan en la tabla 18, la cual se encuentra en el anexo A.

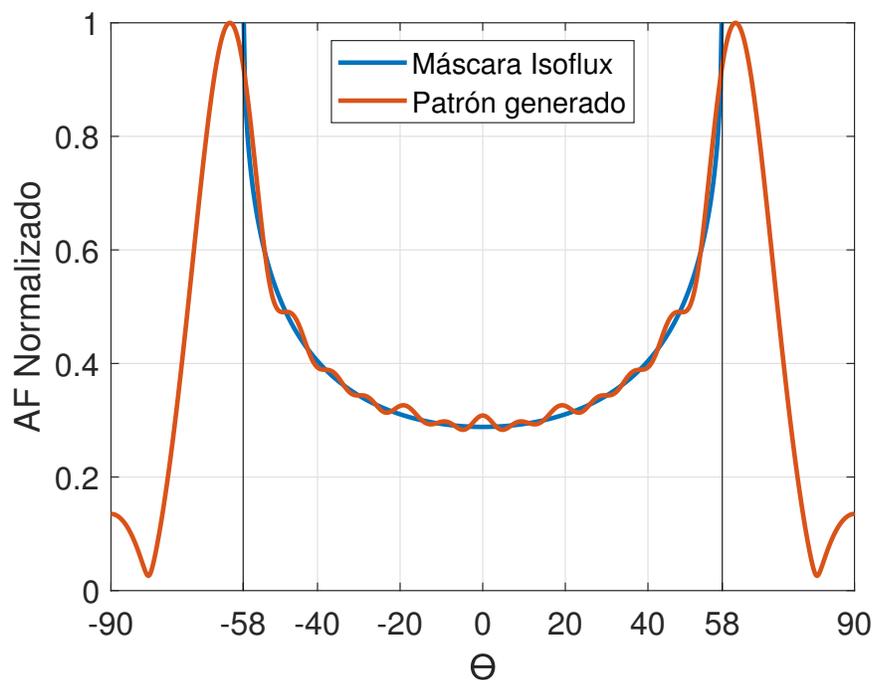


Figura 52. Patrón de radiación generado por el arreglo lineal no uniforme diseñado para una altura orbital de 1150 km

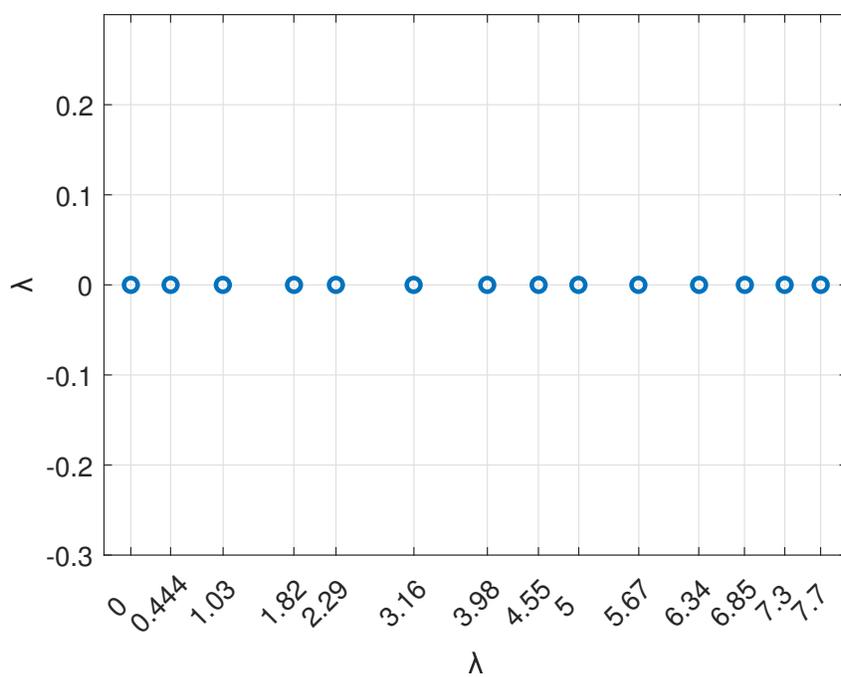


Figura 53. Geometría del arreglo lineal no uniforme para la altura orbital de 1150 km

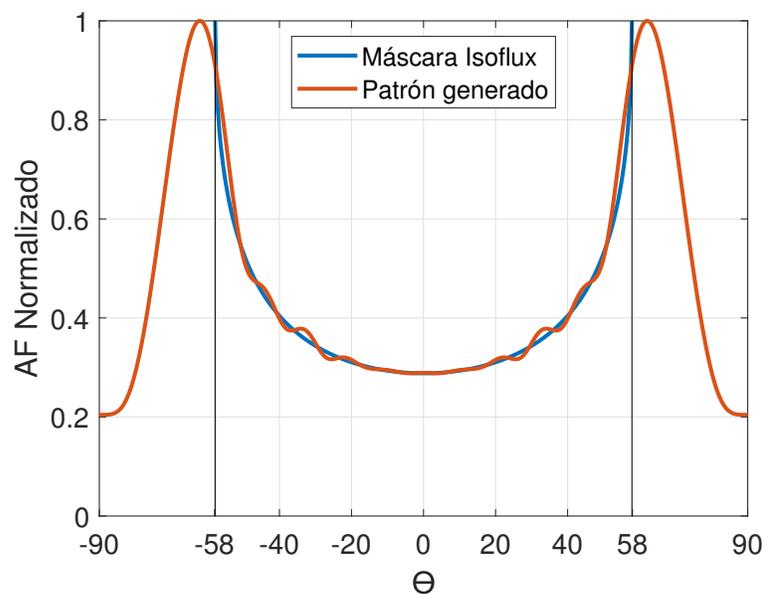


Figura 54. Patrón de radiación generado por el arreglo planar uniforme diseñado para una altura orbital de 1150 km

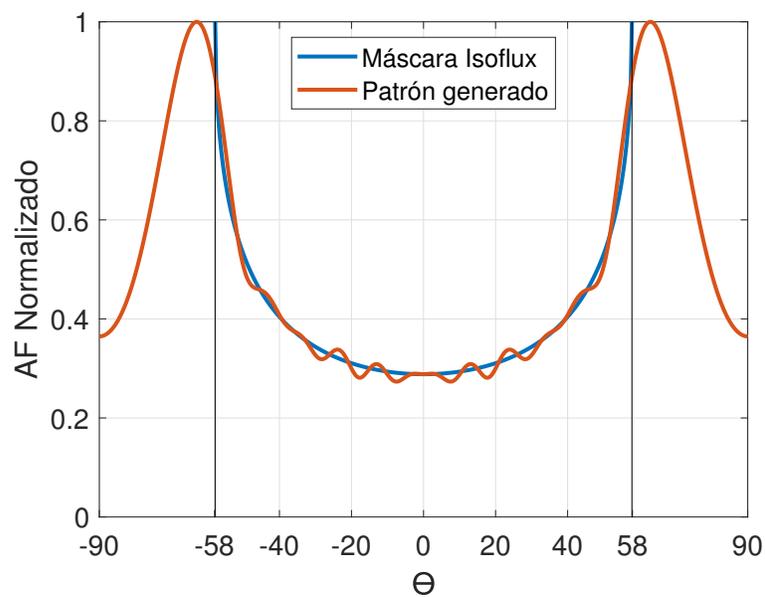


Figura 55. Patrón de radiación generado por el arreglo planar no uniforme diseñado para una altura orbital de 1150 km

El arreglo planar no uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 16 elementos de antena. La figura 55 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada

presenta un promedio del 3.26 %, siendo 12.62 % el valor más elevado. En esta geometría, los elementos de antena se encuentran distribuidos en un plano. En este caso de diseño, tanto las coordenadas en el eje x como en el eje y de la posición de los elementos se optimizan utilizando AG. En el eje x , las posiciones pueden variar en un rango de 0.5 a 6.5λ y en el eje y , la posición se puede encontrar desde 0.5 a 7λ .

Para garantizar una distancia euclidiana mínima aceptable cercana a 0.5λ , se incorpora esta restricción a la función objetivo. La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud y posiciones de los elementos fue realizada mediante el AG, empleando como función objetivo la ecuación 13, en conjunto con la restricción de distancia. En esta solución la separación mínima entre elementos es de 0.4981λ . Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 56. Los valores de excitaciones de amplitud se presentan en la tabla 19, la cual se encuentra en el anexo A.

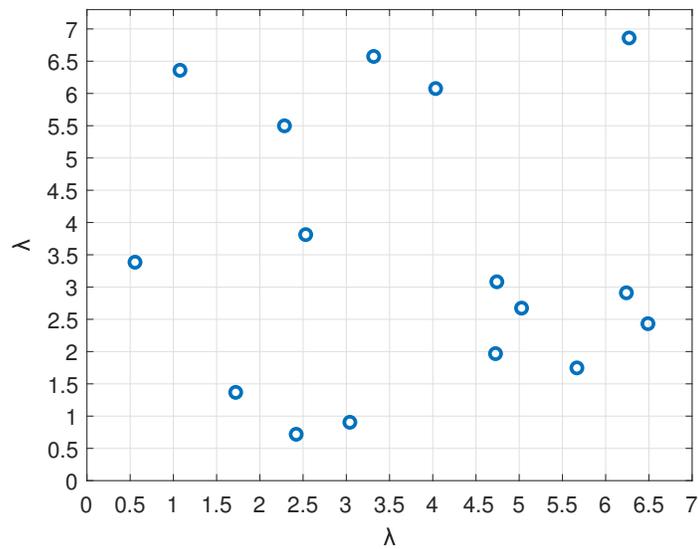


Figura 56. Geometría del arreglo planar no uniforme para la altura orbital de 1150 km

5.3.3. Arreglo de anillos concéntricos

El arreglo de anillos concéntricos uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 40 elementos de antena distribuidos en un único anillo. La separación entre elementos de antena (en longitud de arco) se mantiene constante en 0.5λ . La figura 57 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 2.68 %, siendo 12.6 % el valor más elevado.

La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud fue llevada a cabo por el AG, empleando como función objetivo la ecuación 15, multiplicada por un factor de dos. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 58. Los valores de excitaciones de amplitud se presentan en la tabla 20, la cual se encuentra en el anexo A.

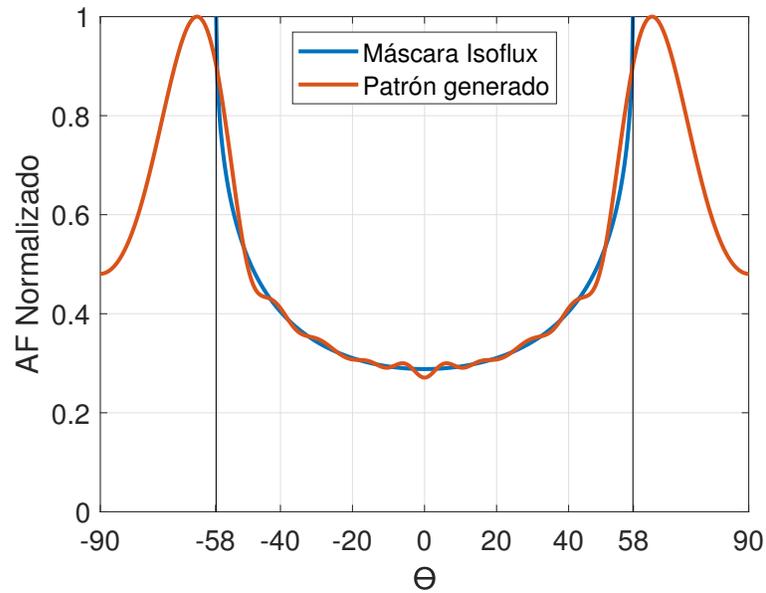


Figura 57. Patrón de radiación generado por el arreglo de anillos concéntricos uniforme diseñado para una altura orbital de 1150 km

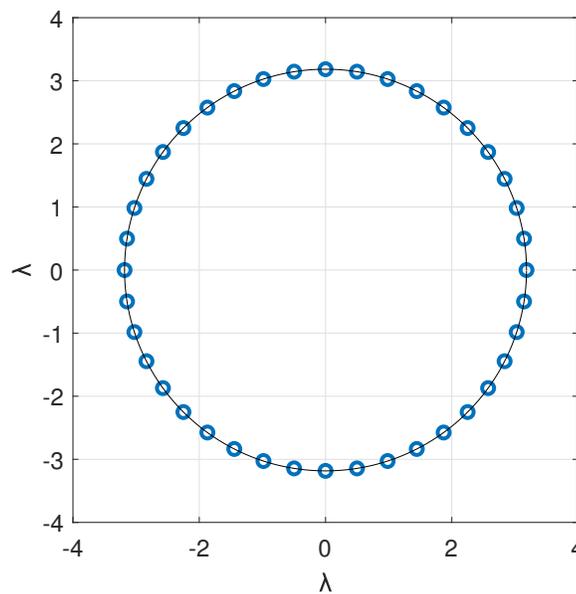


Figura 58. Geometría del arreglo circular para la altura orbital de 1150 km

El arreglo de anillos concéntricos no uniforme propuesto para esta altura orbital se compone de 140 elementos de antena distribuidos en siete anillos. La cantidad de elementos de antena en cada anillo aumenta en múltiplos de cinco de manera progresiva. La figura 59 muestra la radiación Isoflux generada por el arreglo en el plano de elevación, contrastada con la máscara Isoflux para esta altura orbital. El error entre la máscara Isoflux y la radiación generada presenta un promedio del 2.37 %, siendo 10.8 % el valor más elevado. En este caso de diseño se optimizan las separaciones entre anillos.

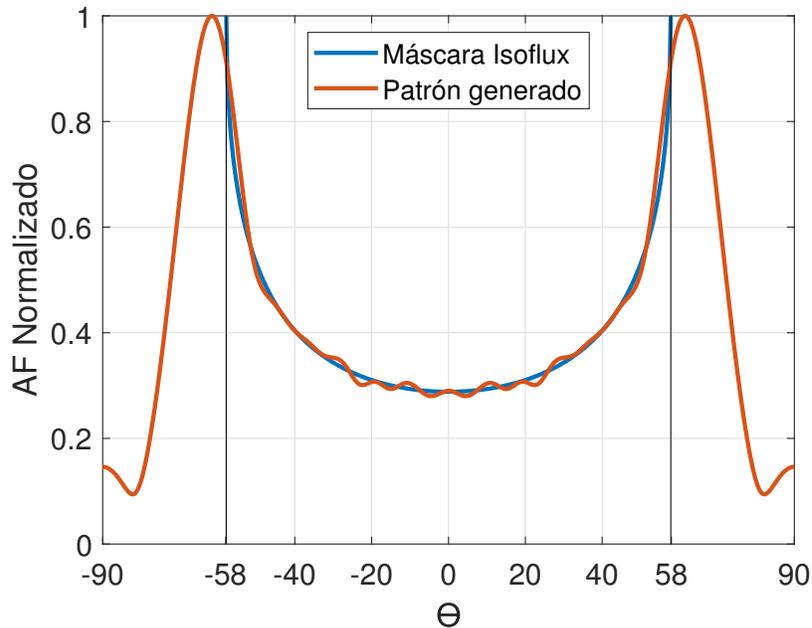


Figura 59. Patrón de radiación generado por el arreglo de anillos concéntricos no uniforme diseñado para una altura orbital de 1150 km

La separación mínima entre anillos se define a partir del radio que tendría el primer anillo si todos sus elementos tuvieran una separación de 0.5λ . Para establecer la separación máxima se suma 0.5λ a la separación mínima. Los elementos de antena se distribuyen de manera equidistante en el perímetro asociado al radio de cada anillo. Dicho radio se obtiene mediante la suma de las distancias calculadas, y posteriormente, se utiliza para determinar el perímetro correspondiente. En este arreglo, la menor separación entre elementos en un mismo anillo presenta una longitud de arco de 0.7404λ .

La optimización de la distribución de excitaciones de amplitud y separación entre anillos fue realizada mediante el AG, empleando como función objetivo la ecuación 15. Así mismo, se fijó un tamaño de población de 200 individuos y se estableció un criterio de terminación de 2000 iteraciones. La disposición de los elementos de antena se muestra en la figura 60. Los valores de excitaciones de amplitud se

presentan en la tabla 21, la cual se encuentra en el anexo A.

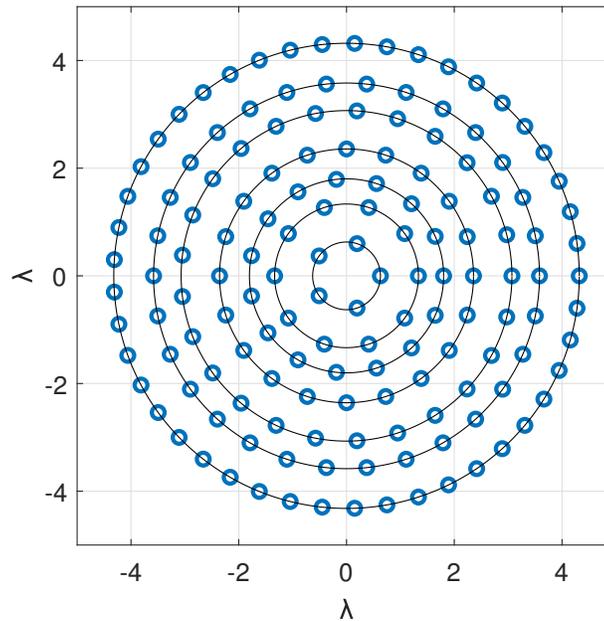


Figura 60. Geometría del arreglo de anillos concéntricos no uniforme para la altura orbital de 1150 km

5.4. Análisis de resultados

En esta sección del capítulo, se presentan las tablas comparativas que resumen los resultados obtenidos mediante el uso de los algoritmos genéticos e implementación de diversas geometrías de arreglos de antenas. A través de estas comparaciones, se busca identificar las ventajas y desventajas de cada diseño, así como determinar cuál de ellos puede ser el más adecuado para aplicaciones específicas. Los datos presentados en estas tablas representan un valioso recurso para los ingenieros y diseñadores que buscan optimizar el rendimiento de sistemas de antenas en aplicaciones satelitales.

Los parámetros de error promedio y error máximo proporcionan una comprensión de la calidad de la radiación emitida por un arreglo de antenas. En este contexto, el error promedio es un indicador del nivel de ondulaciones en la región central de la cuneta Isoflux. Así mismo, el error máximo nos indica la desviación en los puntos máximos de la radiación en relación con la máscara. Los resultados presentados para cada geometría en este capítulo muestran el mejor compromiso entre estos dos parámetros. No obstante, también es importante tener en cuenta la complejidad del sistema.

Para una altura orbital de 340 km, el arreglo de anillos concéntricos no uniforme proporciona la radiación

Isoflux con el menor porcentaje de error tanto promedio como máximo. Su desventaja radica en el elevado número de elementos de antena requeridos, lo que resulta en una red de alimentación extremadamente compleja y por lo tanto, costosa. Este enfoque puede ser adecuado para aplicaciones en las que es crucial que la radiación emitida se ajuste fielmente a la forma deseada representada por la máscara Isoflux. El arreglo lineal no uniforme nos ofrece una alternativa con menor grado de complejidad. La radiación producida por este arreglo presenta el segundo mejor compromiso entre error promedio y máximo utilizando solo 14 elementos de antena. En la tabla 1 se presentan los resultados para cada geometría de arreglos de antenas de radiación tipo Isoflux para la altura orbital de 340 km.

Tabla 1. Comparación de resultados generados por los arreglos de antenas de radiación Isoflux para la altura orbital de 340 km

Geometría	Lineal		Planar		Anillos concéntricos	
	Uniforme	No uniforme	Uniforme	No uniforme	Uniforme	No uniforme
Distribución						
Número de elementos de antena	14	14	196	20	120	252
Error promedio	6.11 %	5.4 %	4.9 %	7.32 %	6.56 %	4.58 %
Error máximo	20.03 %	20.09 %	24.37 %	26.65 %	23.97 %	15.02 %

De manera similar, para los arreglos de antenas diseñados para la radiación Isoflux a una altura orbital de 550 km, el arreglo de anillos concéntricos no uniforme mostró el mejor equilibrio entre el error promedio y el error máximo. Sin embargo, es importante destacar que el arreglo con esta geometría para esta altura orbital también requiere un gran número de antenas. En esta situación, el arreglo lineal uniforme se posiciona como la opción con un buen compromiso entre el error promedio y el error máximo más sencilla; no obstante, el incremento en el error máximo es considerable. En la tabla 2 se presentan los resultados para cada geometría de arreglos de antenas de radiación tipo Isoflux para la altura orbital de 550 km.

Tabla 2. Comparación de resultados generados por los arreglos de antenas de radiación Isoflux para la altura orbital de 550 km

Geometría	Lineal		Planar		Anillos concéntricos	
	Uniforme	No uniforme	Uniforme	No uniforme	Uniforme	No uniforme
Distribución						
Número de elementos de antena	14	14	196	10	180	180
Error promedio	3.6 %	3.29 %	2.24 %	6.84 %	5.63 %	4.74 %
Error máximo	20.04 %	22.58 %	25.44 %	20.9 %	13.96 %	14.37 %

Siguiendo el mismo patrón, observamos un rendimiento similar para las geometrías de anillos concéntricos no uniforme y lineal no uniforme en la generación de la radiación Isoflux para una altura orbital de 1150 km. Debido a la pequeña diferencia entre los resultados de ambos, el arreglo lineal se posiciona como

la opción preferible en términos del desempeño de la radiación y simplicidad del sistema. En la tabla 3 se presentan los resultados para cada geometría de arreglos de antenas de radiación tipo Isoflux para la altura orbital de 1150 km.

Tabla 3. Comparación de resultados generados por los arreglos de antenas de radiación Isoflux para la altura orbital de 1150 km

Geometría Distribución	Lineal		Planar		Anillos concéntricos	
	Uniforme	No uniforme	Uniforme	No uniforme	Uniforme	No uniforme
Número de elementos de antena	14	14	196	16	40	140
Error promedio	2.88 %	2.62 %	2.25 %	3.26 %	2.68 %	2.37 %
Error máximo	10.57 %	10 %	11.59 %	12.62 %	12.6 %	10.8 %

5.5. Conclusiones

El proceso de diseño presentado en esta tesis ha resultado en arreglos de antenas capaces de conformar con precisión un haz Isoflux para las altitudes orbitales de 340 km, 550 km y 1150 km. En este estudio, se evaluaron tres geometrías distintas: el arreglo planar, los arreglos lineales y los arreglos de anillos concéntricos, utilizando algoritmos genéticos como herramienta de optimización. A partir de los resultados obtenidos se pueden hacer las siguientes observaciones:

El arreglo planar con distribución tanto periódica como aperiódica mostró un rendimiento inferior en comparación con las otras dos geometrías para todas las alturas orbitales. Los arreglos de anillos concéntricos con separación entre anillos no uniforme demostraron las mejores prestaciones de radiación de las nueve configuraciones geométricas estudiadas. Sin embargo, es importante señalar que esta geometría tiende a demandar un número sustancialmente elevado de elementos de antena, lo que conlleva a que el arreglo sea más voluminoso y pesado, además de complicar su red de alimentación. Por otro lado, los arreglos lineales, tanto uniformes como no uniformes, se presentan como una alternativa menos precisa pero considerablemente más sencilla en términos de diseño y alimentación.

Esto sugiere que, si bien las tres geometrías ofrecen resultados prometedores, la elección de la geometría adecuada depende de los requisitos específicos de la aplicación. Los algoritmos genéticos se revelaron como una herramienta fundamental en el proceso de diseño de los arreglos de antenas. La optimización de la distribución de las excitaciones de amplitud y las separaciones entre elementos de antena y anillos, sin duda, contribuyó de manera significativa al rendimiento satisfactorio de estos arreglos. No obstante, es relevante destacar que el proceso de optimización a través de algoritmos genéticos conllevó un tiempo

computacional considerable, especialmente en configuraciones de arreglos de antenas con un número elevado de elementos.

En última instancia, estos resultados respaldan la idea de que el ajuste y la mejora del proceso de diseño son cruciales para obtener los mejores resultados, independientemente de la geometría seleccionada. En conclusión, este estudio subraya la importancia de considerar las implicaciones de rendimiento, complejidad y tiempo computacional al diseñar arreglos de antenas de radiación Isoflux para diferentes altitudes orbitales.

Capítulo 6. Conclusiones

En este capítulo, se presentan las conclusiones generales derivadas de la investigación realizada. Además, se destacarán las contribuciones más significativas que este estudio ha proporcionado al campo de los arreglos de antenas de radiación tipo Isoflux. Asimismo, se discutirán las posibles direcciones para investigaciones futuras, señalando áreas que aún requieren exploración y desarrollo.

6.1. Conclusiones generales

Esta tesis presenta el diseño de 18 arreglos de antenas de radiación Isoflux para satélites en las altitudes orbitales de 340 km, 550 km y 1150 km. Para llevar a cabo esta tarea, se han empleado diversas técnicas de diseño y síntesis de arreglos de antenas. Entre estas técnicas, destacan las distribuciones no uniformes de excitaciones de amplitud y separación entre elementos de antena, las cuales se han optimizado mediante el uso de algoritmos genéticos. Cabe destacar que para estas altitudes orbitales, las máscaras Isoflux se extienden por arriba de los 100 grados. Las configuraciones geométricas lineales, planares y de anillos concéntricos, tanto periódicas como aperiódicas, se implementaron con el objetivo de proporcionar una comprensión integral de sus capacidades y limitaciones para generar una radiación Isoflux de tal extensión.

Los resultados obtenidos en este estudio revelan que todas las geometrías evaluadas son capaces de generar radiación Isoflux de manera satisfactoria. Sin embargo, es esencial tener en cuenta ciertas consideraciones al diseñar arreglos de antenas de este tipo. Este trabajo de investigación incluye un análisis detallado de los resultados, que se encuentra en el capítulo 5. Este análisis cumple el propósito de facilitar la selección del arreglo adecuado, tomando en consideración los requisitos de rendimiento, peso y tamaño del arreglo y complejidad del sistema. Por ejemplo, se observó de manera consistente que los arreglos de antenas con separación no uniforme entre anillos demostraron producir la radiación con los errores promedio y máximo más bajos.

No obstante, la complejidad de este tipo de arreglo puede significar que la elección de esta geometría no sea la más apropiada en algunos escenarios. Como una alternativa más sencilla, se presentan los arreglos lineales. Es importante resaltar que ciertas geometrías tienen la capacidad de controlar la radiación no solo en el plano de elevación, si no también en el plano azimutal. En este estudio, las geometrías con esta característica se diseñaron considerando únicamente un corte en el plano azimutal. Esta elección se basó en el razonamiento de que incluir otros cortes aumentaría significativamente los costos computacionales

asociados con la implementación de algoritmos genéticos. La optimización de estos arreglos de antenas en un solo corte restringe su aplicabilidad en ciertos escenarios.

La radiación Isoflux en este corte, generada por los arreglos presentados en esta tesis, siguió con precisión la máscara Isoflux, incluso para la altura orbital de 340 km. A pesar de los tiempos prolongados de ejecución de los algoritmos genéticos, el rendimiento satisfactorio de estos arreglos se debe, en gran parte, a la optimización de los parámetros de diseño mediante esta técnica. La similitud entre la radiación producida por los arreglos de antenas presentados en este trabajo y la máscara Isoflux nos indica que estos arreglos tienen la capacidad de minimizar las pérdidas de propagación provocadas por la curvatura de la Tierra. En consecuencia, se puede concluir que implementar estos arreglos en satélites que operen en las alturas orbitales de 340 km, 550 km y 1150 km tiene el potencial de mejorar su desempeño. Esta mejora se traduciría en un aumento en el número de estaciones que pueden ser atendidas por el satélite en comparación con los sistemas de radiación tradicionales. La relevancia de estos hallazgos es aún más evidente debido al notorio aumento de satélites en órbita baja impulsado por las constelaciones satelitales.

6.2. Aportaciones

Las principales contribuciones de esta tesis son:

- Se proponen 18 arreglos de antenas de radiación Isoflux para satélites en las alturas orbitales de 340 km, 550 km y 1150 km.
- Se presenta un análisis de los resultados obtenidos con distintas geometrías que puede ser consultado para el diseño de los arreglos de antenas de radiación Isoflux para satélites en órbita baja.
- Se implementa la técnica de optimización de algoritmos genéticos para la síntesis de arreglos de antenas para satélites en rango inferior y medio de la órbita LEO.

6.3. Trabajo a futuro

A continuación, se proponen algunos trabajos futuros que no pudieron ser abordados por exceder el alcance de esta tesis:

- Considerar una geometría de arreglo en espiral en el proceso de diseño de los arreglos de antenas de radiación tipo Isoflux.
- Implementar otras técnicas de optimización para la determinación de los parámetros de diseño.
- Considerar otros cortes en el plano azimutal en el diseño de los arreglos de antenas de radiación Isoflux para satélites en órbita LEO.

Literatura citada

- Adnan, N. H. M., Rafiqul, I. M., & Alam, A. H. M. Z. (2017). Effects of inter element spacing on large antenna array characteristics. In *2017 IEEE 4th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA)*. <https://doi.org/10.1109/ICSIMA.2017.8311993>.
- Ares-Pena, F. J., Rodriguez-Gonzalez, J. A., Villanueva-Lopez, E., & Rengarajan, S. R. (1999). Genetic algorithms in the design and optimization of antenna array patterns. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 47(3), 506–510. <https://doi.org/10.1109/8.768786>.
- Baker, J. E. (1985). Adaptive selection methods for genetic algorithms. In *Proceedings of the first international conference on genetic algorithms and their applications*, 101–111.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: analysis and design*, (3a ed.). John Wiley & Sons.
- Beasley, D., Bull, D. R., & Martin, R. R. (1993). An overview of genetic algorithms: Part 1, fundamentals. *University computing archive*, 15(2), 56–69. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:15123759>.
- Cardama Aznar, Á., Robert, J. R., Rius Casals, J. M., Roca, L. J., Boris, S. B., & Ferrando Bataller, M. (2002). *Antenas*, (2a ed.). Edicions UPC.
- CBO (Oficina de Presupuesto del Congreso de E.U.A.) (2023). Large constellations of low-altitude satellites: A primer. <https://www.cbo.gov/system/files/2023-05/58794-satellite-primer.pdf>.
- Clarke, A. C. (1945). Extra-terrestrial relays. *Wireless World*, 51(10), 305–308. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-2716-0.50006-2>.
- Cremins, T. (2015). How to maximise the benefits of a new space age. <https://www.weforum.org/agenda/2015/01/how-to-maximise-the-benefits-of-a-new-space-age/>.
- De Jong, K. A. (1975). *An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. [Tesis de Doctorado en Filosofía, Universidad de Michigan].
- Deakin, R. E. (2007). Satellite orbits. https://www.researchgate.net/publication/228860752_SATELLITE_ORBITS.
- El-Hassan, M. A., Hussein, K. F. A., Farahat, A. E., & Awadalla, K. H. (2019). X-Band isoflux concentric circular antenna arrays for image data download from LEO satellites to ground stations. *The Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, 34(11), 1694–1703. <https://journals.riverpublshers.com/index.php/ACES/article/view/8111>.
- FCC (2021). Request for modification of the authorization for the SpaceX NGSO satellite system. (Reporte No. FCC 21-48), Comisión Federal de Comunicaciones. <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-21-48A1.pdf>.
- FCC (2022). Request for orbital deployment and operating authority for the SpaceX Gen2 NGSO satellite system. (Reporte No. FCC 22-91), Comisión Federal de Comunicaciones. <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-22-91A1.pdf>.
- Gholami, R., Zakeri, B., Abedi, H., & Mohseni, S. (2016). Reduction of dynamic range ratio through competition over resources to synthesize planar array antennas. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 70(11), 1522–1531. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2016.09.008>.
- GPS.gov (s.f.). Space segment. <https://www.gps.gov/systems/gps/space/#:~:text=The%20GPS%20space%20segment%20consists,%2C%2095%25%20of%20the%20time>.

- Greda, L. A., Winterstein, A., Lemes, D. L., & Heckler, M. V. T. (2019). Beamsteering and beamshaping using a linear antenna array based on particle swarm optimization. *IEEE Access*, 7, 141562–141573. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2944471>.
- Harrison, T. (2023). Understanding the third space age. <https://metrea.aero/wp-content/uploads/2023/05/Understanding-the-Third-Space-Age.pdf>.
- Haupt, R. L. (2008). Optimized element spacing for low sidelobe concentric ring arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 56(1), 266–268. <https://doi.org/10.1109/TAP.2007.913176>.
- He, Y. & Wang, C. (2023). Optimization design for sparse planar array in satellite communications. *Electronics*, 12(8), 1763. <https://doi.org/10.3390/electronics12081763>.
- Hodjat, F. & Hovanessian, A. S. (1978). Nonuniformly spaced linear and planar array antennas for sidelobe reduction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 26(2), 198–204. <https://doi.org/10.1109/TAP.1978.1141812>.
- Ibarra, M., Panduro, M. A., & Andrade, A. G. (2016). Differential evolution multi-objective for optimization of isoflux antenna arrays. *IETE Technical Review*, 33(2), 105–114. <https://doi.org/10.1080/02564602.2015.1049222>.
- Ibarra, M., Panduro, M. A., Andrade, Á. G., & Reyna, A. (2015). Design of sparse concentric rings array for LEO satellites. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 29(15), 1983–2001. <https://doi.org/10.1080/09205071.2015.1072479>.
- IEEE, (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) (2014). IEEE Standard for definitions of terms for antennas. <https://www.doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6758443>.
- Imbriale, W. A., Boccia, L., & Gao, S. (2012). *Space Antenna Handbook*. John Wiley & Sons.
- Ippolito, L. J. (2017). *Satellite communications systems engineering: atmospheric effects, satellite link design and system performance*. John Wiley & Sons.
- Iridium (2013). Application for mobile satellite service by Iridium Constellation LLC, Attachment: Iridium NEXT engineering statement. (Reporte No. SATMOD2013122700148), Comisión Federal de Comunicaciones (FCC). <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20131227-00148/1031348.pdf>.
- Jeong, S.-Y., Lee, T.-K., & Lee, J.-W. (2017). Optimization for an isoflux pattern from a multiring microstrip array via least-squares regression. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 16, 3005–3008. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2017.2757521>.
- Khasim, N. S., Krishna, Y. M., Thati, J., & Subbarao, M. V. (2013). Analysis of different tapering techniques for efficient radiation pattern. *e-Journal of Science & Technology*, 8(5), 47–53.
- Kohnstamm, T. (2023). Everything you need to know about Project Kuiper, Amazon's satellite broadband network. <https://www.aboutamazon.com/news/innovation-at-amazon/what-is-amazon-project-kuiper#:~:text=10.-,How%20many%20satellites%20will%20Project%20Kuiper%20have%3F,constellation%20design%20includes%203%2C236%20satellites>.
- Kota, S. L., Pahlavan, K., & Leppanen, P. A. (2004). *Broadband satellite communications for internet access*. Springer.
- Lee, Y. & Choi, J. P. (2019). Performance evaluation of high-frequency mobile satellite communications. *IEEE Access*, 7, 49077–49087. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909885>.

- Michel, F., Trevisan, M., Giordano, D., & Bonaventure, O. (2022). A first look at starlink performance. In *Proceedings of the 22nd ACM Internet Measurement Conference*, 130–136. <https://doi.org/10.1145/3517745.3561416>.
- Mitchell, M. (1998). *An introduction to genetic algorithms*. MIT press.
- Montesano, A., Montesano, C., Caballero, R., Naranjo, M., Monjas, F., Cuesta, L. E., Zorrilla, P., & Martinez, L. (2007). Galileo system navigation antenna for global positioning. In *The Second European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2007*. <https://doi.org/10.1049/ic.2007.1441>.
- NASA (1965). Satellite communications : Six years of achievement, 1958-1964. (Reporte No. NASA-TM-X-57060), Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19660004987/downloads/19660004987.pdf>.
- NASA (2008). Orbits and Kepler's laws. <https://solarsystem.nasa.gov/resources/310/orbits-and-keplers-laws/#:~:text=Kepler's%20Third%20Law%3A%20the%20squares,the%20radius%20of%20its%20orbit>.
- OneWeb (2023). Successful launch of 36 OneWeb satellites with ISRO/NSIL marks key milestone towards global connectivity. <https://oneweb.net/resources/successful-launch-36-oneweb-satellites-isronsil-marks-key-milestone-enable-global#:~:text=The%20OneWeb%20constellation%20design%20calls,to%20soon%20deliver%20global%20services>.
- Panduro, M. A., Covarrubias, D. H., Brizuela, C. A., & Marante, F. R. (2005). A multi-objective approach in the linear antenna array design. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 59(4), 205–212. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2004.11.017>.
- Picasso, G. (2001). Amended notification and implementation of GMPCS-MOU arrangements. (Reporte No. SG_G_I_00000101_ADD3_E), Iridium. Unión Internacional de Telecomunicaciones. https://www.itu.int/en/gmpcs/System%20operators/System_Operator_Notifications/SG_G_I_00000101/SG_G_I_00000101_ADD3_E.pdf.
- Rahman, S. U., Cao, Q., Ahmed, M. M., & Khalil, H. (2017). Analysis of linear antenna array for minimum side lobe level, half power beamwidth, and nulls control using PSO. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 16(2), 577–591. <https://doi.org/10.1590/2179-10742017v16i2913>.
- Reyna, A., Panduro, M. A., & del Rio-Bocio, C. (2012). Design of aperiodic planar arrays for isoflux radiation in GEO satellites by applying evolutionary optimization. *Expert Systems with Applications*, 39(8), 6872–6878. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.009>.
- Russo, A. (1993). The early development of the telecommunications satellite programme in ESRO (1965-1971). (Reporte No. ESA-HSR-9), Agencia Espacial Europea (ESA). https://www.esa.int/t/esapub/hsr/HSR_09.PDF.
- Sallam, T. & Attiya, A. (2020). Low sidelobe cosecant-squared pattern synthesis for large planar array using genetic algorithm. *Progress In Electromagnetics Research M*, 93, 23–34. <https://doi.org/10.2528/PIERM20042005>.
- Satariano, A., Reinhard, S., Metz, C., Frenkel, S., & Khurana, M. (2023). Elon Musk's unmatched power in the stars. <https://www.nytimes.com/interactive/2023/07/28/business/starlink.html>.
- Seybold, J. S. (2005). *Introduction to RF propagation*. John Wiley & sons.

- SpaceX (2016). Application for Fixed Satellite Service by Space Exploration Holdings, LLC, Attachment A: Technical information to supplement schedule S. (Reporte No. SAT-LOA-20161115-00118), Comisión Federal de Comunicaciones. <https://fcc.report/IBFS/SAT-LOA-20161115-00118/1158350.pdf>,.
- SpaceX (2018). Application for Fixed Satellite Service by Space Exploration Holdings, LLC, Attachment A: Technical information to supplement schedule S. (Reporte No. SAT-MOD-20181108-00083), Comisión Federal de Comunicaciones. <https://fcc.report/IBFS/SAT-MOD-20181108-00083/1569860.pdf>,.
- Stutzman, W. L. & Thiele, G. A. (2012). *Antenna theory and design*, (3a ed.). John Wiley & Sons.
- Velinov, P. I. Y. (2017). Development of advanced space sciences after first artificial satellite. 60-th anniversary of the space age. *Bulgarian Academy of Sciences*, 29, 147–157. <https://doi.org/10.7546/aerebu.29.18.01.13>.
- Vie, A., Kleinnijenhuis, A. M., & Farmer, D. J. (2021). Qualities, challenges and future of genetic algorithms: a literature review. <https://arxiv.org/abs/2011.05277>.
- Viganö, M. C., Toso, G., Angeletti, P., Lager, I. E., Yarovoy, A., & Caratelli, D. (2010). Sparse antenna array for earth-coverage satellite applications. In *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2010*, 1–4.
- WGS-84 (2002). *World Geodetic System-1984, WGS-84*. International Civil Aviation Organization, (2a ed.).
- Wood, L. (2003). Satellite constellation networks. In Zhang, Y., editor, *Internetworking and computing over satellite networks*, 13–34. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0431-3_2.
- Yang, X.-S. (2020). *Nature-inspired optimization algorithms*, (2a ed.). Elsevier.
- Yuan, S. S. A., Chen, X., Huang, C., & Sha, W. E. I. (2023). Effects of mutual coupling on degree of freedom and antenna efficiency in holographic MIMO communications. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 4, 237–244. <https://doi.org/10.1109/OJAP.2023.3245667>.

Anexos

Anexo A. Tablas de resultados

En este anexo se presentan las tablas que contienen los parámetros de diseño de los arreglos de antenas presentados en el capítulo 5.

Tabla 4. Excitaciones de amplitud del arreglo lineal uniforme para el caso de la altura orbital de 340 km

Excitaciones de amplitud	-3.0044, 8.4051, -11.8481, 12.2724, -11.9552, 7.6494, -0.1291, 2.4185, -11.0192, 5.5800, 1.4207, 7.7323, -0.0795, 6.4228
--------------------------	---

Tabla 5. Excitaciones de amplitud y separaciones entre elementos del arreglo lineal no uniforme para el caso de la altura orbital de 340 km

Excitaciones de amplitud	2.0474, -7.1094, 11.8474, -12.0647, 10.9541, -11.5505, 13.7571, -8.8855, -9.2611, -6.5350, 5.1233, -6.9267, 6.9199, -3.7777
Separaciones entre elementos de antena (λ)	0.4627, 0.4219, 0.4950, 0.4299, 0.5988, 0.4884, 0.4533, 0.4479, 0.5668, 0.5783, 0.4638, 0.4366, 0.4850

Tabla 6. Excitaciones de amplitud del arreglo planar uniforme para el caso de la altura orbital de 340 km

	<p>0.7448, 9.2527, 9.6958, 4.1096, -8.6268, -12.1967, 9.7955, -13.9926, 7.0064, 10.2485, -13.8311, -2.8738, 9.5695, -6.6497, 2.0537, 1.6927, -5.3039, -4.0755, 10.3687, -9.5775, 8.3173, -13.6857, 6.9538, 7.9325, 4.7132, -9.0018, 0.4550, 3.8496, 8.3643, -13.3907, 0.9393, -13.4148, 13.6330, 11.0924, -4.9727, -2.7916, 9.2909, -5.6558, -0.1245, 12.1773, 1.7505, 6.5651, 6.8890, -6.2163, 10.9247, -7.7238, -11.0941, 6.4365, 11.2052, -3.5444, -4.1278, 13.1993, -0.9426, -13.7412, 2.3187, -13.0102, -1.3515, 7.4288, -7.1023, -13.3773, 12.4698, -9.5564, 1.3285, 6.5289, 5.7895, -7.4658, -9.2472, 11.7967, 11.6917, -7.2681, 3.5337, -5.3280, 7.8943, 9.0987, -13.0097, -13.3930, -2.9694, -10.8517, 10.9515, -4.0963, -1.7465, 8.4972, 8.5345, -0.8799, -3.0456, 2.3741, 9.9081, -9.3526, 8.6772, -3.9844, -10.2903, 1.6895, 7.8762, -13.0546, 6.4975, -6.7379, -4.7647, -13.0580, 13.4989, -0.3760, -13.9076, -10.7691, 11.2113, -12.6326, 4.9241, -2.7792, 0.8848, 3.0606, 7.1330, -0.3416, 6.0128, 5.8147, 1.4338, 12.7405, 2.2348, -0.4765, 13.3628, 11.6691, -6.6507, -12.0539, 8.7009, -1.9060, 11.6771, -3.4536, -8.5230, -7.9539, -10.9090, 8.7333, 7.1591, 11.9617, 3.6564, -11.9287, 4.9283, 3.0367, -2.3336, 13.8814, -4.8700, -8.0207, 2.8234, 12.3599, 9.2862, -3.0261, 12.0666, -4.3806, 9.0214, -6.5688, 13.8144, -9.4321, -9.5776, -5.2047, -5.6181, -4.7497, -1.4997, 7.6106, 0.1508, -5.8074, 11.8431, 3.4326, -2.5165, -13.9044, -10.4085, 9.8538, -9.4104, -10.5318, -10.8077, 5.8508, 5.2356, 11.7068, -13.7610, 2.3511, 13.5969, 3.5115, 2.2051, 0.7503, 10.0793, 7.3460, 11.4150, 7.0025, -3.0193, -4.1185, -2.2654, -11.0679, 9.2711, -11.0045, -0.3563, 4.4107, 8.0162, -5.6252, 12.5311, -6.4418, 0.6628, -5.3227, 4.3076, -9.3874, 12.2925, -8.4545</p>
Excitaciones de amplitud	

Tabla 7. Excitaciones de amplitud y posiciones de los elementos de antena del arreglo planar no uniforme para el caso de la altura orbital de 340 km

Excitaciones de amplitud	<p>5.9327, -11.0156, 10.1442, -11.6546, 7.1650, 5.5827, 3.0659, 9.7081, -4.9814, -12.1308, -1.4869, 3.9159, -6.2870, 6.1722, -10.7128, -7.8440, 8.2584, -12.4546, -0.4764, 2.5410</p>
Coordenadas en el eje X	<p>1.6912, 0.2731, 0.6711, 2.0831, 3.6853, 3.6259, 1.3911, 2.6445, 3.9293, 3.1077, 4.9814, 3.2680, 0.9084, 1.7820, 3.1311, 4.0178, 0.7060, 1.8807, 2.6308, 4.6230</p>
Coordenadas en el eje Y	<p>2.6643, 2.9997, 3.7541, 0.6425, 2.9606, 4.9520, 0.9903, 1.2884, 1.7866, 1.0042, 0.3024, 4.0423, 0.8520, 4.6031, 0.2965, 1.0716, 2.2542, 1.2927, 2.9440, 3.9355</p>

Tabla 8. Excitaciones de amplitud del arreglo de anillos concéntricos uniforme para el caso de la altura orbital de 340 km

Excitaciones de amplitud (Anillo 1)	0.7280, -5.6517, 7.1992, -10.7276, 10.0323, -5.9562, -3.5013, -3.2362, 0.5302, -10.2994, 10.8298, 13.5211
Excitaciones de amplitud (Anillo 2)	9.4332, -12.9053, 7.6092, 10.6930, -7.9651, 6.9649, -4.6964, 3.8947, 5.7006, 0.8426, 10.7773, 7.4242, -2.4398, -7.2456, -1.3803, 3.5503, 4.5278, -3.4912, -12.2059, -1.5387, 2.2934, -8.7099, 0.8074, -6.8437
Excitaciones de amplitud (Anillo 3)	-7.7758, -4.7177, -9.9554, 10.1216, -9.9519, 5.1119, 11.1635, 3.3691, 9.8916, -10.9873, 6.5534, 3.3157, -1.5888, -3.1400, -12.9224, 4.8962, 10.2148, -0.9827, 0.6494, 1.3475, -5.7855, -0.3164, 10.9804, 0.0782, 7.2463, -3.7017, 9.8100, -13.2004, 4.3879, -9.9859, -4.7521, -13.9156, 4.6332, -13.2160, -13.7823, 4.7899
Excitaciones de amplitud (Anillo 4)	-1.2942, -6.2088, -11.3800, 11.4464, 12.5699, -0.9747, 2.4979, -0.1473, 1.9953, 5.3378, 0.4902, 1.1567, -8.1408, -12.2150, -4.7308, 5.8885, -13.9683, 1.6452, 10.2316, -4.6852, -11.6128, -5.1745, 6.3816, 11.6864, -4.0894, 13.4467, -10.6799, -11.4300, 12.0013, -9.1169, 8.1749, 1.9038, -10.5245, 7.1957, -3.1517, 3.8491, -5.3943, 3.8417, 7.3841, -0.9045, 4.6490, -6.1924, 9.8654, -2.2288, -12.4146, -10.4420, 5.2851, -11.8673

Tabla 9. Excitaciones de amplitud y separaciones entre anillos del arreglo de anillos concéntricos no uniforme para el caso de la altura orbital de 340 km

Excitaciones de amplitud (Anillo 1)	4.5729, -7.6177, 9.6773, 11.9789, 11.7282, 6.4775, -5.4774, 11.1684, 13.0270, 0.1791, 1.2018, 4.7895
Excitaciones de amplitud (Anillo 2)	2.5296, 12.6587, -3.5305, 7.2672, -1.7644, 11.6795, 2.1488, 10.3697, -5.9327, 11.3849, 3.3914, -5.7210, 11.2211, -0.5977, 0.5976, 0.0936, -9.9704, 7.6386, -2.2971, 1.2424, -13.9729, 6.5168, 3.8026, 8.9561
Excitaciones de amplitud (Anillo 3)	7.1327, 10.5426, -4.7056, -11.3686, 13.7222, -10.9056, -7.8510, -0.6698, 6.6628, -11.5018, 10.9330, -8.1984, 4.2234, -4.2557, 1.4440, 10.9651, -12.0432, -6.5281, -3.1119, 10.4043, 7.6319, 11.0393, 8.8604, 6.2845, 8.6997, -9.1655, 6.9140, -7.1539, 9.3683, -5.0530, 1.4159, -2.7637, -8.8702, -1.8004, -4.2415, -3.2909
Excitaciones de amplitud (Anillo 4)	-8.8617, -12.0372, 8.6973, 10.2744, -10.8000, 3.5432, -12.5813, 9.2942, 7.1960, 2.7823, -7.4845, 9.5541, -4.3998, 4.2278, -11.0755, -8.0890, -4.1160, 0.6047, 6.7091, 8.0816, 7.4786, -12.1869, 6.2521, -8.9235, -8.4578, -3.0934, -6.4278, -6.3830, -12.5992, 7.0389, 1.7210, 8.9028, -2.2400, 10.4751, 7.7967, 9.7155, -11.7122, -10.1556, 5.0078, -1.6994, 3.0856, 2.3070, -3.3629, 12.6386, 7.6562, 7.1313, -0.1285, -10.9714
Excitaciones de amplitud (Anillo 5)	0.9525, -13.6820, -9.2392, 8.4423, 12.2844, -4.2996, -7.6188, -0.8912, -12.7132, 9.0506, 2.9545, -1.1473, -0.4113, -12.8183, 10.1525, 9.8203, 3.9913, 7.1738, -4.6497, -4.6595, -12.4854, 12.8911, -2.5547, 8.2557, -9.9421, -9.8945, -9.8087, 13.4189, 4.5375, 2.3189, 8.9508, 2.3194, -0.8398, -1.4309, 6.2359, 1.5706, -5.9080, 8.6082, -3.7463, 2.8676, -4.1889, -13.3365, 12.1708, -2.1653, 2.7357, 7.0696, -3.4238, 8.1445, 0.2933, 0.7925, 4.7885, -9.5173, 7.5567, 1.9022, -10.9086, -6.7710, 2.6560, 5.3727, -5.1909, 0.9092
Excitaciones de amplitud (Anillo 6)	3.1747, -7.0630, 9.6226, -8.5214, -1.2261, 3.4264, 3.4322, -5.2221, 12.0403, -4.9402, 4.9623, -11.0945, 8.0642, -12.9332, -4.7414, -13.4949, -6.2273, 12.2247, -13.7664, 5.7396, 9.8400, -7.9443, -9.9801, 1.4054, 13.4200, -2.1899, 8.9812, -13.3333, 10.0110, -5.8637, -7.2696, -7.7547, 4.9833, 9.4062, -3.8037, 5.9808, -13.3561, 9.1313, 1.3529, 13.9326, -8.8748, 0.1146, 11.6856, -11.2854, 6.6972, 3.2808, -9.0634, 9.1966, 10.0424, -8.0195, -8.8904, -10.3921, -9.8600, 11.6787, 4.9641, -9.7195, -6.4299, -0.9648, 5.7518, 0.5344, 7.1174, -9.0673, 11.5769, -6.2149, -5.1668, 2.2049, -12.8661, 10.6493, 2.5812, 0.2556, -6.2464, 10.7557
Separación entre anillos	1.3258, 0.9995, 1.0549, 1.3807, 1.3483, 1.2058

Tabla 10. Excitaciones de amplitud del arreglo lineal uniforme para el caso de la altura orbital de 550 km

Excitaciones de amplitud	0.9336, 0.9317, -0.9927, -5.7693, 8.1508, 6.3575, 6.5834, -7.8582, 13.6624, -13.2902, 9.9734, -6.7752, 3.0243, -1.1521
--------------------------	--

Tabla 11. Excitaciones de amplitud y separaciones entre elementos del arreglo lineal no uniforme para el caso de la altura orbital de 550 km

Excitaciones de amplitud	-6.6784, 10.6025, -13.9907, 11.0735, -6.3254, 11.6805, -9.9601, 12.9034, -12.8037, -12.4907, 5.0435, -4.4606, 1.2129, -7.0830
Separaciones entre elementos de antena (λ)	0.4035, 0.4441, 0.4427, 0.5253, 0.5744, 0.6779, 0.4698, 0.6907, 0.6510, 0.6441, 0.4013, 0.5010, 0.6544

Tabla 12. Excitaciones de amplitud del arreglo planar uniforme para el caso de la altura orbital de 550 km

<p>Excitaciones de amplitud</p>	<p>-8.6095, 12.9577, -6.5511, 6.4542, -1.9155, -4.5060, 5.2001, 1.5556, 7.4577, -6.4103, 1.2901, 12.5637, 0.3225, -7.3899, 0.7525, -7.5731, -2.1899, -4.7079, 4.8190, -0.9841, 5.3157, 2.9985, 0.9727, 9.4680, -4.0061, -7.2866, 7.5926, 9.6831, -8.4001, 5.9321, 9.9537, -10.0937, 6.2811, 1.7244, 8.5108, 4.6729, 9.8756, 5.0295, 4.2977, 0.1787, -7.5758, 2.8441, -0.2527, 5.6664, 2.2888, -12.5032, -3.1871, -10.9414, 5.8274, -3.5097, 1.5781, -2.9096, 10.6988, -12.8009, -9.5708, 13.7940, -7.0059, -7.8465, 10.4333, 7.0384, -3.0873, -5.5632, -9.8461, -12.2329, 9.1003, -7.8416, 5.9399, -2.3369, -2.7169, 4.7531, 9.3008, 8.6535, -8.4475, 10.0974, -6.9838, 1.8985, 3.6059, -4.6758, -1.2166, -5.1797, 6.7449, 3.3074, -13.6296, -10.9393, 9.9397, 12.6011, 8.1520, -6.8468, 3.9510, -2.0024, 4.6523, 6.1942, -12.5551, 6.9714, -10.4366, -3.1473, 7.6200, 12.1277, -7.0594, -12.1099, -9.6408, 0.1665, 13.3042, -13.8350, -7.0058, -5.2746, 8.2426, -0.1270, -0.3344, 3.6241, 3.5630, -5.4663, -5.4876, -4.9868, -3.8591, -0.7551, -4.2060, 1.0483, 12.1296, -11.4809, 7.2229, -8.1909, -8.9509, -10.5425, -2.8869, -9.0054, 4.5657, -8.1449, 7.4098, 13.6369, 9.0134, 3.7229, 9.8121, -12.8792, 5.7015, -13.7165, -4.4252, 6.5417, 1.7600, -11.1604, -3.4754, -4.7257, -2.7023, -2.9588, 3.0397, -2.7255, 4.8469, 5.1638, 10.9490, 12.9641, -5.5223, 4.4691, 8.0950, 13.7484, 9.7943, -7.5140, 10.6218, -7.7858, -11.0271, -0.1290, 10.4044, -5.9177, 4.1584, -11.6481, 7.5891, -0.0743, 12.5058, -8.6699, 10.7507, 0.8092, -12.2359, -10.0829, 1.4099, -0.1077, 1.0239, 7.5683, 2.6943, 13.2371, -13.2144, -2.0522, 4.4941, -10.5483, -3.7506, 3.6380, 2.2076, 5.2761, 9.6884, 7.7329, -4.3259, 5.4382, -0.0551, -6.5039, -2.9043, 3.7207, 9.8426, -4.3218</p>
---------------------------------	---

Tabla 13. Excitaciones de amplitud y posiciones de los elementos de antena del arreglo planar no uniforme para el caso de la altura orbital de 550 km

<p>Excitaciones de amplitud</p>	<p>-10.5676, -6.8948, -4.6642, -6.6628, 9.5653, 6.7710, 3.8063, -9.2825, 0.2641, 10.7867</p>
<p>Coordenadas en el eje X</p>	<p>0.8157, 4.0861, 1.9866, 0.1292, 5.8043, 1.2508, 6.2475, 5.9785, 0.3028, 0.376</p>
<p>Coordenadas en el eje Y</p>	<p>1.3074, 6.4828, 5.3337, 6.4458, 3.5967, 4.2917, 6.9450, 5.7582, 2.4670, 2.9616</p>

Tabla 14. Excitaciones de amplitud del arreglo de anillos concéntricos uniforme para el caso de la altura orbital de 550 km

Excitaciones de amplitud (Anillo 1)	-12.1049, 5.5992, 11.7054, -0.8247, 5.2749, -9.3681, 2.5282, -12.2910, -2.2816, -3.0317, -3.3380, 2.4117
Excitaciones de amplitud (Anillo 2)	-6.1654, -10.1402, 13.7302, 4.5901, -4.7686, -4.0105, 1.7565, -4.3715, 3.1551, -9.5654, -2.3818, 0.5099, 0.2542, -10.7198, -11.0864, -7.6479, -6.7682, -3.3817, -8.4478, 4.8971, 11.5977, -5.9747, 2.0614, -11.1265
Excitaciones de amplitud (Anillo 3)	13.9023, -0.5827, 0.6305, 10.6164, -9.8074, -13.0407, -13.0304, -6.9283, -12.3159, -4.6768, 1.1495, 0.8486, 4.1377, -11.8760, -1.1537, 0.8213, -0.7431, 2.5386, -2.3904, 9.1528, -2.4815, 3.5145, -6.0555, 3.1713, 12.5838, -0.9386, 3.5193, -11.6273, 12.2510, 7.0336, -6.5832, -2.6585, -10.2859, -5.2474, -12.4076, 3.5174
Excitaciones de amplitud (Anillo 4)	5.4269, 3.5662, 7.5155, 13.1998, -5.2809, -10.1626, 12.3673, 8.2947, -1.1784, 7.8594, -12.0030, 5.6653, -10.1316, 8.6266, 1.6701, 4.1883, -0.3038, 1.6764, -11.2193, -13.1527, 5.1950, -9.8553, 9.1294, 11.0511, -2.5149, -11.4699, 5.0284, -10.3451, 13.1760, 7.4282, 9.4632, -3.0051, -8.8058, 8.9053, -13.8388, 4.1482, 3.9450, -6.2636, 12.2449, 5.2718, -4.5948, -7.6217, -1.8952, 5.9830, 9.3590, -2.3882, -11.3323, 0.0112
Excitaciones de amplitud (Anillo 5)	5.2509, -10.5988, 3.7699, 12.2995, -4.2943, -12.6651, 8.9775, 4.7260, -11.7147, 12.2862, -8.6423, 8.2972, 0.1543, 4.5668, -4.3972, -11.5039, 12.3786, -6.2672, 8.6583, -0.1656, 5.3597, 7.6681, -10.0870, 11.6526, -0.1700, -5.8071, -8.2648, 3.8311, 1.0595, 3.5149, -0.7540, -12.9692, -12.2670, 11.1272, 6.9169, 7.7277, -11.4403, 7.7997, 6.1272, 2.3798, -2.6902, -5.0566, 9.5134, -11.2962, -7.2144, 0.7610, 12.0602, 3.6035, -11.3062, 9.3851, -5.7249, -6.5650, -0.2484, -7.3862, 5.3688, 12.6367, 5.6772, -0.0455, -8.8134, -11.5414

Tabla 15. Excitaciones de amplitud y separaciones entre anillos del arreglo de anillos concéntricos no uniforme para el caso de la altura orbital de 550 km

Excitaciones de amplitud (Anillo 1)	-11.9862, -12.4642, 13.8704, -7.4438, -11.8113, 11.3231, -11.3387, 2.5301, 13.1279, -8.0515, -12.5543, 11.2480
Excitaciones de amplitud (Anillo 2)	7.1034, 1.8568, -4.1017, -0.9653, -11.9862, 1.9806, 8.2458, -2.7384, -13.4194, 12.3794, -1.3604, 13.5793, 6.8795, 11.2800, -9.3970, 2.0921, -2.8628, 12.4596, -13.4509, -11.4757, -3.2475, -1.8307, 7.4902, 2.1823
Excitaciones de amplitud (Anillo 3)	10.0903, 0.6891, -9.6280, 13.8245, -1.8981, -13.5527, 9.0196, -11.6941, 10.5344, -12.9619, 8.4970, -5.8193, 9.5733, -5.6290, -10.5579, 1.9583, -3.6727, -1.2687, -7.5322, 2.7063, -13.3738, -9.8699, 13.8187, 0.5926, -13.2564, -11.9752, -8.9725, -6.9943, -12.0953, -11.3084, -2.3938, -4.8635, 10.7733, 1.0846, -3.1790, -1.8158
Excitaciones de amplitud (Anillo 4)	13.6222, 12.2472, -10.6705, -8.6001, 3.9403, 7.7262, -0.9237, 13.3793, -11.6354, 4.9979, -12.6328, 10.8123, -5.6091, -12.4745, 0.9325, 9.8495, 5.6431, 13.7077, -5.4926, -3.8331, 9.1509, -3.8831, -4.9393, -9.5122, 1.1395, 1.0661, 8.6942, 3.5429, -13.3448, 0.7362, -4.7262, -12.0932, 9.1832, 10.9385, 2.4391, 11.8396, -3.8089, 7.2900, -5.7354, 9.0981, -5.6102, -1.3313, -5.1750, -11.6413, 5.0114, 7.0148, 3.6866, -8.1924
Excitaciones de amplitud (Anillo 5)	1.1021, -5.0614, 10.5966, -9.0745, 2.4837, -6.0899, 3.5677, 8.3468, 12.4547, -11.7518, -12.7377, -10.9148, -2.9011, -8.7688, 1.4632, -8.6286, 13.0699, -6.2254, -3.8550, -3.1905, 8.0072, 6.7697, -6.5372, -7.3768, -9.9279, 8.5932, -4.5600, 7.9099, 4.5691, -7.9080, -12.7319, 7.5322, -5.3727, 9.7553, 5.2665, -0.6289, 13.8827, -12.0194, 11.5079, 7.6375, -13.7997, -13.8573, 3.8581, 5.3995, 4.5301, -12.1398, 4.8639, -0.1662, 8.1800, 10.4259, -11.1712, -0.8877, 1.8927, -10.4902, -9.0953, 1.8511, 7.5521, 2.8739, 13.9572, -9.8220
Separación entre anillos	0.9568, 1.2094, 1.1884, 1.0749, 1.1297

Tabla 16. Excitaciones de amplitud del arreglo lineal uniforme para el caso de la altura orbital de 1150 km

Excitaciones de amplitud	2.8476, -6.8937, 11.0266, -13.6278, 12.7981, -7.5849, -1.6034, 8.2929, -13.4804, 13.8640, 10.7754, 10.8074, -9.0120, 4.6547
--------------------------	---

Tabla 17. Excitaciones de amplitud y separaciones entre elementos del arreglo lineal no uniforme para el caso de la altura orbital de 1150 km

Excitaciones de amplitud	-5.2776, 11.5387, -12.7993, 13.0795, -9.8600, 1.5352, 10.0739, -5.7232, -8.2190, -12.8506, 0.5212, -4.6848, 3.3772, -4.0578
Separaciones entre elementos de antena (λ)	0.4441, 0.5828, 0.7946, 0.4677, 0.8675, 0.8217, 0.5739, 0.4443, 0.6692, 0.6773, 0.5112, 0.4445, 0.4022

Tabla 18. Excitaciones de amplitud y separaciones entre elementos del arreglo planar uniforme para el caso de la altura orbital de 1150 km

<p>5.3228, -3.7291, 11.5845, -1.9928, 1.3641, -3.5546, 5.8302, 13.3777, 0.2860, -7.8237, -4.1592, -12.7659, -12.9097, 4.0335, -11.9508, -4.9072, -1.0391, -11.6978, -1.2941, 7.6055, -10.0949, 11.1933, 12.4254, 13.5805, -9.9010, -3.4107, -2.8296, -0.2036, 12.8029, -1.3338, -10.7046, 3.6132, 13.4596, 13.2767, -13.8801, 13.9841, 13.4347, -9.8079, 3.0645, 10.4850, -6.1233, -1.3095, 5.8588, -5.1635, 2.1586, 8.7521, -8.9583, -9.7702, 8.4244, 2.9718, 9.7137, -2.0384, -6.2142, 10.7833, -12.1655, 9.5591, 10.9289, 3.7530, -9.4579, -8.7959, 0.9516, -4.7559, -13.2196, 7.9667, -6.5056, 13.6255, -9.2405, -11.6383, 12.5560, 0.5903, 10.9337, -13.4390, -2.9220, -7.5770, 1.9476, -10.6215, -10.5339, 7.2744, 7.2889, 12.3015, 7.1817, -6.0490, -7.9712, -12.6994, -0.9891, -3.4983, 7.8211, -8.8463, 3.2358, -13.6980, -9.7605, 4.8640, -3.8681, 6.7100, -13.3362, 2.1803, 9.0506, 1.9196, -8.9218, 0.5400, 11.0478, -8.7155, 6.4311, 1.2633, -4.4152, 12.6558, -2.9124, 13.9383, 12.0626, -0.9398, -0.9862, -9.3979, -4.0407, 3.0721, -2.2845, -3.7369, 11.9311, -1.3536, -9.3068, 7.5406, -12.5082, 13.4767, 5.0974, 13.2722, -12.2291, 5.8333, -1.7657, 1.0960, 0.2995, 2.0683, 9.7684, -13.3542, -3.4052, 12.3665, 0.4421, -0.1803, 4.7970, -2.8711, 0.6808, 4.924, 11.8510, -0.4106, 11.7080, -7.2610, 7.5060, 0.3240, 8.7614, 9.1617, -9.5519, -9.4095, -9.2102, 7.0677, 4.2334, 4.9520, -8.5318, -7.6115, 12.2151, 2.0298, -1.2613, -2.7301, 5.1802, 2.4045, -6.2354, 13.1313, 6.2679, 3.4854, 4.3923, -5.7365, -11.9594, -13.2168, 9.3901, 0.5312, 3.8225, -11.9906, 0.6512, 3.4627, 7.1229, 0.6416, 8.7247, 13.9489, 5.7752, 8.5003, 4.6761, 5.3368, 8.3558, -1.8463, -6.6171, 9.7530, 4.9758, 0.3195, -11.9212, -12.7566, -0.2970, 12.3965, -13.0241, 6.7630</p>	<p>Excitaciones de amplitud</p>
--	---------------------------------

Tabla 19. Excitaciones de amplitud y posiciones de los elementos de antena del arreglo planar no uniforme para el caso de la altura orbital de 1150 km

<p>-9.5728, 8.0354, -11.2067, -9.7297, 2.5951, -2.6957, 13.9337, -5.1187, -3.7328, 11.9913, 6.2047, -10.7783, -8.2006, -13.2080, 13.9526, -11.2826</p>	<p>Excitaciones de amplitud</p>
<p>6.4889, 1.7205, 4.7259, 2.5303, 4.0332, 6.2708, 5.0273, 5.6672, 3.3164, 6.2394, 3.0411, 2.4203, 4.7413, 2.2846, 0.5559, 1.0759</p>	<p>Coordenadas en el eje X</p>
<p>2.4324, 1.3678, 1.9678, 3.8124, 6.076, 6.8602, 2.6737, 1.7470, 6.5739, 2.9108, 0.9044, 0.7185, 3.0815, 5.4983, 3.3847, 6.3595</p>	<p>Coordenadas en el eje Y</p>

Tabla 20. Excitaciones de amplitud del arreglo circular uniforme para el caso de la altura orbital de 1150 km

Excitaciones de amplitud)	8.8943, 3.6101, -12.5126, -3.8876, 12.6481, 12.3896, -12.3258, 13.3176, -8.2485, -13.0281, 13.5013, -10.5609, 4.5653, -6.4567, -6.2183, -1.4302, 1.0671, 7.3248, -3.0956, 2.3041, 0.5422, -7.6527, -9.5301, 10.7158, 11.8252, -10.8997, 5.0022, -6.7305, 11.3270, -8.1563, -13.8697, -3.9509, -8.9252, 2.3092, -10.5802, 3.0600, 12.2338, -0.7594, -13.3675, 6.0676
---------------------------	---

Tabla 21. Excitaciones de amplitud y separaciones entre anillos del arreglo de anillos concéntricos no uniforme para el caso de la altura orbital de 1150 km

Excitaciones de amplitud (Anillo 1)	0.1134, -3.9379, -11.4339, 11.8450, 11.9788
Excitaciones de amplitud (Anillo 2)	6.9447, 5.9409, -7.5363, -4.7524, 5.9572, 13.4336, -1.5195, 12.9881, 13.8407, 10.5322
Excitaciones de amplitud (Anillo 3)	-2.3280, -0.3610, -12.3363, -13.9894, 5.8007, 3.2431, -8.0522, -9.3965, 10.1768, 6.9396, -11.5848, 11.4968, -6.8423, 1.0921, -9.5329
Excitaciones de amplitud (Anillo 4)	-3.8735, -9.7825, 10.9907, 2.4067, 11.2783, -10.8467, 11.6073, -11.1685, 12.5350, 0.3715, 1.6444, -6.3038, 4.7301, -13.9922, 10.4843, 13.9118, 3.7239, 13.7070, -1.3819, 0.1815
Excitaciones de amplitud (Anillo 5)	4.7841, -7.6873, 8.4471, -2.9769, 12.2222, 11.8560, -12.6362, -1.9704, -9.0567, 9.7823, -13.6633, 0.3939, 4.3061, -10.8111, -1.6397, 9.8145, 9.3621, 1.8176, 10.6569, -4.3137, -13.9968, 9.9517, -12.2482, -8.8313, 6.0756
Excitaciones de amplitud (Anillo 6)	-11.1640, -8.6497, 3.7111, 7.3188, 9.0227, 13.6201, 1.4559, -11.6795, 11.2835, -11.5528, 7.7394, -6.7962, -4.0552, 5.2530, 1.9466, 8.6061, -0.3573, -2.8259, 5.8549, -12.0096, 12.7248, -8.7253, 9.3782, 11.3625, -13.5727, 13.4737, -10.6213, -2.4341, 9.0696, 7.8705
Excitaciones de amplitud (Anillo 7)	10.8891, 3.1293, -6.8424, 13.7130, 6.9258, 0.4358, -4.5633, 1.1579, 2.0015, -8.4639, -13.7700, 12.3851, -7.2749, 5.5330, -5.3299, -4.9575, 10.0681, 5.7634, -6.1459, -3.8045, 3.0885, -11.2177, 13.2900, 2.0789, -5.7050, 13.3715, -0.9123, -1.0684, 12.7160, -8.1245, 1.1984, -8.1076, -5.6662, -8.4004, 12.2537
Separación entre anillos	0.6287, 0.7057, 0.4675, 0.5549, 0.7129, 0.5119, 0.7383