

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.

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



---

**Maestría en Ciencias en  
Electrónica y Telecomunicaciones  
con orientación en Telecomunicaciones**

---

**Diseño de sistemas de radiación tipo Isoflux basados en  
configuraciones de arreglos tipo espiral**

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

Presenta:

**Charlien Talancon Mesta**

Ensenada, Baja California, México  
2024

Tesis defendida por  
**Charlien Talancon Mesta**

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza  
Director de tesis

Dr. Roberto Conte Galván

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 **Charlien Talancon Mesta** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones.

### **Diseño de sistemas de radiación tipo Isoflux basados en configuraciones de arreglos tipo espiral**

Resumen aprobado por:

Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza  
Director de tesis

En los últimos años la comunicación satelital forma una parte esencial en la infraestructura global de las telecomunicaciones, brindando conectividad en áreas remotas y facilitando la transmisión de datos, voz y video a nivel mundial. Para cubrir las diversas aplicaciones se utilizan órbitas satelitales, siendo la más popular la órbita baja terrestre (LEO) debido a la proximidad del satélite a la Tierra se tiene una menor latencia esto mismo dando interés a otras tecnologías de comunicación como lo son las constelaciones. El sistema de radiación es una parte fundamental para los satélites ya que emiten un haz de potencia que puede cubrir una zona específica del planeta. Debido a la curvatura de la Tierra, en un sistema de radiación convencional existe una atenuación de la potencia en las zonas más alejadas del nadir del satélite. La radiación Isoflux es aquella que en su lóbulo principal se adapta a la curvatura de la Tierra obteniendo una densidad de potencia uniforme en el área de cobertura deseada, el cual puede generarse utilizando arreglos de antenas. Existen diferentes diseños de arreglos de antenas que pueden generar una radiación Isoflux, destacando los arreglos aperiódicos por su baja aparición de lóbulos laterales. En esta tesis se presenta el diseño de un arreglo de antenas con una geometría espiral para generar una radiación Isoflux en órbitas de 346 km, 550 km y 1,325 km, siendo esto un reto ya que la cercanía con la Tierra requiere una mayor apertura del Isoflux. La distribución de excitaciones de amplitud se optimiza con el uso de algoritmos genéticos. Se realiza el análisis del arreglo de antenas tipo espiral con diferentes cantidades de elementos para cada órbita seleccionada utilizando el patrón de radiación de tres elementos elegidos.

**Palabras clave:** arreglo de antenas, Isoflux, espiral Fermat, satélites LEO, arreglo de antenas espiral.

Abstract of the thesis presented by **Charlien Talancon Mesta** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Telecommunications.

### **Design of Isoflux radiation systems based on spiral antenna array configurations**

Abstract approved by:

Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza  
**Thesis Director**

In recent years, satellite communication has become an essential part of the global telecommunications infrastructure, providing connectivity in remote areas and facilitating the transmission of data, voice and video worldwide. Satellite orbits are used to cover the different applications, the most popular being Low Earth Orbit (LEO) and due to the proximity of the satellite to the Earth it has lower latency, giving rise to other communication technologies such as constellations. The radiation system is a fundamental part of satellites since they emit a power beam that can cover a specific area of the planet. Due to the curvature of the Earth, in a conventional radiation system there is an attenuation of the power in the areas furthest from the satellite's nadir. An Isoflux radiation adapts to the Earth's curvature in its main lobe, obtaining a uniform power density in the desired coverage area, which can be generated using antenna arrays. There are different antenna arrays designs that can generate Isoflux radiation, with aperiodic arrays standing out due to their low occurrence of side lobes. This thesis presents the design of an antenna array with a spiral geometry to generate Isoflux radiation in orbits of 346 km, 550 km and 1,325 km, this being a challenge since the proximity to Earth requires a greater aperture of the Isoflux. The amplitude excitation distribution is optimized using genetic algorithms. The analysis of the spiral antenna array with different numbers of elements for each selected orbit is performed using the radiation pattern of three chosen elements.

**Keywords:** array antenna, Isoflux, Fermat spiral, LEO satellites, spiral array antenna.

## **Dedicatoria**

**A mi familia, mi novio y Roxxy,  
¡Los quiero mucho!**

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), por haberme brindado la oportunidad de realizar la maestría en su institución.

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

A mi director de Tesis, Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza por su apoyo y paciencia durante el transcurso de este proceso. Muchas gracias por su guía, confianza y consejos que me ayudaron a motivarme a mi desempeño profesional.

A los miembros de mi comité de tesis, Dr. Roberto Conte Galván, Dr. Jorge Torres Rodríguez, por sus observaciones, apoyo y aportaciones para lograr la finalización de este proyecto.

A mis papás que siempre han confiado en mí, apoyándome a seguir mis sueños y cumplir mis metas, gracias por su paciencia, este logro también es de ustedes y Roxxy. Los amo mucho.

A mi hermana Michelle y su esposo Alan, gracias por siempre estar al pendiente de mí, apoyándome y ayudándome en todo lo momento al igual que Kira y Mika, los quiero mucho.

A mis cuatro abuelitos, gracias por estar presente en mi vida y apoyarme en todo momento, los quiero mucho.

A mis tías y tíos que siempre estuvieron conmigo dándome apoyo y preguntándome en todo momento ¿Qué es lo que hace Charlien?, ¡gracias a todos!

A mi novio Marcelino, gracias por estar conmigo durante este proceso motivándome siempre a continuar <3.

A mis compañeros de maestría por brindarme su amistad y apoyarnos mutuamente a salir adelante por cada examen y práctica que realizamos. ¡Lo logramos!

Al personal del departamento de electrónica y telecomunicaciones del CICESE por su apoyo durante el transcurso de la maestría.

# Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos .....	v
Lista de figuras .....	ix
Lista de tablas.....	xi
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	7
1.3 Justificación .....	8
1.4 Hipótesis.....	8
1.5 Objetivos .....	8
1.5.1 Objetivo general.....	8
1.5.2 Objetivos específicos.....	8
1.6 Organización de la tesis.....	9
<b>Capítulo 2. Comunicaciones satelitales.....</b>	<b>10</b>
2.1 Introducción .....	10
2.2 Órbitas satelitales.....	10
2.2.1 Órbita Geoestacionaria (GEO).....	11
2.2.2 Órbita terrestre media (MEO).....	12
2.2.3 Órbita baja terrestre (LEO).....	13
2.2.4 Mega constelaciones.....	14



2.3	Radiación tipo Isoflux .....	17
2.4	Conclusiones.....	22
<b>Capítulo 3. Arreglos de antenas.....</b>		<b>23</b>
3.1	Introducción .....	23
3.2	Características de arreglos de antenas .....	24
3.2.1	Patrón de radiación .....	24
3.2.1.1	lóbulos laterales .....	26
3.2.2	Ancho de haz .....	27
3.3	Factor de arreglo .....	28
3.4	Arreglo lineal .....	29
3.5	Arreglo planar.....	30
3.6	Arreglo espiral .....	32
3.7	Conclusiones.....	35
<b>Capítulo 4. Metodología de diseño del arreglo de antenas espiral con radiación Isoflux.....</b>		<b>36</b>
4.1	Introducción .....	36
4.2	Algoritmos genéticos.....	37
4.2.1	Generar la población inicial.....	38
4.2.2	Cálculo de aptitudes del individuo .....	38
4.2.3	Selección de padres.....	39
4.2.4	Cruzamiento y mutación .....	40
4.2.5	Elitismo .....	40
4.3	Proceso de diseño del arreglo espiral con radiación Isoflux .....	41
4.4	Antenas propuestas .....	45
4.4.1	Elemento de antena 1 (EA1).....	45
4.4.2	Elemento de antena 2 (EA2).....	46

4.4.3	Elemento de antena 3 (EA3).....	47
4.4.4	Combinación de la antena 1 y antena 3.....	48
4.5	Conclusiones.....	49
<b>Capítulo 5. Resultados .....</b>		<b>50</b>
5.1	Introducción .....	50
5.2	Órbita de 346 km.....	50
5.3	Órbita de 550 km.....	57
5.4	Órbita de 1,325 km.....	63
5.5	Conclusiones.....	69
<b>Capítulo 6. Conclusiones.....</b>		<b>70</b>
6.1	Conclusiones generales de la tesis.....	70
6.2	Contribuciones de la tesis .....	71
6.3	Trabajo a futuro .....	72
<b>Literatura citada.....</b>		<b>73</b>
<b>Anexo.....</b>		<b>77</b>

## Lista de figuras

Figura	Página
1. Diferentes tipos de órbitas satelitales.....	2
2. Distribución de elementos de antena en un arreglo lineal.....	3
3. Distribución de elementos de antena en un arreglo planar. ....	4
4. Distribución de elementos de antena en un arreglo circular.....	4
5. Radiación de tipo convencional (izquierda) y radiación de tipo Isoflux (derecha). ....	4
6. órbita geoestacionaria Terrestre (GEO). ....	12
7. Constelación GPS.....	13
8. Cinturón de Van Allen .....	13
9. Representación gráfica generada por computadora de los residuos espaciales en la órbita LEO (Office of Science and Technology Policy, 1995).....	15
10. Representación del arreglo de fase (Gentile y Abdulla, 2022).....	17
11. Representación ilustrativa del campo de visión de un satélite.....	18
12. Representación ilustrativa de una radiación convencional. ....	18
13. Representación ilustrativa del procedimiento que realiza una radiación convencional para cumplir con una densidad uniforme de potencia. ....	19
14. Representación ilustrativa de la radiación tipo Isoflux. ....	19
15. Iluminación electromagnética sobre el polo ecuatorial de la Tierra (Adaptado de Reyna et al. (2012)). ....	20
16. Máscara Isoflux en distintas órbitas.....	21
17. Ejemplo de patrón de radiación en coordenadas cartesianas y en coordenadas polares.....	25
18. Representación de los lóbulos de radiación en su modelo tridimensional y bidimensional (Adaptado de Balanis (2016)).....	26
19. Aparición de lóbulos de rejilla en arreglo lineal de 15 elementos con $d=1.2\lambda$ . ....	27
20. Identificación del ancho de haz en un patrón de radiación (Adaptado de K. E. Encino (2020)).....	28
21. Ejemplo de un arreglo lineal. ....	30
22. Ejemplo de un arreglo planar periódico.....	31

23. Ejemplo de un arreglo planar aperiódico.....	31
24. Espiral de Fermat.....	34
25. Ejemplo de cromosoma, gen y alelo. ....	38
26. Ejemplo del cruce entre dos puntos de cada individuo. ....	40
27. Máscara Isoflux para órbitas LEO.....	42
28. Distribución del arreglo de 10 antenas (izquierda) y 30 antenas (derecha). ....	42
29. Distribución del arreglo espiral de 50 antenas (izquierda) y 100 antenas (derecha). ....	43
30. Visualización de los puntos a evaluar para el patrón de radiación generado por cada individuo..	44
31. Diseño del EA1 y su patrón de radiación.....	46
32. Rango de frecuencia de la EA1 de 5 GHz a 6 GHz. ....	46
33. Diseño del EA2 y su patrón de radiación.....	47
34. Rango de frecuencia de la EA2 de 5.5 GHz a 6 GHz. ....	47
35. Diseño del EA3 y su patrón de radiación.....	48
36. Rango de frecuencia de la EA3 de 5.5 GHz a 6 GHz. ....	48
37. Distribución de antenas en combinación de EA1 y EA3.....	49
38. Patrón de radiación órbita de 346 km utilizando EA1 con $N=50$ , $i=550$ , $P=250$ . ....	51
39. Patrón de radiación órbita de 346 km utilizando EA2 con $N=100$ , $i=1000$ , $P=200$ . ....	51
40. Patrón de radiación órbita de 346 km utilizando EA3 con $N=30$ , $i=1000$ , $P=300$ . ....	52
41. Patrón de radiación órbita de 346 km utilizando EA1 y EA3 con $N=30$ , $i=1000$ , $P=300$ . ....	52
42. Patrón de radiación órbita de 550 km utilizando EA1 con $N=30$ , $i=1000$ , $P=300$ . ....	57
43. Patrón de radiación órbita de 550 km utilizando EA2 con $N=100$ , $i=1000$ , $P=200$ . ....	58
44. Patrón de radiación órbita de 550 km utilizando EA3 con $N=50$ , $i=1000$ , $P=300$ . ....	58
45. Patrón de radiación órbita de 550 km utilizando EA1 y EA3 con $N=30$ , $i=1000$ , $P=300$ . ....	59
46. Patrón de radiación órbita de 1,325 km utilizando EA1 con $N=50$ , $i=1000$ , $P=300$ . ....	63
47. Patrón de radiación órbita de 1,325 km utilizando EA2 con $N=100$ , $i=1000$ , $P=500$ . ....	64
48. Patrón de radiación órbita de 1,325 km utilizando EA3 con $N=30$ , $i=1000$ , $P=300$ . ....	64
49. Patrón de radiación órbita de 1,325 km utilizando EA1 y EA3 con $N=30$ , $i=1000$ , $P=300$ . ....	65

## Lista de tablas

Tabla	Página
1. Clasificación de las órbitas. ....	11
2. Altitudes Orbitales e inclinaciones de la constelación propuesta (McDowell, 2020). ....	16
3. Combinación de individuos y generaciones aplicados al algoritmo. ....	44
4. Mejores resultados con 10 elementos para la órbita 346 km. ....	53
5. Mejores resultados con 30 elementos para la órbita 346 km. ....	54
6. Mejores resultados con 50 elementos para la órbita 346 km ....	55
7. Mejores resultados con 100 elementos para la órbita 346 km. ....	56
8. Mejores resultados con 30 elementos para la órbita 550 km. ....	60
9. Mejores resultados con 50 elementos para la órbita 550 km ....	61
10. Mejores resultados con 100 elementos para la órbita 550 km ....	62
11. Mejores resultados con 30 elementos para la órbita 1,325 km. ....	66
12. Mejores resultados con 50 elementos para la órbita 1,325 km ....	67
13. Mejores resultados con 100 elementos para la órbita 1,325 km ....	68
14. Excitaciones de amplitud con 10 elementos para la órbita 346 km. ....	77
15. Excitaciones de amplitud con 30 elementos para la órbita 346 km. ....	77
16. Excitaciones de amplitud con 50 elementos para la órbita 346 km. ....	78
17. Excitaciones de amplitud con 100 elementos para la órbita 346 km. ....	79
18. Excitaciones de amplitud con 30 elementos para la órbita 550 km. ....	80
19. Excitaciones de amplitud con 50 elementos para la órbita 550 km. ....	80
20. Excitaciones de amplitud con 100 elementos para la órbita 550 km. ....	81
21. Excitaciones de amplitud con 30 elementos para la órbita 1,325 km. ....	82
22. Excitaciones de amplitud con 50 elementos para la órbita 1,325 km. ....	82
23. Excitaciones de amplitud con 100 elementos para la órbita 1,325 km.....	83

# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1 Antecedentes

El uso de satélites en sistemas de comunicación ha revolucionado la forma de conectar y comunicar a las personas a nivel global, ya que los satélites pueden cubrir grandes áreas de la Tierra, lo que los convierte en un nodo crucial en la red de comunicaciones al conectar a numerosos usuarios que puedan estar separados geográficamente.

El concepto de un sistema mundial de comunicaciones por satélite fue presentado por primera vez en el artículo escrito por Arthur C. Clarke (1945) titulado "Extra-terrestrial relays: Can Rocket Stations Give World-wide Radio Coverage?" en el cual se menciona que cualquier servicio de transmisión que lograra transmitir durante todo el tiempo en toda la Tierra, sería algo invaluable e indispensable para toda la sociedad. Sin embargo, la tecnología en 1945 no hacía posible crear dicho servicio, por lo que Clarke se dedicó al estudio de las órbitas geoestacionarias para la ubicación de satélites de telecomunicaciones siendo esto un elemento inicial para lograr la comunicación por medio de satélites geoestacionarios.

El 4 de octubre de 1957 fue el lanzamiento del primer satélite artificial creado por el hombre llamado Sputnik 1 lanzado por la Unión Soviética. Este hecho marcó el comienzo de la era espacial y fue un hito significativo en la exploración espacial. Fue puesto en órbita terrestre baja y transmitió señales de radio durante su tiempo en el espacio, su éxito desencadenó una intensa competencia entre Estados Unidos y la Unión Soviética conocida como la carrera espacial.

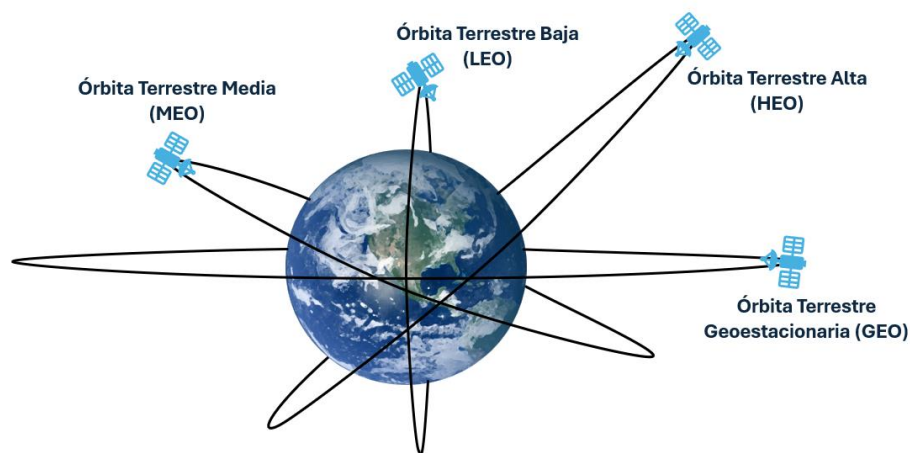
Durante la carrera espacial se tenía principalmente un enfoque para aplicaciones militares, las cuales se limitaban a localización o incluso espiar para conocer los posibles ataques de algún enemigo, no obstante, utilizar satélites en sistemas de comunicación ayudarían a enfrentar una de las mayores barreras de comunicación; la distancia. Los satélites lograban transmitir información entre dos puntos distintos de la Tierra que estuvieran separados por una gran distancia atravesando montañas, edificios, océanos, etc.

Los satélites necesitan de una trayectoria que siga en torno a un punto específico del espacio siendo este el planeta Tierra para las telecomunicaciones, esta trayectoria se le conoce como órbita. Cuando un satélite es colocado en órbita circular a 35 800 kilómetros de la Tierra posee un período de 24 horas, lo

que le otorga la apariencia de estar estacionario sobre un punto específico de la superficie terrestre. Esta órbita conocida como órbita geoestacionaria (GEO), tiene una posición privilegiada y es ampliamente preferida en los sistemas de comunicaciones por satélite en casi todo el mundo debido a su amplia cobertura en la Tierra (Alcívar M. et al., 1996).

Existen diferentes tipos de órbitas en las que se pueden encontrar los satélites además de las órbitas GEO, algunas de las más comunes siendo las órbitas bajas (Low Earth Orbit - LEO), órbitas medias (Medium Earth Orbit - MEO), órbita de Molniya, órbitas altas (High Elliptical Orbit - HEO) y las órbitas polares (Fernández, 2022). En la

Figura 1 se muestran algunas de las órbitas más comunes.



**Figura 1.** Diferentes tipos de órbitas satelitales.

La comunicación a través de satélites se logra mediante el uso de microondas de baja potencia. El sonido se propaga a una velocidad de 760 millas por hora, mientras que las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz, que es aproximadamente 186 000 millas por segundo. A esta velocidad, la señal experimenta un retraso de aproximadamente 0.4 segundos en viajar de una antena terrestre al satélite y regresar (Alcívar M. et al., 1996).

Uno de los elementos más importantes dentro del satélite es la antena, ya que utiliza estas ondas electromagnéticas para transmitir y recibir señales de información. Son comparables a los ojos del sistema debido a que deben dirigir y enfocar con precisión la señal del satélite al mismo tiempo que rechazan la

interferencia y el ruido (Calvillo, 2022). Son utilizadas ampliamente en telecomunicaciones, navegación, teledetección, exploración del espacio profundo, militar y otros campos.

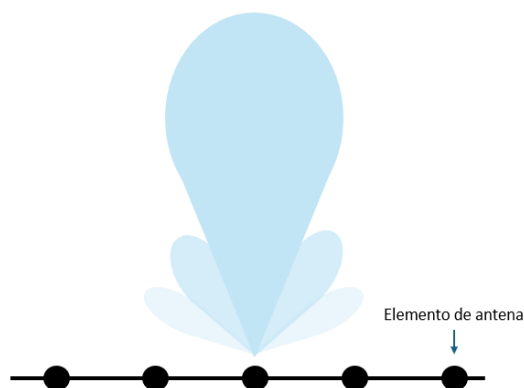
Con el desarrollo tecnológico se han mejorado las antenas considerando diferentes características necesarias: una mayor ganancia, alta precisión, peso ligero, inteligencia y reconfigurables. Usualmente se utilizan antenas parabólicas en satélites, hoy en día se tiene una mayor exigencia en la miniaturización en los equipos de radiofrecuencia en donde se espera que las antenas tengan una mayor reducción en su tamaño (Li et al., 2022).

Una de las innovaciones más destacadas de los satélites es el uso de arreglos de antenas, que representan una evolución significativa en la optimización de transmisión y recepción de señales electromagnéticas. Un arreglo de antenas se describe como una estructura que consiste en múltiples elementos radiantes idénticos en un arreglo regular y excitados para obtener un patrón de radiación prescrito (IEEE, 1983), es decir son distribuciones espaciales de elementos radiantes que permiten modificar el patrón de radiación con características requeridas del sistema.

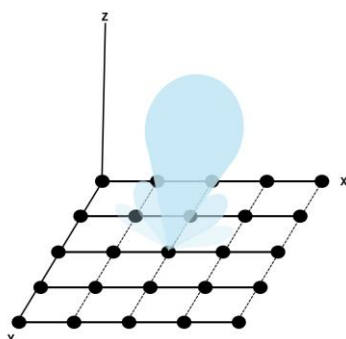
El arreglo actúa como una sola antena, generalmente con características direccionales mejoradas, por tanto, una mayor ganancia de antena comparado a la que se obtendría de los elementos de antena individuales. La versatilidad es una de las ventajas más importantes al utilizar los arreglos de antenas, ya que se pueden configurar en distintas geometrías para obtener características únicas de cada arreglo.

Algunos de los más comunes son los siguientes: El arreglo lineal es muy sencillo de analizar y sigue una distribución de elementos como se muestra en la Figura 2, el arreglo planar mostrado en la Figura 3 es muy utilizado en satélites y por último el arreglo circular es similar al planar con la diferencia de que la posición de cada elemento sigue una forma circular como se muestra en la Figura 4.

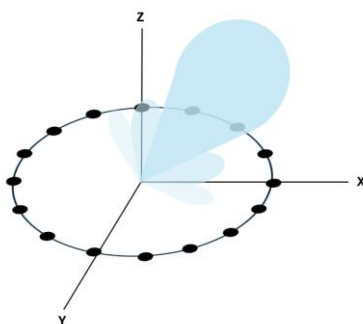




**Figura 2.** Distribución de elementos de antena en un arreglo lineal.



**Figura 3.** Distribución de elementos de antena en un arreglo planar.

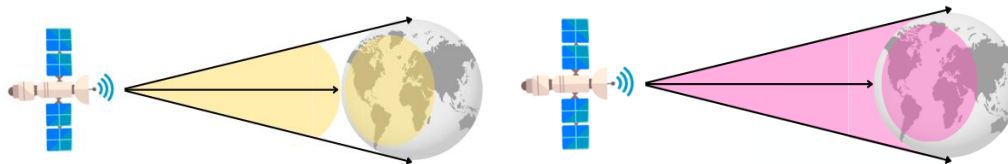


**Figura 4.** Distribución de elementos de antena en un arreglo circular.

Los sistemas de antenas modernos llevan una serie de requisitos a considerar en el diseño del sistema, tales como: dimensión física del arreglo, eficiencia energética, simplificación del hardware y la generación de radiación tipo Isoflux, este último solo puede obtenerse utilizando arreglos de antenas.

La radiación Isoflux proporciona una iluminación de la superficie de la Tierra dentro de su margen de visión en el polo ecuatorial, es decir, hace que los puntos lejanos del nadir reciban la misma cantidad de potencia al mismo tiempo como se observa en la Figura 5. En un sistema convencional se necesitaría realizar un

aumento de potencia en todo el patrón de radiación para lograr alcanzar estos puntos lejanos ocasionando un exceso de potencia en un área donde este aumento no es necesario por lo que es considerado un desperdicio (Fernández, 2022).



**Figura 5.** Radiación de tipo convencional (izquierda) y radiación de tipo Isoflux (derecha).

Se ha demostrado que es factible alcanzar arreglos de antenas que generen diversos patrones de radiación. Sin embargo, el desafío reside en identificar el tipo de arreglo que asegure las condiciones óptimas de seguimiento según la aplicación específica que se esté utilizando (Balanis, 2005).

Existe un gran interés en mejorar la eficiencia del consumo de energía en todo el sistema de antenas montado en los satélites. Por lo que utilizar arreglos de antenas facilitará generar una radiación de tipo Isoflux. Además, no existe un solo diseño de arreglos de antenas que sea el mejor para cierta aplicación, es decir cada diseño puede adaptarse a su aplicación utilizando diferentes técnicas de optimización.

Actualmente se cuentan con varias contribuciones relevantes en la aplicación de Isoflux en las antenas de satélite a diferentes órbitas. Algunos ejemplos para GEO consideran los trabajos de Reyna A. (2011, 2012), los cuales utilizan dos diseños de arreglos el primero siendo un arreglo circular concéntrico y el segundo siendo un arreglo planar aperiódico, para ambos diseños se obtiene una radiación Isoflux y logran mantener un nivel bajo de lóbulos laterales (SLL) que son los causantes de tener interferencias.

No solo se busca la radiación Isoflux con satélites GEO, sino también con satélites LEO debido a su proximidad a la Tierra tienen un menor tiempo de retardo en la transmisión y recepción de datos. Hay varios ejemplos para la aplicación de Isoflux en arreglos de antena tales como: en el artículo de El-Hassan M. (2019) se utiliza un arreglo circular concéntrico con radiación Isoflux para satélites LEO en banda X empleando el método de optimización por enjambre de partículas; en la tesis de Fernández R. (2022) se analiza el comportamiento de un arreglo lineal en distintas órbitas, obteniendo buenos resultados para MEO y GEO; y en la tesis de Díaz de la Paz P. (2023) analiza diferentes tipos de arreglos (lineal, planar uniforme y no uniforme y anillos concéntricos) en diversas órbitas de LEO (entre 500 km a 2000 km).

Los diseños de arreglos de antenas no deben ser necesariamente simétricos, es decir, la manera en la que los elementos de antena son distribuidos dentro de un plano puede ser aleatoria o dispersos, esta decisión de diseño puede ser por varias razones, una de ellas siendo la disminución del número elementos. Si bien el elemento de antena no es la parte más costosa del sistema, utilizan de otros componentes electrónicos como los amplificadores, desfasadores, etc. Los cuales dependiendo el tamaño del arreglo y sus características pueden exceder un presupuesto.

En el trabajo de investigación de He y Wang (2023) se explica de manera detallada un diseño de optimización para arreglos planares dispersos aplicados en satélites con distintos métodos de optimización siendo estos de análisis, inteligentes, locales y mixtos, Esto para realizar la comparación de que método funcionaría mejor para encontrar la posición óptima para cada uno de los elementos de antena en el arreglo. Al utilizar un arreglo de antenas disperso se logra reducir la cantidad de antenas necesarias para generar un patrón de radiación deseado, es decir, se logra obtener casi la misma radiación que su diseño convencional con más antenas teniendo una mayor ventaja tanto económica como la complejidad del sistema.

La disminución en la cantidad de elementos de antena no es solo la única ventaja de los arreglos dispersos, sino también es la reducción del nivel de los lóbulos laterales siendo una característica muy buscada en todo ámbito en especial en satélites. Reyna et al. (2012) realiza la comparación entre arreglos planares uniformes y arreglos planares aperiódicos con radiación de tipo Isoflux en GEO, en donde ambos resultados muestran cumplir con el Isoflux. Sin embargo, los arreglos aperiódicos muestran una gran reducción de SLL siendo estos una mejor opción de diseño ya que para satélites de órbita GEO al estar más lejos de la Tierra son propensos a tener interferencias o pérdidas y tener un nivel bajo de SLL ayuda a reducir esta probabilidad.

Tomando en cuenta las propiedades de arreglos dispersos, nace la curiosidad de explorar nuevas geometrías, tomando en cuenta que muchas cosas en la tecnología toman como referencia la naturaleza, se puede tomar inspiración de esta para obtener nuevas técnicas. En el año 2011, Viganó M. C. trabajó con un arreglo de antenas espiral (inspirado en la geometría de un girasol) para aplicarlo en satélites. Al ser una forma que está en la naturaleza, al tener la relación entre el radio y el espacio angular utilizando el ángulo dorado de la espiral, se logra generar un espacio entre los elementos de antena casi uniforme, al mismo tiempo que se utilizó técnicas de sub-arreglos para reducir la estructura electrónica. Esta técnica resultó exitosa para la distribución de multihaces sobre una zona del continente europeo, logrando

obtener SLL bajos y además una distancia entre elementos casi uniforme, pero manteniendo las características aperiódicas del arreglo.

En el artículo escrito por K. Encino et al. (2022) se explora el diseño de arreglos tipo espiral en antenas las cuales consisten en la disposición de elementos en un plano siguiendo la forma de espirales específicas, como la espiral logarítmica, la espiral de Arquímedes y la espiral de Fermat. El objetivo fue comparar estos diseños para determinar su idoneidad como arreglos de antenas, ya que la mayoría de sus aplicaciones se concentraban en radares y ultrasonido (Martínez-Graullera et al., 2010).

Sin embargo, aún no se ha establecido si los arreglos de tipo espiral pueden convertirse en una propuesta de diseño viable para satélites con radiación Isoflux.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Hoy en día el uso de arreglos de antenas es cada vez más frecuente, en especial en las comunicaciones satelitales ya que un sistema de antenas convencional requiere de un mayor consumo de energía y de peso en la carga útil del satélite. Así mismo, existe el problema de la distancia entre Tierra y satélite, ya que esto ocasiona pérdidas de potencia en la transmisión de datos independientemente de la órbita en la que está el satélite.

En un sistema de radiación convencional en un satélite necesita cubrir una zona de la superficie terrestre de manera uniforme, es decir, transmitir una misma potencia al mismo tiempo dentro de esa zona. Sin embargo, debido a la curvatura de la Tierra en puntos lejanos del nadir no va a alcanzar a recibir o transmitir las señales hacia el satélite. Por lo que se opta por hacer un aumento de nivel de potencia para alcanzar los puntos más lejanos, aunque esto significa que tendremos partes en donde se reciba este aumento que no lo necesitan siendo esto quizá un gasto innecesario en componentes que puedan soportar este nuevo nivel.

Utilizar la radiación de tipo Isoflux es ideal ya que proporciona una iluminación de la superficie de la Tierra dentro de su margen de visión en el polo ecuatorial, haciendo que la potencia transmitida sea distribuida de forma uniforme a todos los puntos de visión. Solo puede generarse utilizando arreglos de antena, la ventaja de utilizarlos es que son muy versátiles en cuanto al diseño, ya que los elementos de antena se

pueden distribuir siguiendo el patrón de diferentes geometrías siendo estas lineales, circulares, planares, etc. Cada uno puede brindar diferentes características que puedan ser favorables en distintas aplicaciones.

Se conoce que los arreglos aperiódicos muestran características favorables en la aplicación de satélites, ya que logran una reducción en la cantidad de elementos de antena y un nivel bajo de SLL. La única desventaja es que a la hora de ensamblarlos algunos elementos pueden estar más cerca o lejanos entre sí. Una estructura de arreglo espiral tiene una distribución en un plano no uniforme pero su geometría permite obtener espacios entre elementos casi uniformes, lo cual en diseño es algo deseable.

Utilizar una estructura de arreglo espiral para generar una radiación tipo Isoflux puede mejorar ciertos aspectos antes vistos con otras estructuras, como es directividad del haz principal, lóbulos laterales bajos e incluso disminuir la complejidad del sistema con el uso de sub-arreglos de antenas.

### **1.3 Justificación**

Con la realización de la tesis, se pretende contribuir con un nuevo estudio de diseño en arreglos de antena con radiación tipo Isoflux para aplicaciones satelitales para mejorar las características de este tipo de radiación, utilizando como técnica principal el factor de arreglo que considera los elementos de antena como elementos isotrópicos. De esta forma las simulaciones serán más rápidas antes de intentar un diseño final. Este proyecto ayudará a conocer la posibilidad de aprovechar las ventajas que presenta un arreglo tipo espiral y aplicarlas para lograr una radiación de tipo Isoflux, ya que hoy en día se utilizan cada vez más los arreglos de antena en satélites y siguen surgiendo nuevas técnicas para seguir reduciendo la complejidad de este sistema de antenas.

### **1.4 Hipótesis**

Para mejorar la radiación tipo isoflux en arreglos de antena en satélites, se propone trabajar con diferentes configuraciones de arreglos tipo espiral, implementando técnicas de diseño tales como: factor de arreglo, algoritmos genéticos o sub-arreglos. Con esto se espera lograr reducir la complejidad del sistema de antenas y mejorar las características de radiación.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo general

Desarrollar sistemas de radiación tipo isoflux basados en arreglos de antenas utilizando configuraciones tipo espiral para mejorar las prestaciones de radiación y/o reducir la complejidad total del sistema.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- Desarrollar sistemas de radiación tipo isoflux basados en arreglos de antena tipo espiral con la capacidad de mejorar las prestaciones de radiación y manteniendo un nivel de lóbulos laterales mínimo.
- Estudiar diferentes configuraciones tipo espiral (ya sea aperiódicas) para el diseño de arreglos de antenas.
- Analizar el caso de diseño de arreglos espirales de antenas basados en sub-arreglos en diferentes configuraciones.

## 1.6 Organización de la tesis

La presente tesis se encuentra organizada de la siguiente manera. El capítulo 2 presenta un marco teórico sobre las comunicaciones satelitales en donde se describen las órbitas satelitales más comunes, el interés actual en cada una y una descripción sobre lo que es la radiación de tipo Isoflux. El capítulo 3 proporciona un marco teórico sobre arreglo de antenas, así como, algunas de sus características principales, la importancia del uso del factor de arreglo en diseño, las diferentes geometrías que puedan utilizarse finalizando con la geometría espiral y las posibles ventajas de la espiral de Fermat en aplicaciones satelitales. En el capítulo 4 se describe de toda la metodología en el diseño del arreglo espiral con radiación de tipo Isoflux, iniciando con la utilización del método de optimización de algoritmos genéticos. Después explicándose como puede lograrse la radiación Isoflux en un arreglo espiral. Además, se describe la función objetivo y los requisitos de diseño, se determinan diferentes casos de diseño y se proponen elementos de

antena para obtener resultados en un escenario real. El capítulo 5 explica en detalle el análisis de resultados en simulación electromagnética. El capítulo 6 aborda las conclusiones de este trabajo de tesis y que se puede esperar a futuro para este diseño de arreglo de antenas.

## Capítulo 2. Comunicaciones satelitales

---

### 2.1 Introducción

Hoy en día las telecomunicaciones han transformado la sociedad al conectar globalmente a individuos, empresas y gobiernos, permitiendo una comunicación rápida y eficiente que impulsa el desarrollo económico, social y cultural. Son el conjunto de tecnologías y procesos que permiten la transmisión y recepción de información a distancia mediante señales electromagnéticas, es decir abarcan una variedad de medios como cables, ondas de radio, fibra óptica y satélites, los cuales son esenciales para la comunicación moderna facilitando el intercambio de información entre personas en diferentes ubicaciones geográficas.

Un satélite de comunicaciones es una estación repetidora de ondas que permite dos o más usuarios con estaciones terrenas apropiadas para entregar o intercambiar información en diversas formas (Elbert, 2008). Tienen una amplia gama de usos que abarcan diversas industrias y necesidades globales ya que facilitan las telecomunicaciones proporcionando enlaces para llamadas telefónicas internacionales e internet en áreas remotas, apoyar la radiodifusión incluyendo televisión y radio satelital, ofrecen servicios de navegación y localización precisos a través de sistemas como el GPS, entre otras aplicaciones. Además, son una parte importante en situaciones de emergencia y desastres naturales, un ejemplo de esta aplicación es cuando un devastador terremoto golpeó a la Ciudad de México en septiembre de 1985, el recién lanzado satélite Morelos 1 mantuvo una transmisión de televisión confiable en todo el país, a pesar de que todas las líneas terrestres de larga distancia de la ciudad quedaron en silencio (Elbert, 2008).

La capacidad de los satélites para ofrecer conectividad continua y de alta calidad, incluso en las condiciones más desafiantes, los convierte en un componente indispensable de la infraestructura de comunicaciones global, apoyando una amplia variedad de aplicaciones críticas y contribuyendo al bienestar y progreso de la sociedad.

### 2.2 Órbitas satelitales

Las órbitas satelitales son las trayectorias específicas que los satélites siguen alrededor de la Tierra o de



otros cuerpos celestes, son importantes para la funcionalidad de los satélites determinando factores como la cobertura, la resolución de las imágenes, el tiempo de comunicación y el tipo de aplicaciones que puedan soportar. La selección de una órbita particular depende del propósito del satélite y de las necesidades específicas de su misión. Se clasifican según varios criterios como: altitud, inclinación y forma, en la Tabla 1 se muestra alguna de las clasificaciones de las órbitas.

**Tabla 1.** Clasificación de las órbitas.

Altitud	Inclinación	Forma	Finalidad
Órbita Baja Terrestre (LEO)	Órbita Ecuatorial	Órbita Circular	Órbita Sincrónica al Sol (SSO)
Órbita Media Terrestre (MEO)	Órbita Polar	Órbita Elíptica	Órbita de Transferencia Geoestacionaria (GTO)
Órbita Geoestacionaria (GEO)	Órbita Inclinada	----	Órbita Molniya
Órbita Alta Terrestre (HEO)	---	----	---

### 2.2.1 Órbita Geoestacionaria (GEO)

La idea de satélites de telecomunicaciones geosíncronos comienza por Arthur C. Clarke en su artículo de 1945 en *Extra-Terrestrial Relays (1945)* donde destacó que cualquier servicio de transmisión que lograra transmitir en toda la Tierra al mismo tiempo, sería algo invaluable e indispensable para toda la sociedad. Anteriormente Konstantine E. Tsiolkovsky en 1918 y H. Noordung en 1929 habían señalado que un satélite a 35 800 km sobre el ecuador tendría un período orbital igual a la rotación de la Tierra (Tsiolkovsky, 1960). La era espacial comenzó una década después, el 4 de octubre de 1957 con el lanzamiento del Sputnik 1, el primer satélite artificial.

La órbita geoestacionaria (GEO) es una órbita circular situada a aproximadamente 35,789 km sobre el ecuador terrestre con un periodo igual al periodo rotacional de la Tierra el cual es de 23 hr. 56 min. 4 seg., en el cual un satélite se mueve a la misma velocidad angular que la rotación de la Tierra como se puede observar en la Figura 6. Esto permite que el satélite permanezca estacionario respecto a un punto fijo en la superficie terrestre, proporcionando una cobertura continua sobre una misma área. El satélite al tener una posición fija en relación con la superficie terrestre los hace idóneos para las comunicaciones, ya que así las estaciones terrenas solo deben apuntar a una única posición sin cambiar su orientación en el tiempo y sin necesidad de buscar el satélite (Fernández, 2022).



**Figura 6.** Órbita geoestacionaria Terrestre (GEO).

Un solo satélite GEO puede proveer casi una cobertura hemisférica de la tierra a una baja resolución, esto haciéndolo particularmente útil para el estudio del fenómeno del clima global, también estos satélites han desarrollado un alto nivel de importancia como un complemento a la navegación satelital tradicional (Montenbruck y Gill, 2001).

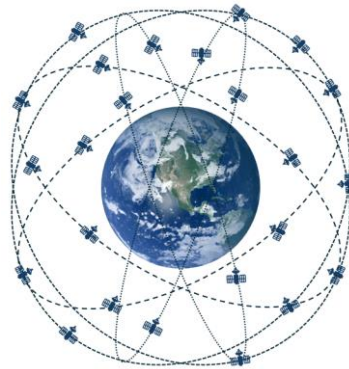
### 2.2.2 Órbita terrestre media (MEO)

Históricamente, hay un número significativo de residentes de MEO que han estado en orbitas muy elípticas que pasan la mayor parte de cada revolución en la zona. Uno de los ejemplos más conocidos de este tipo de órbitas son los satélites rusos Molniya con perigeos iniciales en la región LEO (450 km – 600 km) y con apogeos cercanos a los 40 000 km. Aproximadamente la mitad de sus operaciones de retransmisión de comunicaciones se producen mientras los satélites se encuentran en la región MEO y el resto en altitudes más altas (Johnson, 2010).

La órbita media terrestre se encuentra entre 2,000 km y 35,786 km sobre la superficie terrestre y es utilizada principalmente para sistemas de navegación y algunos tipos de comunicación. Los satélites MEO tienen un periodo orbital de alrededor de 12 horas, lo que les permite cubrir amplias áreas de la Tierra con menos satélites en comparación con las órbitas bajas.

La región MEO es más conocida hoy en día por las redes globales de navegación por satélite. Estados Unidos después de probar dos experimentos de satélites de navegación en la región MEO durante 1974-1977, comenzó a desplegar a principios de 1978 su sistema global de posicionamiento (GPS), cuyos satélites individuales se conocen como NAVSTAR. Está compuesta de una constelación de 24 satélites en órbitas aproximadamente circulares a una altitud media cercana a los 20,300 km como se observa en la

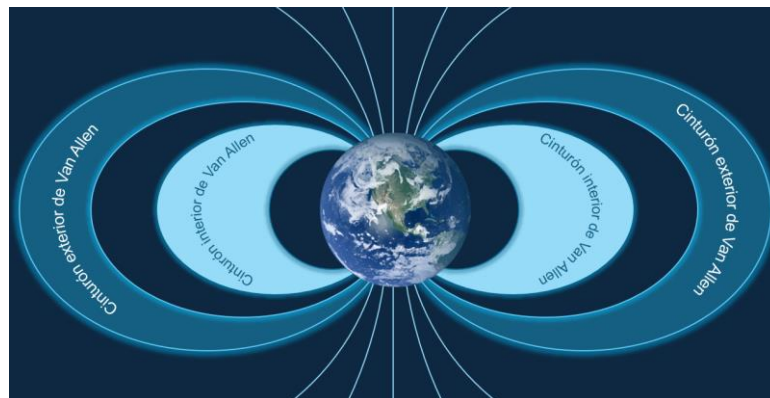
Figura 7, las señales de transmisión GPS se han vuelto indispensables para aplicaciones tanto civiles como militares (Johnson, 2010).



**Figura 7.** Constelación GPS.

### 2.2.3 Órbita baja terrestre (LEO)

La órbita baja terrestre (LEO) se encuentra justo por encima de la atmósfera terrestre, donde casi no hay aire que pueda reducir la velocidad del satélite. Su rango de altitud está entre 275 km y 1,400 km siendo la última limitada por la presencia de los cinturones de Van Allen (Cakaj, 2009).



**Figura 8.** Cinturón de Van Allen

Los cinturones de Van Allen son dos zonas de la magnetósfera terrestre donde se concentran grandes cantidades de partículas cargadas de alta energía, originadas en su mayor parte por el viento solar capturado por el campo magnético, teniendo una forma como la que se muestra en la Figura 8. El cinturón interno se extiende desde aproximadamente 1,000 km a 6,000 km sobre la superficie terrestre y el cinturón externo que se extiende desde alrededor de 13,000 km a 60,000 km. son conocidos por tratarse

de una zona de radiación la cual ocasiona efectos indeseados a los satélites ya que puede dañar los componentes eléctricos y celdas solares (Koskinen & Kilpua, 2021).

Se recomienda evitar colocar satélites en dichas zonas, sin embargo, a veces es necesario trabajar a ciertas altitudes para obtener ciertos servicios, por eso los satélites se preparan con blindaje de radiación que puede utilizar materiales como aluminio, plomo y otros compuestos para crear barreras físicas que absorben o desvían las partículas radiactivas.

Los satélites LEO pueden ser utilizados con fines científicos y de investigación, en específico en circunstancias en las que ningún medio terrestre es apropiado. Dinámicas del cambio climático, aplicaciones de teledetección de océanos, diferentes observaciones astronómicas, registros de densidad de iones en la ionosfera y aplicaciones humanitarias muy específicas relacionadas con los servicios de búsqueda y rescate son algunas de las actividades que llevan a cabo estos satélites (Cakaj, 2021).

Al tener la menor distancia entre el satélite y la Tierra, los satélites LEO proveen una menor latencia en transmisión de datos, convirtiéndolos en equipos convenientes para las comunicaciones satelitales en comparación con las otras órbitas. Tienen una velocidad aproximadamente de 7.5 km/s teniendo un periodo orbital dentro del rango de 90-110 minutos, al ser tan corto produce breves duraciones de servicio en donde un determinado satélite puede servir a un usuario concreto (Cakaj, 2021; Elbert, 2008).

Actualmente se cree que las redes de comunicación que combinan las terrestres y las satelitales están aquí para quedarse y serán una parte muy importante para las actividades de comunicación diarias, cuyas demandas aumentarán rápidamente. Por lo tanto, los operadores deberán gestionar cuidadosamente la distribución de estos servicios en tiempo real buscando maximizar el rendimiento de datos del enlace descendente conforme a los requisitos de banda ancha, sin afectar significativamente el costo de la misión (Cakaj, 2009).

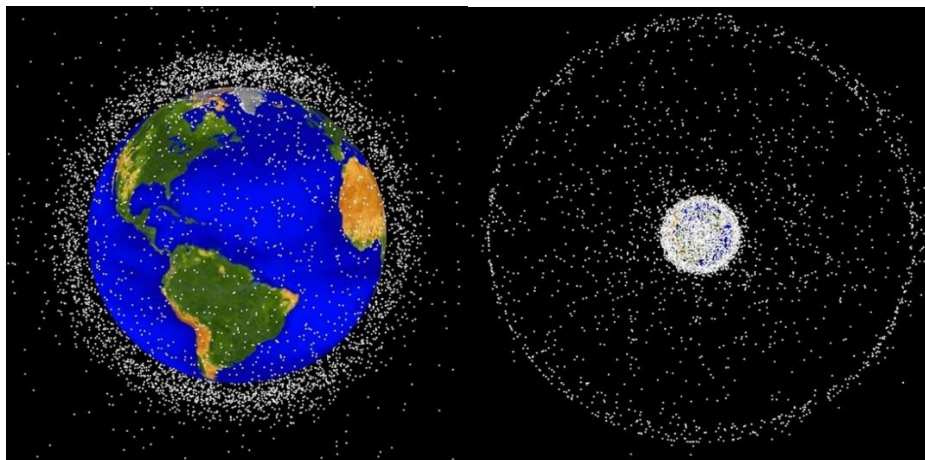
#### 2.2.4 Mega constelaciones

Con el desarrollo en la disminución de los costos con satélites pequeños y el equipo de comunicaciones satelitales avanzado, las redes de mega constelaciones han ganado una gran popularidad estos últimos años. Estas mega constelaciones están formadas por cientos y miles de satélites colocados en la órbita LEO

incluso en combinación con la órbita MEO, para proveer una baja latencia, comunicaciones de banda ancha y una cobertura global para los usuarios en la Tierra (Chen et al., 2021).

Sin embargo, En el entorno espacial cercano a la Tierra se ha convertido en el más saturado en estas últimas décadas no solo por los satélites activos sino también los desechos espaciales los cuales pueden ser fragmentos de equipos generados en algún accidente como colisiones, explosiones, estrés térmico o impactos menores. En 2009 ocurrió la colisión entre dos satélites, Iridium-33 de los Estados Unidos y Cosmos-2251 de Rusia a una velocidad de 11.7 Km/s. Se dice que hay más de 2,000 piezas de residuos de este evento, lo cual marcó la importancia en la predicción de colisiones entre objetos. La órbita LEO es la región más saturada ya que contiene aproximadamente un 80% de los objetos espaciales en solo un 0.3% del espacio que hay por debajo de la altitud de una órbita GEO (Zhang et al., 2022).

Los residuos espaciales son un factor importante para considerar ya que no solo están en la órbita de mayor interés hoy en día, sino también pueden llegar a tener una velocidad de hasta 56,000 km/h, haciendo que incluso la pieza más pequeña pueda ocasionar un daño muy grande. Para esto, La Oficina del Programa de Desechos Orbitales (ODPO) de la NASA tiene la responsabilidad de identificar estos objetos en el espacio para lograr predecir sus trayectorias además de establecer un control en la cantidad de desechos en cada lanzamiento aplicando distintas técnicas (Office of Science and Technology Policy, 1995). Para evitar colisiones las recomendaciones recurrentes son que cualquier objeto espacial sea removido de LEO dentro de 25 años al final de sus operaciones (McDowell, 2020). En la Figura 9 se observa la concentración de residuos espaciales siendo la mayoría residuos de un tamaño menor a los 10 cm en la órbita LEO.



**Figura 9.** Representación gráfica generada por computadora de los residuos espaciales en la órbita LEO (Office of Science and Technology Policy, 1995).

Con la propuesta y desarrollo de varias mega constelaciones LEO recientemente, poseen características que brindan un amplio rango de aplicaciones en el campo de comunicaciones, monitoreo remoto y navegación, así como cambios revolucionarios en el desarrollo de la industria espacial global. Los Estados Unidos, Reino Unido, China, Canadá, Japón, Rusia y la Unión Europea tienen planes propuestos para mega constelaciones LEO, se espera que en la siguiente década se lancen aproximadamente 100,000 satélites en constelaciones, excediendo por mucho la cantidad total de satélites lanzados desde el inicio de las actividades espaciales creadas por el hombre (Zhang et al., 2022).

Existen varias constelaciones reconocidas como lo son OneWeb, Iridium Next, Globalstar, Flock, Samsung, Boeing, Telesat y Amazon. Una de las más representativa es la mega constelación Starlink de SpaceX, ubicada en la órbita LEO con el propósito de obtener una cobertura global, alta velocidad, gran capacidad y baja potencia para un sistema de comunicación basado en satélites. Starlink es la constelación LEO de internet más grande del mundo, con un plan de tener un total de 42,000 satélites. En un inicio se tenía confirmado el plan de lanzar 12,000 satélites ubicados en las órbitas cercanas a 340 km, 550 km y 1150 km sobre la Tierra. No obstante, SpaceX ha realizado varias modificaciones en su propio plan de desarrollo, y, actualmente ha cancelado satélites en altitudes orbitales cercanas a la de 1150 km (Zhang et al., 2022).

Inicialmente SpaceX planeaba lanzar 4,425 satélites de los 12,000 propuestos en la primera etapa distribuidos en varias capas como se muestra en la Tabla 2, cuyos transmisores utilicen la banda Ka (27-40 GHz) o en la banda Ku (12-18 GHz) y el resto en la banda V (60 GHz – 80 GHz) con una vida útil de 5 a 7 años dentro de la órbita baja con 83 planos orbitales, a su vez estos satélites se comunican entre sí utilizando láseres y los que son adyacentes en la misma órbita y adyacentes en planos orbitales son capaces de intercambiar información (Rozenvasser & Shulakova, 2023; Zhang et al., 2022).

**Tabla 2.** Altitudes Orbitales e inclinaciones de la constelación propuesta (McDowell, 2020).

Capa	Altitud (km)	Inclinación (grados)	Planos	Número de Satélites
A	550	53	72	1584
B	1110	53.8	32	1600
B	1130	74	8	400
B	1275	81	5	375
B	1325	70	6	450
C	346	53		2547
C	341	48		2478
C	336	42		2493

Starlink al ser un sistema que necesita mantener una comunicación continua con cada satélite hacia la Tierra lo ideal sería una antena que pueda seguir el paso del satélite por toda su trayectoria en la órbita LEO, para ello utilizan un método único para sus antenas siendo este el arreglo de antenas de fase como se muestra en la Figura 10. Para proveer una baja velocidad de latencia, se requieren miles de micro antenas que trabajen en conjunto para crear un haz de fase en el arreglo. Estos arreglos proporcionan un haz estrecho y más concentrado que puede ajustar su dirección permitiendo pasar más información a la antena a una velocidad más rápida y con mayor potencia que otras antenas de comunicación por satélite (Gentile & Abdulla, 2022).

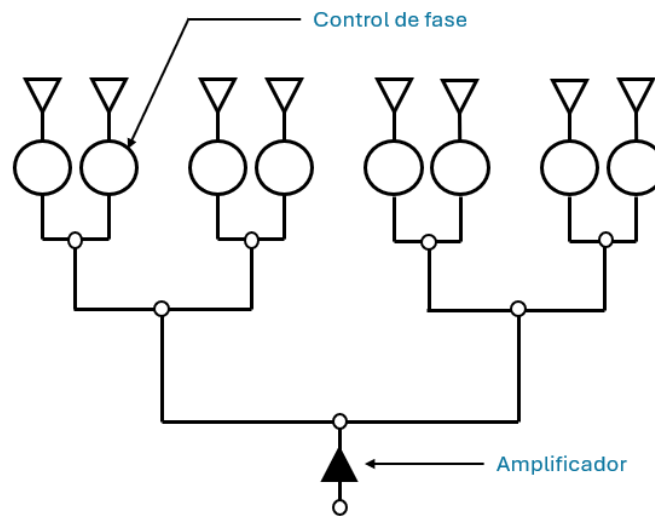


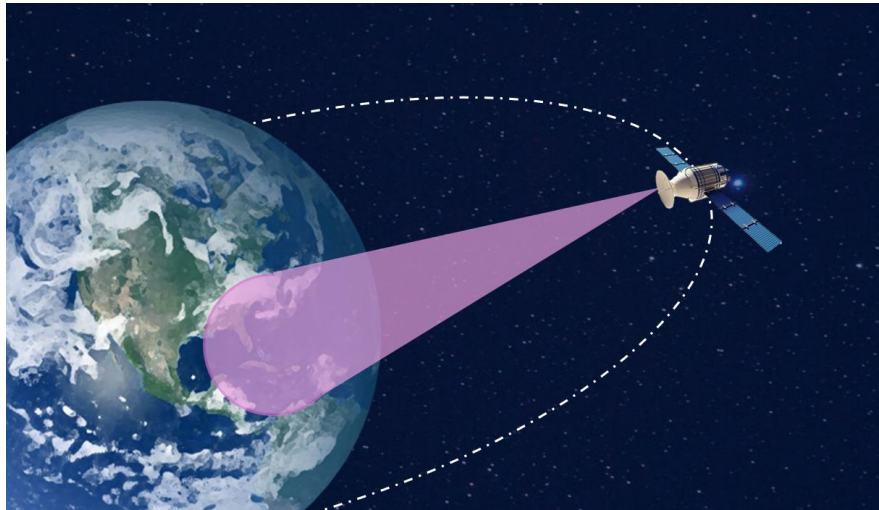
Figura 10. Representación del arreglo de fase (Gentile y Abdulla, 2022).

### 2.3 Radiación tipo Isoflux

La antena es una de las partes más importantes dentro de un sistema de comunicación satelital, ya que sin este elemento no sería posible la transmisión y recepción de datos por medio de ondas electromagnéticas. Puede considerarse a la antena como el ojo del sistema de radiación en el satélite ya que mantendrá una comunicación en toda la zona donde esté mismo este “viendo” y se perderá cuando el satélite se aleje de las estaciones terrenas en ese punto.

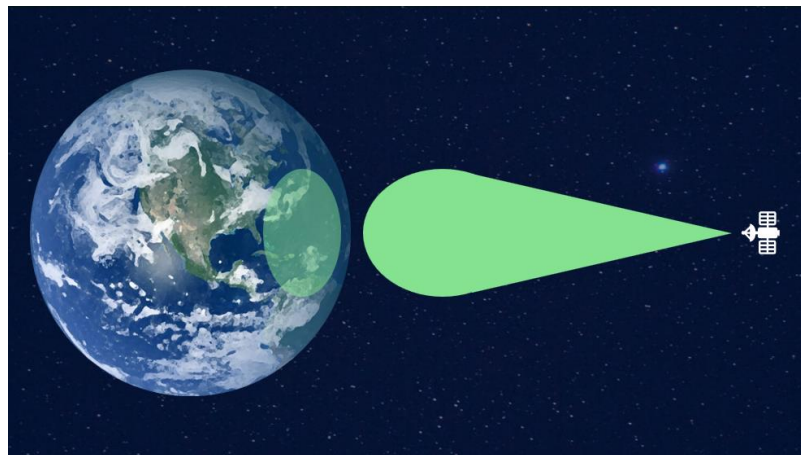
Así como se muestra en Figura 11 la antena del satélite tiene un área de cobertura definida dependiendo de la órbita y configuración que se encuentre, ya que un satélite que se encuentra en GEO tendrá una vista más completa del planeta en cambio uno que esté en LEO tendrá apenas un país en la vista solo si se tiene

una constelación en LEO puede obtenerse una zona completa de la Tierra o con el uso de multihazes es probable extender un poco esta área de cobertura.



**Figura 11.** Representación ilustrativa del campo de visión de un satélite.

Uno de los requisitos importantes en el desarrollo de antenas para satélites es el establecer una densidad de potencia uniforme en el área de visión, sin embargo, el comportamiento natural de la radiación de una antena es como la que se observa en la Figura 12, en donde se puede notar que tiene zonas donde no alcanza a cubrir con el mismo nivel de potencia que se necesitaría como en el área central del haz.

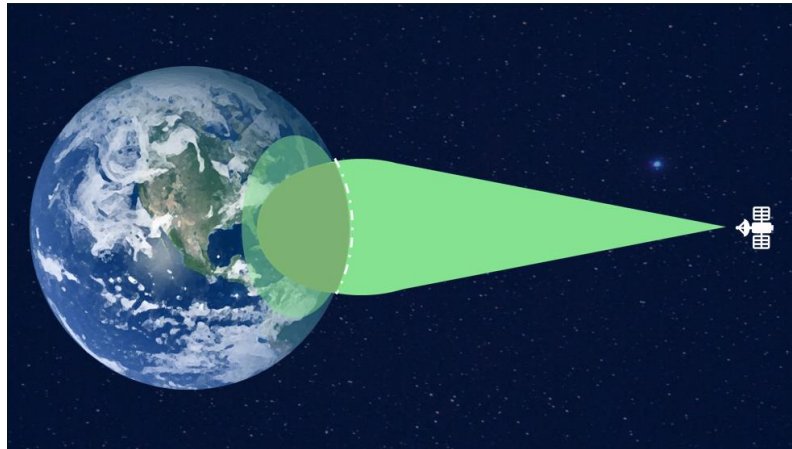


**Figura 12.** Representación ilustrativa de una radiación convencional.

Para lograr compensar el nivel de potencia en las zonas más alejadas del nadir del satélite, el método a utilizar es aumentar el nivel de potencia para aumentar el alcance del haz principal dejando un mayor alcance de área de cobertura como se puede observar en la Figura 13. No obstante, este aumento de

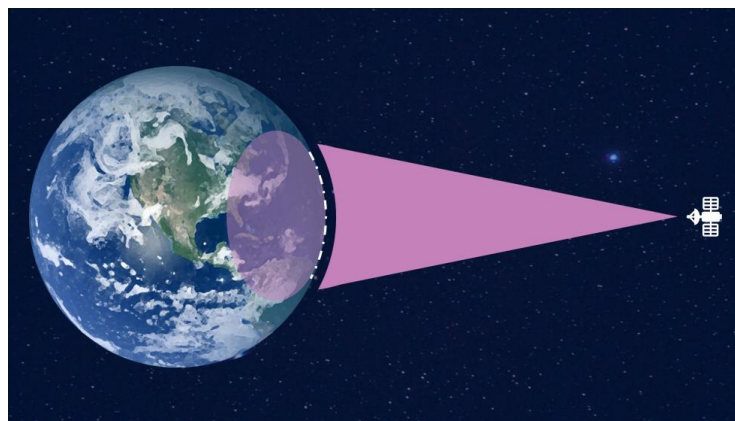


potencia implica que los sistemas tienen que utilizar componentes electrónicos que puedan soportar este cambio los cuales entre mayores niveles de potencia se trabaje son más costosos ya que todo tiene que asegurarse ser de la mejor calidad posible por el hecho de que realizar un reemplazo de un componente no sería posible. Además, en la misma figura se puede apreciar una zona verde oscura la cual representa el exceso de potencia que se tendría dentro de la zona, es decir, mientras las áreas alejadas tienen la potencia necesaria en otras se tendrá un excedente que se considera una pérdida (El-Hassan et al., 2019).



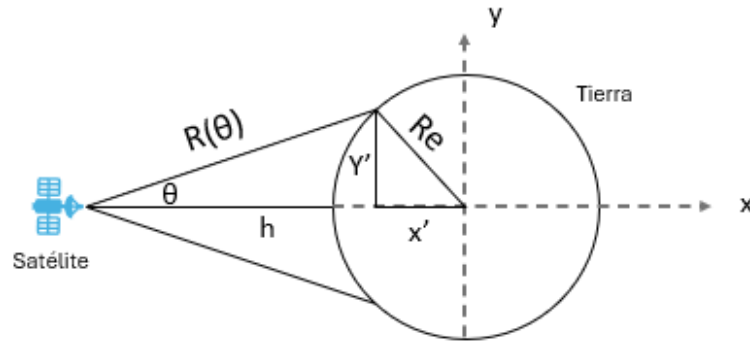
**Figura 13.** Representación ilustrativa del procedimiento que realiza una radiación convencional para cumplir con una densidad uniforme de potencia.

La radiación Isoflux es aquella que tiene una forma de “cuneta” en su lóbulo principal que logra adaptarse a la curvatura de la Tierra obteniendo una densidad de potencia uniforme en el área de cobertura deseada, así como se muestra en la Figura 14. En otras palabras, el haz de la antena se adapta a la forma de la Tierra como si la abrazara sin tener que aumentar la potencia evitando el excedente desperdiciado dicho anteriormente. En estos sistemas se provee una radiación sin ninguna variación en la densidad de potencia en ningún punto de la superficie de la Tierra (Reyna et al., 2012).



**Figura 14.** Representación ilustrativa de la radiación tipo Isoflux.

Para lograr representar una ecuación que describa la variación en la distancia del satélite y la Tierra dentro de la zona de cobertura deseada se apoya en el Manual del Sistema Geodésico Mundial - 1984 (WGS 84 por las siglas en inglés de World Geodetic System - 1984). El estándar de la Tierra en WGS 84 se define por cuatro parámetros; semieje elipsoide mayor ( $a$ ), aplanamiento del elipsoide ( $v$ ), velocidad de rotación media ( $w$ ) y la constante gravitacional ( $GM$ ). Estos parámetros son fundamentales para definir varios de los sistemas de coordenadas comúnmente utilizados en la Tierra (True, 2004).



**Figura 15.** Iluminación electromagnética sobre el polo ecuatorial de la Tierra (Adaptado de Reyna et al. (2012)).

El semieje mayor también es conocido como el radio ecuatorial de la Tierra es de 6,378,137 m mientras que el semieje menor o radio polar es de 6,356,752 m. Si se considera que el satélite sigue una trayectoria alrededor del plano XY como se ve en la Figura 15 solo se estará iluminando una parte de la Tierra. En el trabajo de Reyna et al. (2012) se describe una expresión que relaciona la distancia  $R$  entre el satélite y un punto sobre el campo de visión a un ángulo de separación del nadir  $\theta$ . Dicha expresión parte de la ecuación de la elipse en donde  $a$  es el radio ecuatorial de la Tierra y  $b$  es el radio polar de la Tierra, las variables  $x'$  y  $y'$  se pueden representar en las funciones trigonométricas seno y coseno del ángulo  $\theta$  así como se muestra en las ecuaciones (1), (2) y (3) (Díaz de la Paz, 2023).

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

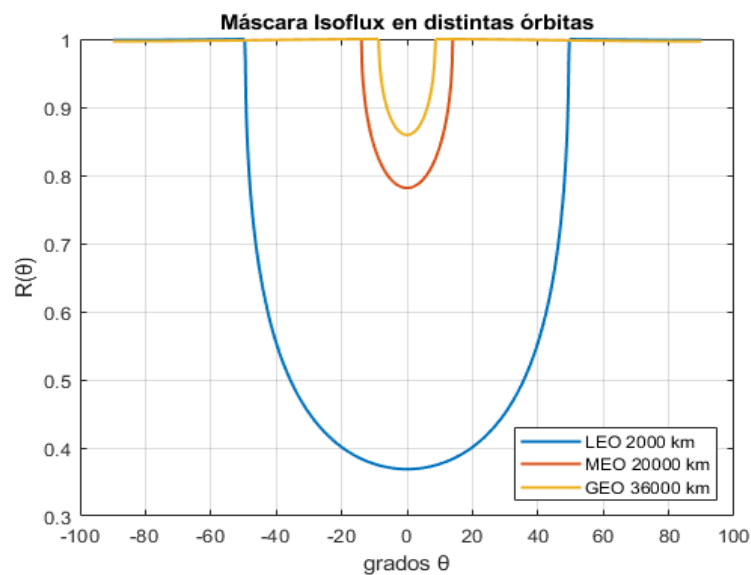
$$y' = R(\theta)\text{sen}\theta \quad (2)$$

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

Sustituimos las ecuaciones (2) y (3) en la ecuación (1) para obtener la siguiente ecuación algebraica la cual nos ayudará para calcular la radiación Isoflux correspondiente.

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

$R_s(\theta)$  indica la distancia del satélite a cualquier punto de la superficie de la Tierra,  $h$  representa la altura del satélite en kilómetros y  $R_e$  es la distancia del centro de la Tierra a cualquier punto de su superficie. La ecuación (4) es muy versátil en cuanto a la altura del satélite ya que la máscara Isoflux se adaptará dependiendo de la órbita en que se encuentre siendo LEO, MEO o GEO, así como puede observarse en la (Díaz de la Paz, 2023; Fernández, 2022; Ibarra et al., 2015; Reyna et al., 2012).



**Figura 16.** Máscara Isoflux en distintas órbitas.

Utilizando un software matemático como lo es MATLAB se puede obtener la radiación Isoflux deseada, así como se puede apreciar en la Figura 16 las tres órbitas comunes siendo el color azul de LEO a 2,000 km, color rojo de MEO a 20,000 km y por último siendo color amarillo de GEO a 36,000 km. También se puede visualizar la gran diferencia entre cada una de ellas dependiendo de su distancia respecto a la Tierra, es decir, una órbita LEO a 2,000 km necesita un mayor ángulo de apertura en la máscara Isoflux de aproximadamente  $-50^\circ$  a  $50^\circ$ , en cambio para un satélite en órbita GEO se necesita una apertura aproximadamente de  $-9^\circ$  a  $9^\circ$ . Esta gran diferencia en el ángulo de apertura se debe principalmente a la

distancia en la que se encuentra el satélite ya que esto influye en la percepción de la Tierra, dicho de otra forma, para un satélite en GEO la Tierra puede verse como una pelota de tenis mientras que para un satélite en LEO se ve como una pelota de baloncesto.

## **2.4 Conclusiones**

Los satélites son una parte fundamental para la comunicación hoy en día, al utilizar varias órbitas se pueden realizar configuraciones que puedan ofrecer una variedad de aplicaciones tales como televisión por satélite, internet de banda ancha, sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de navegación (GNSS), monitoreo meteorológico, astronomía, vigilancia y seguridad, entre otros. Utilizar una radiación de tipo Isoflux ayudaría mucho en disminuir costos en amplificadores ya que tendríamos una distribución uniforme de la potencia, sin embargo, este tipo de radiación solo es posible de realizar mediante arreglos de antenas ya que no existe alguna antena que pueda producir este haz de manera natural. En la siguiente sección estará un marco teórico sobre los arreglos de antenas los cuales nos ayudaran a determinar las geometrías que pueden utilizarse para generar la radiación Isoflux.

## Capítulo 3. Arreglos de antenas

---

### 3.1 Introducción

En los sistemas de comunicaciones modernos basados en satélites es importante cumplir con distintos requisitos para un mejor desempeño. Anteriormente se describió a cada una de las órbitas más comúnmente utilizadas de las cuales podemos decir que nunca se ha perdido el interés en seguirlas utilizando, dejando como consecuencia una cierta saturación de estas en especial en la LEO, donde no solo hay satélites activos e inactivos, sino que también quedan los residuos espaciales que dejan los lanzamientos, colisiones, etc.

Una de las principales innovaciones tecnológicas en los últimos años es la miniaturización electrónica, permitiendo la creación de dispositivos más pequeños, rápidos y eficientes. En el área de satélites es una característica importante ya que de esta forma es posible ahorrar costos de lanzamiento, ya que en la actualidad por la saturación que existe en órbitas como LEO se tienen más regulaciones las cuales consideran las dimensiones del satélite para aplicar su debido costo tanto como crearlo hasta ponerlo en órbita. Una posible ventaja sería que algunos satélites cuentan con sistemas de propulsores que ayudan a que se puedan evitar posibles colisiones esto con mayor facilidad, es decir, al tener menos masa no utilizaría tanto combustible.

El instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (1983) define a una antena como la parte de un sistema transmisor o receptor diseñado para radiar o recibir ondas electromagnéticas, puede llegar a ocupar una proporción de aproximadamente del 30%-50% del espacio disponible en un satélite porque se suele utilizar grandes antenas parabólicas. Al tener una agrupación de elementos radiantes idénticos colocados en un plano y excitados para obtener un patrón de radiación se le conoce como arreglo de antenas, el cual permite reducir el tamaño del sistema de radiación del satélite y ofrecer una mayor eficiencia, flexibilidad de diseño y funcionamiento de los satélites (The Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE], 1983).

En este capítulo se describirá algunas de las características importantes y geometrías utilizadas en arreglos de antenas.

## 3.2 Características de arreglos de antenas

Usualmente el patrón de radiación de un solo elemento de antena es relativamente ancho, y cada elemento tiene bajos valores de directividad, en muchas aplicaciones es necesario diseñar antenas con características muy directivas para cumplir con la demanda de la comunicación a larga distancia, esto solo puede lograrse aumentando el tamaño eléctrico de la antena (Balanis, 2016).

Una antena compuesta por múltiples elementos radiantes se conoce como un arreglo, generalmente cada elemento del arreglo es idéntico, esto no es estrictamente necesario, pero es conveniente, sencillo y más práctico para su fabricación. Si se considera elementos idénticos en un arreglo, existen al menos 5 parámetros que pueden ser utilizados para controlar la forma del patrón de radiación del arreglo de antenas (Balanis, 2016):

1. Configuración geométrica del arreglo de antenas (lineal, circular, rectangular, esférico, etc.)
2. El espacio relativo entre elementos.
3. La excitación de amplitud para cada elemento de antena.
4. La excitación de fase para cada elemento de antena.
5. El patrón de radiación relativo de cada elemento de antena.

Los arreglos de antenas se utilizan en una variedad de aplicaciones que requieren la síntesis de un diagrama con especificaciones muy precisas de directividad, ancho de haz o nivel de lóbulo principal a secundario, además, permiten variar electrónicamente la forma del diagrama de radiación modificando la amplitud y la fase de alimentaciones de las antenas básicas (Cardama Aznar et al., 2002).

### 3.2.1 Patrón de radiación

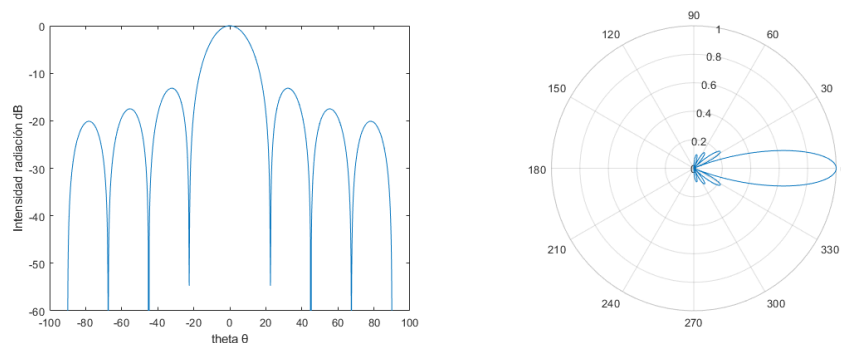
Un patrón de radiación de antena se define como la función matemática o la representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales. En la mayoría de los casos, el patrón de radiación se determina en la zona del campo lejano y se representa en función de las

coordenadas direccionales. Algunas de las propiedades de la radiación incluyen densidad del flujo de potencia, intensidad de radiación, intensidad del campo, directividad, fase o polarización (Balanis, 2016). El patrón de radiación puede expresarse en un sistema de coordenadas cartesiano o esférico, generalmente se utiliza este último. Un arreglo de antenas tiene una radiación de energía en un espacio tridimensional, de la cual se puede obtener información sobre sus propiedades al representar su patrón de radiación en dos dimensiones.

Para una antena se puede representar las siguientes características (Balanis, 2005):

- Patrón de radiación en una escala lineal, representa una gráfica de la magnitud del campo eléctrico o magnético como una función del espacio angular.
- Patrón de potencia en escala lineal, representa una gráfica del cuadrado de la magnitud del campo eléctrico o magnético en función del espacio angular.
- Patrón de potencia en decibeles, representa una gráfica de la magnitud del campo eléctrico o magnético en decibeles, en función del espacio angular.

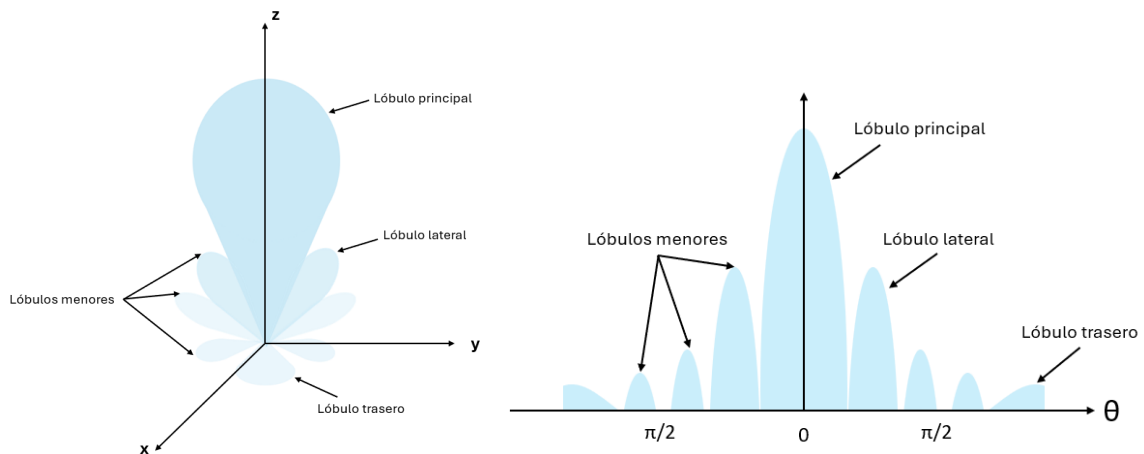
Para su representación bidimensional se ocupa realizar un corte en un valor constante en alguno de sus ángulos de elevación, por ejemplo, si la radiación de una antena fuera una barra de pan, se puede analizar su distribución realizando varios cortes a diferentes medidas y los ángulos describen la manera en la que se corta cada rebanada puede ser un corte de manera diagonal, horizontal, vertical o de cualquier forma y se tiene una gran libertad para realizar los ajustes necesarios para cada aplicación. En la Figura 17 se puede observar la representación de un patrón de radiación en sus coordenadas cartesianas y polares, para este ejemplo se utilizó un arreglo lineal de 16 antenas.



**Figura 17.** Ejemplo de patrón de radiación en coordenadas cartesianas y en coordenadas polares.

### 3.2.1.1 Lóbulos laterales

Algunas partes del patrón de radiación se les conoce como lóbulos, que pueden ser clasificados como mayor o principal, menor, lateral y lóbulos traseros como se observan en la Figura 18. La radiación de un lóbulo se considera como una porción del patrón de radiación limitado a zonas donde hay una baja intensidad de radiación, es usual que unos sean más grandes que otros, pero todos se categorizan como lóbulos (Balanis, 2016).



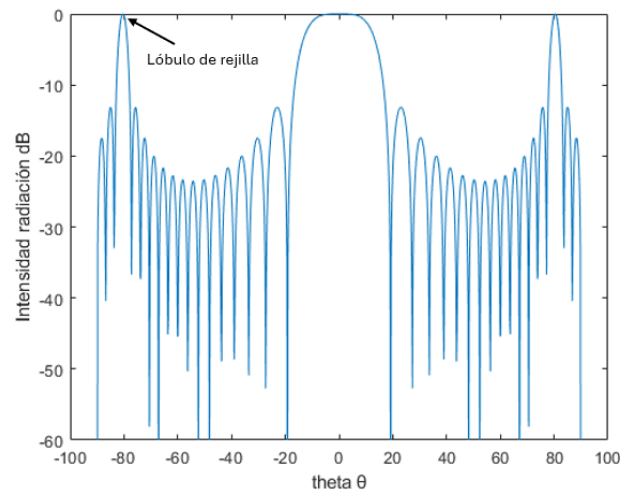
**Figura 18.** Representación de los lóbulos de radiación en su modelo tridimensional y bidimensional (Adaptado de Balanis (2016)).

Un lóbulo principal se define como el lóbulo de radiación que contiene la dirección de la radiación máxima la cual está definida a cierto ángulo  $\theta$ , por ejemplo, en la Figura 18 el lóbulo principal está en la dirección  $\theta = 0$ . En algunos casos puede existir más de un lóbulo principal como en las antenas de haz dividido. Los lóbulos menores son cualquier otro lóbulo que no sea el principal, dentro de estos se le conoce como lóbulo lateral el que tiene la mayor energía, suelen estar justo al lado del lóbulo principal. Un lóbulo trasero se define como “un lóbulo de radiación cuyo eje forma un ángulo de aproximadamente  $180^\circ$  con respecto al haz de una antena” (Balanis, 2005).

Los lóbulos menores se representan como una radiación en direcciones no deseadas por lo que siempre se busca reducirlos. El nivel de lóbulos menores generalmente se expresa como una relación entre la densidad de potencia en el lóbulo en cuestión y el del lóbulo mayor. Esta relación se le denomina nivel de lóbulos laterales. Los niveles de lóbulos laterales de  $-20$  dB o menos generalmente no son deseables en la mayoría de las aplicaciones (Balanis, 2005).



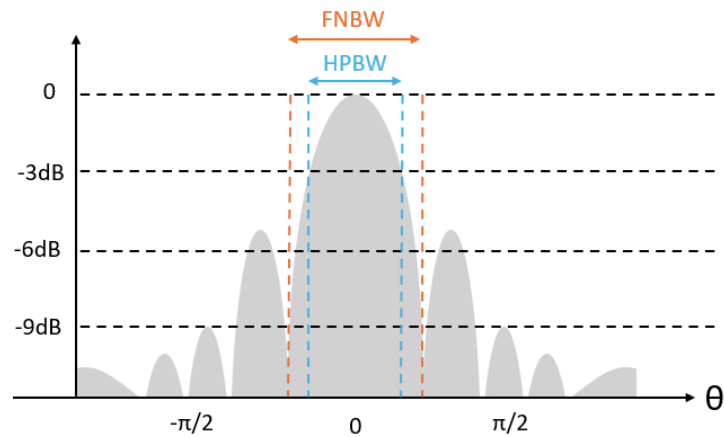
Un lóbulo de rejilla es un lóbulo diferente al principal, producido por un arreglo de antenas en el que el espacio entre elementos no es suficientemente grande como para permitir la adición en fase de los campos radiados en más de una dirección, según en definición de El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (1983). Su característica principal es el de tener el mismo nivel de potencia que el lóbulo principal, esto provoca que exista un ruido en nuestro sistema ya que estaremos recibiendo señales en un ángulo no deseado, esto se puede controlar manteniendo una distancia entre elementos no mayor de  $0.7\lambda$  ya que mayor a esta cantidad empezaran a aparecer, así como en la Figura 19 la cual mantiene una distancia entre elementos de  $1.2\lambda$ .



**Figura 19.** Aparición de lóbulos de rejilla en arreglo lineal de 15 elementos con  $d=1.2\lambda$ .

### 3.2.2 Ancho de haz

El ancho de haz es otro parámetro importante que se obtiene a partir del patrón de radiación en su representación gráfica en coordenadas rectangulares. El ancho de haz nos ayuda a definir la separación angular entre dos puntos idénticos en lados opuestos del lóbulo máximo. Se puede considerar diferentes tipos de ancho de haz uno de los más utilizados es el ancho de haz a media potencia (HPBW por sus siglas en inglés Half-power Beamwidth). El HPBW se define en un plano que contiene la dirección del haz máximo, el ángulo entre dos direcciones en el cual la intensidad de radiación equivale la mitad del valor del haz (The Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE], 1983). Otro ancho de haz es aquel que considera la separación angular entre los primeros nulos del patrón de radiación, es decir, los puntos en donde el lóbulo principal equivale a cero, a este se le llama ancho de haz al primer nulo (FNBW por sus siglas en inglés First-Null Beamwidth) (Balanis, 2016). en la Figura 20 se muestra la diferencia entre ambos.



**Figura 20.** Identificación del ancho de haz en un patrón de radiación (Adaptado de K. E. Encino (2020)).

El ancho del haz de una antena es una importante figura de mérito que a menudo se utiliza como compensación entre el mismo y el nivel del lóbulo lateral, a medida que el ancho del haz aumenta, el lóbulo lateral disminuye y viceversa. Además, el ancho del haz también se utiliza para describir las capacidades de resolución de la antena para distinguir entre dos fuentes radiantes u objetivos de radar adyacentes. El criterio de resolución más común establece que la capacidad de resolución de una antena para distinguir entre dos fuentes es igual a la mitad del ancho de haz al primer nulo (FNBW), que generalmente se usa para aproximar ancho de haz de media potencia (HPBW).

### 3.3 Factor de arreglo

Se define a un arreglo de antenas como un conjunto de  $N$  antenas idénticas que radian o reciben simultáneamente. El diagrama de radiación de este conjunto se obtiene como la interferencia de los campos radiados por cada una de las antenas, mientras que en la recepción la señal recibida es una combinación lineal de las señales que capta cada antena, esta radiación es igual al producto del patrón de un elemento de antena multiplicado por un factor que tiene en cuenta la interferencia de las  $N$  ondas generadas por las  $N$  antenas (Balanis, 2016; Cardama Aznar et al., 2002). Este factor depende únicamente de la separación entre los elementos del arreglo, la fuente de alimentación y de la frecuencia de trabajo, y se le conoce como factor de agrupación o factor de arreglo (FA).

$$E(\text{total}) = [E(\text{un solo elemento de antena en el punto de referencia})] \times [\text{factor de arreglo}] \quad (5)$$

En el factor de arreglo no es necesario considerar el patrón de radiación de cada elemento de antena, ya que los considera como elementos isotrópicos esto como fin de agilizar los cálculos del diseño del arreglo. Esta ecuación cambia dependiendo de la estructura geométrica del arreglo ya que la posición de cada uno de los elementos puede variar la manera en la que se comportan como un conjunto, haciendo que cada estructura sea diferente entre sí y ofrezcan ventajas únicas de cada tipo de arreglo. A continuación, se describirá algunas de las configuraciones más comunes de encontrar, para el desarrollo de esta tesis se utilizará un arreglo de tipo espiral.

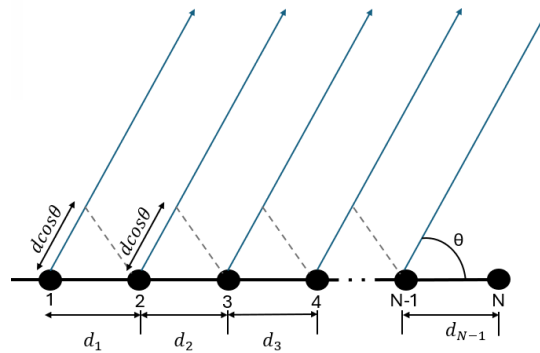
### 3.4 Arreglo lineal

Un arreglo de antenas lineal es aquel cuyos elementos de antena están colocados sobre una línea recta espaciados a una misma distancia  $d$  si se trata de un arreglo uniforme como se muestra en la Figura 21. Se considera al arreglo lineal el más sencillo de analizar ya que no requiere de geometrías complicadas o diseños complejos y tiene una red de alimentación más sencilla. Su factor de arreglo puede obtenerse considerando a los elementos como fuentes puntuales, si se asume que todos los elementos tienen la misma amplitud, cada elemento sucesivo tiene una fase  $\beta$  progresiva guiada por una excitación con respecto al elemento anterior (Balanis, 2016).

$$\begin{aligned}
 FA &= A_1 + A_2 e^{j(kd \cos(\theta) + \beta)} + A_3 e^{j2(kd \cos(\theta) + \beta)} + \dots + A_N e^{j(N-1)(kd \cos(\theta) + \beta)} \\
 &= \sum_{n=1}^N A_n e^{j(N-1)(kd \cos(\theta) + \beta)}
 \end{aligned} \tag{6}$$

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

Los arreglos lineales pueden ser uniformes o no uniformes, es decir, se puede tener un vector de amplitudes aleatorias para cada una de las antenas incluso se puede separar la distancia entre cada elemento la cual está dada en términos de longitud de onda que puede ir desde  $0.2\lambda$  a  $1\lambda$ , aunque lo ideal se mantiene en  $0.5\lambda$  para que el patrón de radiación no se vea tan afectado.



**Figura 21.** Ejemplo de un arreglo lineal.

### 3.5 Arreglo planar

Los arreglos planares son aquellos en que sus elementos son colocados sobre un plano bidimensional generalmente en formación rectangular o cuadrada casi como si se tuviera varios arreglos lineales interconectados en el caso de que el arreglo sea periódico como en la Figura 22.

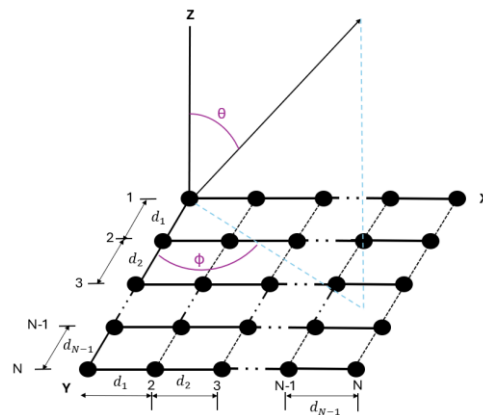
Este tipo de arreglo provee variables adicionales que pueden ser utilizadas en control y forma del diseño del arreglo, ya que son muy versátiles pueden brindar un patrón de radiación más simétrico con lóbulos laterales bajos. Pueden ser utilizados para mover el haz principal de la antena hacia cualquier punto en el espacio muy útil para aplicaciones como: radar de rastreo y búsqueda, monitoreo remoto, comunicaciones entre otros (Balanis, 2016).

Al ser muy versátiles en cuanto a su estructura, se puede optimizar la posición de cada elemento de antena en el arreglo, no es estricto que tengan que respetar una separación entre cada elemento es decir se puede utilizar una distribución de posiciones completamente arbitrarias dentro de un plano XY, a los cuales se les puede decir como arreglo no uniforme, arreglo disperso o arreglo aperiódico como se puede apreciar en la Figura 23 (Reyna et al., 2012).

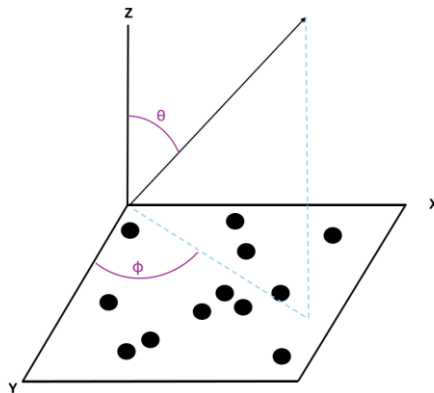
El factor de arreglo para un arreglo planar considera cada una de las posiciones de los elementos de antena en su posición en el eje x y en el eje y, esto hace más sencillo en una distribución de antenas aleatoria ya que se puede ver a cada elemento de antena como una coordenada sobre el plano XY.

$$AF = \sum_{n=1}^N A_n e^{j[k(x_n \sin\theta \cos\phi + y_n \sin\theta \sin\phi)]} \quad (7)$$

La ecuación (7) se parece un poco a la ecuación (6) solo que en este caso es importante considerar ambos ejes, en donde  $\theta$  es el ángulo de la onda plana en el plano de elevación,  $\phi$  es el ángulo de la onda plana en el plano azimutal,  $x_n$  y  $y_n$  son las coordenadas de los ejes  $x$  y  $y$  del  $n$ -ésimo elemento en el plano (Díaz de la Paz, 2023).



**Figura 22.** Ejemplo de un arreglo planar periódico.



**Figura 23.** Ejemplo de un arreglo planar aperiódico.

Al colocar elementos de antena en una estructura regular es la forma más sencilla de implementar elementos de antena en un arreglo. Una geometría así es más cómoda de fabricar y se presta para análisis matemáticos exactos. Si bien esta geometría puede ser favorable en algunas aplicaciones debido a su simplicidad, su regularidad significa que los lóbulos de rejilla aparecerán cuando esta estructura tenga un arreglo disperso en la que la distancia entre cada elemento exceda media longitud de onda (Keijsers,

2016). En un arreglo aperiódico puede parecer que las posiciones están puestas totalmente al azar, sin embargo, este tipo de arreglos requieren de utilizar cálculos que determinen la posición óptima para cada elemento y a su paso reducir su cantidad.

Se utilizan métodos de optimización para encontrar la mejor combinación de posiciones para el arreglo aperiódico como lo sería los algoritmos genéticos, optimización por partículas de enjambre, etc. Con solo reducir algunos elementos se puede obtener una irregularidad en un arreglo de antenas uniforme. En el artículo de He y Wang (2023), se demuestra que un arreglo planar disperso de 73 elementos puede lograr un patrón de radiación similar al de un arreglo uniforme de 169 elementos, destacando además que el arreglo disperso presenta un nivel bajo de lóbulos laterales.

Al mantener el nivel de lóbulos laterales bajo los arreglos aperiódicos han sido considerados para el diseño de arreglos de antenas en satélites, ya que simbolizan una pequeña ayuda en mejorar el patrón de radiación para cada satélite, así mismo se tienen diferentes diseños en la geometría del arreglo, hay trabajos de investigación como el de Reyna et al. (2017) en donde implementan una radiación isoflux para ambos casos en los cuales se destaca la disminución de lóbulos laterales por parte de los arreglos aperiódicos. Cabe mencionar que no solo se trata en geometrías cuadradas o rectangulares, sino que también se puede aplicar en geometrías circulares, lineales (Díaz de la Paz, 2023), de anillos concéntricos (Ibarra et al., 2014, 2015), entre otros.

### **3.6 Arreglo espiral**

El colocar elementos de manera completamente aleatoria asegura que estén distribuidos de manera aperiódica, pero esto no garantiza su rendimiento. Se han realizado estudios en donde se propone encontrar métodos que puedan expresar el comportamiento aperiódico incluso una distribución en combinación aleatoria y determinística que utilizan estructuras fractales que es utilizar sub-arreglos aleatorios colocados de forma periódica en el arreglo.

Los elementos al estar posicionados sobre una estructura curvilínea, como lo sería la espiral de Fermat, aseguran una baja periodicidad al mismo tiempo una expresión matemática más sencilla que en otras estructuras. Se tienen las siguientes fórmulas que describen la posición de cada elemento en una espiral (Keijsers, 2016; Kim & Jaggard, 1986):

$$\rho_n = s \sqrt{\frac{n}{\pi}} \quad (8)$$

$$\phi_n = 2\pi n \beta_1 \quad (9)$$

En donde  $\rho_n$  es la distancia desde el centro de la espiral hasta el  $n$ -ésimo elemento,  $n = 1, \dots, N$  es el número de elementos siendo  $N$  el total de elementos en el arreglo,  $s$  es la distancia entre elementos cercanos,  $\phi_n$  es el desplazamiento angular del  $n$ -ésimo elemento y el parámetro  $\beta_1$  controla el desplazamiento angular entre dos elementos consecutivos. A simple vista la espiral parece ser una línea, pero la elección del valor de  $\beta_1$  hace diferentes tipos de espirales.

Existe un caso especial que considera  $\beta_1 = \frac{\sqrt{5}+1}{2}$ , también conocido como el ángulo dorado, al ser utilizado hace que el arreglo se asemeje a la distribución de semillas en un girasol, a pesar de que su apariencia luzca aleatoria, este patrón de diseño proporciona una distancia entre elementos cercanos como una constante, es decir, trata de que cada elemento respete su distancia propuesta casi como en un arreglo periódico, pero manteniendo la estructura aperiódica (Keijsers, 2016).

El factor de arreglo espiral se define con la siguiente ecuación (K. Encino et al., 2022):

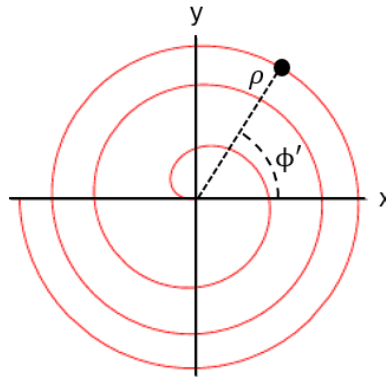
$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0(\vec{r}) \sum_{n=1}^N a_n e^{[jk(x_n \sin\theta \cos\phi + y_n \sin\theta \sin\phi + \beta_n)]} \quad (10)$$

En donde  $\vec{E}_0(\vec{r})$  es el patrón de radiación del elemento de antena,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\theta$  y  $\phi$  son el ángulo de elevación y azimutal respectivamente,  $a_n$  es el vector que contiene las excitaciones de amplitudes para cada  $n$ -ésimo elemento de  $N$  número de elementos en el arreglo distribuidos en las posiciones  $(x_n, y_n)$  las cuales pueden ser calculadas con lo siguiente (K. Encino et al., 2022):

$$x_n = \rho_n \cos(\phi_n) \quad (11)$$

$$y_n = \rho_n \sin(\phi_n) \quad (12)$$

$$\beta_n = -x_n \sin\theta_n \cos\phi_n - y_n \sin\theta_n \sin\phi_n \quad (13)$$



**Figura 24.** Espiral de Fermat.

La geometría espiral ha sido propuesta por varios artículos como parte del diseño individual del elemento de antena, es decir, se ha utilizado arreglos de antenas en donde la antena es la que tiene esta forma, por eso existe una confusión entre la geometría del arreglo o la geometría del elemento (Jafargholi & Kamyab, 2010; Nakano et al., 1996; Zhu et al., 2017). Sin embargo, existen trabajos en los que se han utilizado como geometría principal del arreglo, en el artículo “supresión de lóbulos secundarios para un arreglo de antenas aperiódico” escrito por Gabrielli & Hernández-Figueroa (2016), en donde se utiliza la espiral de Fermat para lograr una separación entre elementos de antenas en el arreglo y aun así suprimir la aparición de lóbulos secundarios, dando a entender que elegir este diseño para un arreglo puede ser aceptable cuando se tiene una aplicación que tenga una limitación en el espacio de la antena.

En el trabajo de investigación de Viganó (2011) utiliza esta geometría para utilizarlo en un patrón de multihaces, es decir la distribución de los haces están inspiradas en la geometría espiral de Fermat la cual toma la apariencia de las semillas de un girasol. En el artículo escrito por Martínez-Graullera et al. (2010) utiliza esta misma estructura en aplicaciones de ultrasonido en los que se concluye que es un buen diseño para un arreglo disperso.

De manera reciente se tiene el trabajo de tesis (2020) y el artículo (2022) de K. E. Encino en donde realiza una comparación entre tres estructuras espirales: espiral de Fermat, espiral de Arquímedes y la espiral



logarítmica. En el cual se concluye que la espiral de Fermat es la más adecuada para el diseño de un arreglo de antenas aperiódico ya que permite eliminar la restricción de distancia entre elementos que presentan los arreglos bidimensionales periódicos. En esta espiral pueden ser ubicados a distancias iguales o mayores que una longitud de onda sin que aparezcan lóbulos de tipo rejilla en el patrón de radiación teniendo una distribución como se muestra en la Figura 24.

El interés principal para el desarrollo de esta tesis es utilizar un arreglo de tipo espiral que pueda generar una radiación isoflux en aplicaciones satélites, de lo cual aún no hay avances que tengan esta estructura y radiación.

### **3.7 Conclusiones**

Los arreglos de antena han mostrado tener grandes ventajas sobre otros sistemas de radiación, su principal característica a destacar es su versatilidad ya que pueden utilizar distintas geometrías para diferentes aplicaciones. En satélites se han utilizado arreglos lineales, planares, circulares o de anillos concéntricos, en la mayoría de las veces suelen utilizarse las estructuras periódicas por su facilidad de construcción, aunque los arreglos dispersos también están siendo utilizados por su gran ventaja de reducción de elementos y disminución de lóbulos laterales.

Un arreglo espiral muestra excelentes características para ser empleados sobre satélites, tanto como una posible disminución de elementos de antena como también la disminución de lóbulos laterales ya que no están limitados en la distancia entre elementos aun cuando se excede una distancia mayor a  $1\lambda$ . En la siguiente sección se tendrá la metodología para lograr un diseño de arreglo de antenas espiral con una radiación Isoflux para satélites.

## Capítulo 4. Metodología de diseño del arreglo de antenas espiral con radiación Isoflux

---

### 4.1 Introducción

Los satélites han revolucionado las comunicaciones, la navegación, la observación de la Tierra y la seguridad global, teniendo un impacto profundo en la sociedad y la tecnología moderna. Para lograr esto, se han utilizado todas las órbitas satelitales, sin embargo, podemos decir que la órbita LEO es una de las más solicitadas por su cercanía a la Tierra, esta distancia corta hace que la transmisión y recepción de datos tengan un menor tiempo de latencia siendo algo esencial para las nuevas tecnologías de alta velocidad, lo cual la convierte en una de las órbitas más saturadas. Por lo tanto, es importante buscar nuevas formas de reducir el tamaño de los satélites y hacerlos aptos para estar en dicha zona.

El sistema de radiación es una de las partes más significativas para la reducción del tamaño de los satélites, ya que haciendo uso de arreglos de antenas podemos tener una versatilidad de diseños que nos permitirán reducir el tamaño de la antena de un satélite.

Los arreglos aperiódicos muestran una gran característica deseable en aplicaciones satelitales la cual es la reducción de lóbulos laterales debido a que no están restringidos a la distancia entre elementos, sin embargo, no cuentan con una expresión matemática sencilla. Un diseño con la geometría de la espiral de Fermat que utilice el ángulo dorado asegura una baja periodicidad que disminuye los lóbulos laterales y al mismo tiempo proporciona una expresión matemática más sencilla.

En este capítulo se verá el diseño de un arreglo con geometría de la espiral de Fermat que pueda generar la radiación Isoflux haciendo uso del método de optimización de algoritmos genéticos (AG) utilizando como variable de diseño las excitaciones de amplitud de los elementos de antena considerando los siguientes casos:

- Diferentes órbitas LEO para implementar la radiación Isoflux (346 km, 550 km, 1150km).
- Número de elementos.

- Población e iteraciones.

## 4.2 Algoritmos genéticos

Generar un patrón de radiación Isoflux requiere de un método que pueda encontrar el conjunto de excitaciones de amplitud óptimo para el arreglo espiral, sin embargo, no se podrían utilizar métodos determinísticos ya que son completamente determinados por condiciones iniciales sin involucrar el azar o la probabilidad. Estos se caracterizan por producir resultados consistentes y repetibles, además de que el tiempo que necesitarían estos métodos para encontrar la mejor solución aumentaría bastante, por lo que no es recomendable utilizarlos. En cambio, es necesario recurrir a métodos heurísticos ya que no tienen que dar necesariamente un resultado exacto, pero si resultados aceptables a lo que deseamos.

Los algoritmos genéticos (AG) se inspiraron en el mecanismo de evolución de las especies, basándose en el trabajo de Darwin y Mendel, se han utilizado con éxito para resolver problemas más variados y complejos. Se les dice de esta forma ya que simulan los procesos de evolución a través del uso de operadores genéticos (cruzamiento y recombinación, mutación y selección del más apto) que se aplican sobre una población de individuos o cromosomas que evolucionan de una generación a otra (Piñero et al., 2003; Silvério et al., 2013).

Cuando se habla de AG se suelen utilizar algunos conceptos de la computación evolutiva siendo estos los siguientes(Coello, 2001):

- **Cromosoma:** Una estructura de datos que contiene una cadena de parámetros de diseño o genes, podría compararse a una cadena de bits o un arreglo de enteros, como se observa en la Figura 25.
- **Gen:** una subsección de un cromosoma que codifica el valor de un solo parámetro.
- **Genotipo:** codificación de los parámetros que representan una solución del problema a resolverse.
- **Fenotipo:** a la decodificación del cromosoma, es decir, los valores obtenidos al pasar de la representación binaria a la usada por la función objetivo.
- **Individuo:** un solo miembro de la población de soluciones potenciales a un problema, cada uno

contiene un cromosoma.

- **Alelo:** cada valor posible que pueda adquirir una cierta posición genética.
- **Generación:** una iteración de la medida de aptitud a la creación de una nueva población por medio de operadores de reproducción.
- **Aptitud:** al valor que se asigna a cada individuo y que indica que tan bueno es este con respecto a los demás para la solución del problema.

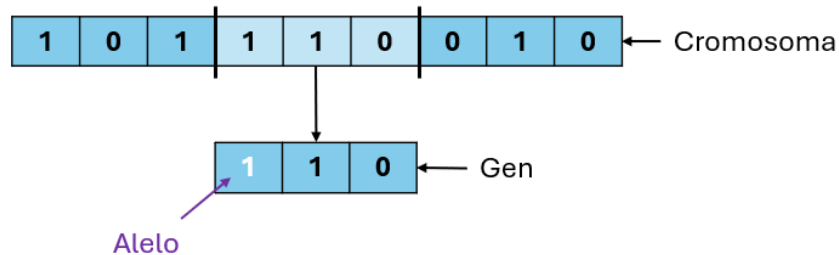


Figura 25. Ejemplo de cromosoma, gen y alelo.

A continuación, se describe los pasos generales del AG utilizados en este trabajo de tesis.

#### 4.2.1 Generar la población inicial

Una población es el conjunto de posibles soluciones y esta puede generarse de dos formas: la primera siendo que los individuos sean generados aleatoriamente y la segunda puede ser una población generada por medio de una heurística relacionada a las características del problema (Silvério et al., 2013). A una posible solución se le conoce como individuo de la población y nosotros podemos determinar la cantidad de posibles soluciones que queremos analizar en cada iteración del algoritmo. Para el desarrollo de esta tesis no se tiene una condición inicial por lo que la población inicial será generada con individuos aleatoriamente.

#### 4.2.2 Cálculo de aptitudes del individuo

La función de evaluación de la población debe reflejar los objetivos a alcanzar en la solución del problema

y se deriva directamente de las condiciones impuestas por este. Esta función es la forma que utiliza el AG para determinar la aptitud de cada individuo, esto es la calidad de un individuo como solución al problema en cuestión (Silvério et al., 2013). Para ello se genera un factor de arreglo para cada individuo de la población, la aptitud a evaluar se determina a partir de la capacidad del factor de arreglo para cumplir con las características deseadas las cuales son la creación de la máscara Isoflux.

En este caso cada individuo representa un conjunto de excitaciones de amplitud los cuales son los que se utilizarán para generar el factor de arreglo. Un individuo se considerará apto si su factor de arreglo tiene la capacidad de crear una radiación similar a la máscara Isoflux. Se estará evaluando el error que hay entre lo que se desea obtener (Isoflux) y lo que tenemos (FA actual).

#### 4.2.3 Selección de padres

El criterio de selección se basa en dar mayor probabilidad de ser padres a los individuos más aptos, logrando mejorar la población en generaciones futuras. Se utilizará una selección por jerarquías en la cual todos los individuos son ordenados de mayor a menor de acuerdo con su valor de aptitud:

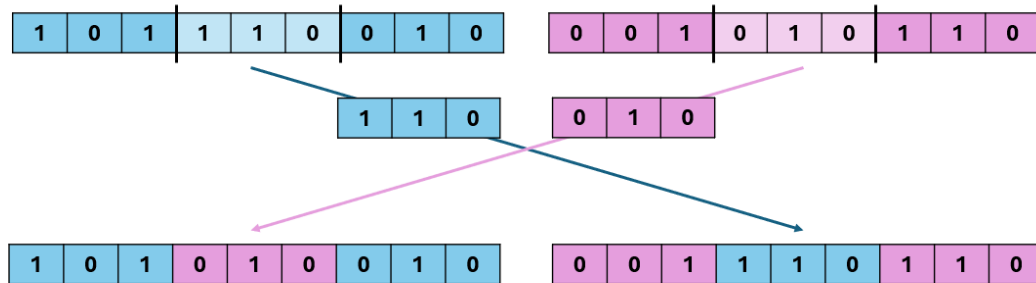
$$E(i) = Min + (Max - Min) \frac{jerarquia(i) - 1}{P - 1} \quad (14)$$

En donde  $P$  es el tamaño de la población y  $Min = 2 - Max$ . Según Baker (1985) tener un valor de  $Max = 2$  ocasiona una convergencia en la población para cada generación, es decir, no tendremos variedad de resultados en nuestro algoritmo que es lo que se necesita para seguir mejorando con cada generación por lo que se sugiere un valor de  $Max = 1.1$  para que se mantenga en un rango deseable (Díaz de la Paz, 2023).

Después se utiliza la técnica de selección de ruleta, en donde cada individuo tiene su valor de aptitud representado proporcionalmente en relación con el valor total de aptitudes de la población. Así, se hace girar la ruleta y se seleccionan los individuos por sorteo. Quienes muestren mayor participación tendrán mayores posibilidades de ser seleccionados, cada que se gira la ruleta se selecciona un nuevo individuo. Aunque este método tiene una desventaja de tener una varianza alta, lo que puede llevar a sorteos del mismo individuo que tiene un valor de aptitud alto lo que reduce la diversidad de la población y puede ocasionar una convergencia prematura del algoritmo (Silvério et al., 2013).

#### 4.2.4 Cruzamiento y mutación

El operador de cruzamiento es el más importante, ya que en este paso se combinan dos individuos para formar nuevos individuos. Al aplicar iterativamente este operador, se espera que los genes de individuos buenos aparezcan con mayor frecuencia en la población y finalmente converger hacia una buena solución. En esta operación se elige aleatoriamente una posición en los individuos seleccionados como padres y se rompe, los fragmentos restantes se recombinan y dos nuevos individuos se ponen a disposición a los cuales se les puede decir hijos (Silvério et al., 2013). En la Figura 26 se muestra el proceso de cruzamiento utilizado.



**Figura 26.** Ejemplo del cruce entre dos puntos de cada individuo.

Para asegurar que exista diversidad en la población tras generaciones, se utiliza el operador de mutación. Esto ocurre cuando se modifica un gen del cromosoma, es decir, existirá la probabilidad de que un individuo sea elegido para mutar uno de sus genes de manera aleatoria reemplazando su valor por otro igualmente aleatorio. En este caso se utiliza una probabilidad de mutación del 10% para todos los casos.

#### 4.2.5 Elitismo

Se le denomina elitismo al mecanismo utilizado en algunos algoritmos evolutivos para asegurar que los cromosomas de los miembros más aptos de una población se pasen a la siguiente generación sin ser alterados por ningún operador genético. Esto asegura que la aptitud máxima de la población nunca se reducirá de una generación a otra. Es importante utilizarlo ya que así el algoritmo puede acercarse a una solución cercana a la ideal, solo se considera un individuo o varios para la siguiente generación (Coello, 2001).

### 4.3 Proceso de diseño del arreglo espiral con radiación Isoflux

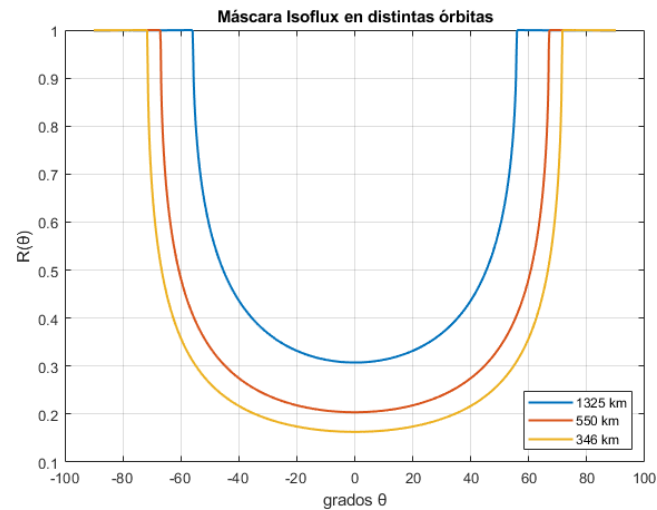
Anteriormente se mencionaron el interés que hay en la radiación de tipo Isoflux y como en la actualidad sigue desarrollándose con diferentes diseños de arreglo de antenas, también vimos las ventajas de utilizar un arreglo de tipo espiral ya que por ser aperiódico disminuye la aparición de lóbulos laterales y en el caso de la espiral de Fermat con el ángulo dorado mantiene una distancia entre elementos casi idéntica. Sin embargo, no hay algún trabajo que indique la aplicación de este tipo de radiación con un arreglo espiral por lo que es la mayor inspiración de esta tesis y comprobar su viabilidad.

Al no tener un punto de partida se realizan distintas pruebas con variación en: número de antenas del arreglo, número de individuos y de generaciones, sin embargo, en todos los casos se analiza un solo corte del patrón de radiación  $\phi=0$ . Se utilizará el programa MATLAB para crear el AG considerando algunos criterios para que el algoritmo pueda encontrar la mejor solución evitando la convergencia temprana:

- El número de individuos debe ser el doble que los elementos de antena.
- El número de iteraciones/generaciones debe ser al menos el doble de la población.
- Para generar una radiación Isoflux se necesita de valores de amplitud negativos.
- Deben cumplirse los puntos máximos de la radiación Isoflux lo más cercano posible.

Para iniciar se necesita determinar el tipo de órbita ya que sin ella no se podrá determinar el ancho del Isoflux que se necesitaría. En el Capítulo 2. se nos da a conocer un poco del desarrollo de las comunicaciones satelitales y la importancia que han tenido las distintas órbitas que existen. No obstante, los satélites en órbita de LEO son muy deseados por las nuevas tecnologías tales como la mega constelación de Starlink por lo que mejorar su sistema de radiación lograría un gran cambio no solo en el tamaño del satélite sino también la complejidad de la parte electrónica.

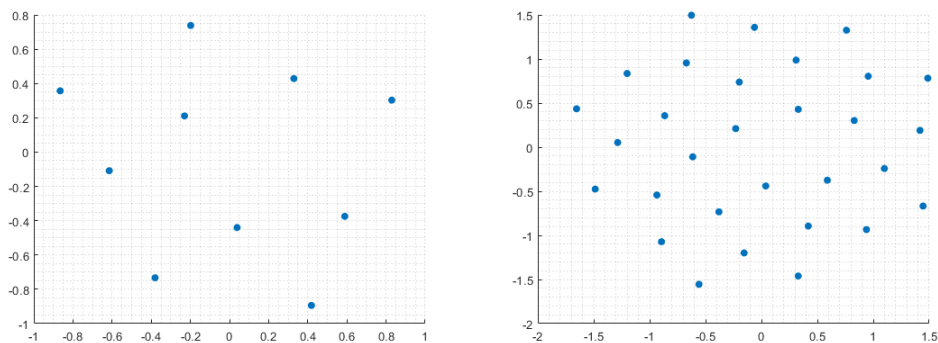
Para fines de esta tesis se decide explorar dentro de las órbitas de LEO tomando como referencia las órbitas con mayor cantidad de satélites en cada capa de la Tabla 2 las cuales son de 1325 km, 550 km y 346 km, y analizar la capacidad del arreglo espiral de crear la radiación Isoflux para cada órbita como se muestra en la Figura 27.



**Figura 27.** Máscara Isoflux para órbitas LEO.

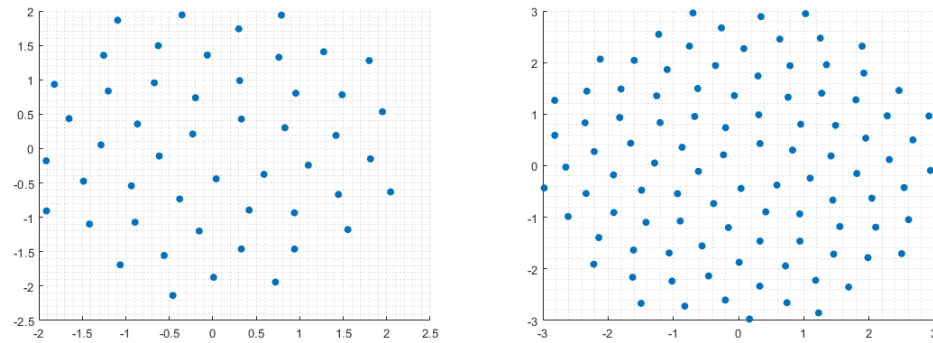
Después se propone diferentes cantidades de elementos de antena para el arreglo, esto con el fin de que nos ayude a identificar cuantos elementos son necesarios para que el arreglo pueda generar la radiación Isoflux deseada dependiendo de su órbita. Las cantidades más utilizadas para todos los casos son las siguientes:  $N=10$ ,  $N=30$ ,  $N=50$  y  $N=100$  con una distancia entre elementos de  $0.5\lambda$  en un arreglo espiral de Fermat con ángulo dorado de  $137.5^\circ$  para la posición de cada elemento.

En algunos casos se pudieron utilizar cantidades intermedias o la máxima de  $N=200$  porque al tener una mayor cantidad de antenas hacen que el ancho de haz sea más directivo. En la Figura 28 y en la Figura 29 se generan diferentes distribuciones del arreglo de antenas tipo espiral utilizando la ecuación (10).



**Figura 28.** Distribución del arreglo de 10 antenas (izquierda) y 30 antenas (derecha).





**Figura 29.** Distribución del arreglo espiral de 50 antenas (izquierda) y 100 antenas (derecha).

Luego de proponer las posibles distribuciones de elementos de antena para el arreglo, sabemos que la función objetivo asigna un valor de aptitud a cada individuo según su capacidad de resolver el problema, en este caso crear una radiación Isoflux es la problemática que se quiere solucionar dado a que no es un comportamiento natural del haz de una antena, se requiere el AG para encontrar el mejor conjunto de amplitudes para cada elemento. Al ser amplitudes aleatorias se propone trabajar con un rango determinado de -20 a 20 para así obtener algunos valores negativos que benefician la formación del Isoflux considerando el ángulo  $\theta$  de  $0$  a  $\pi$ .

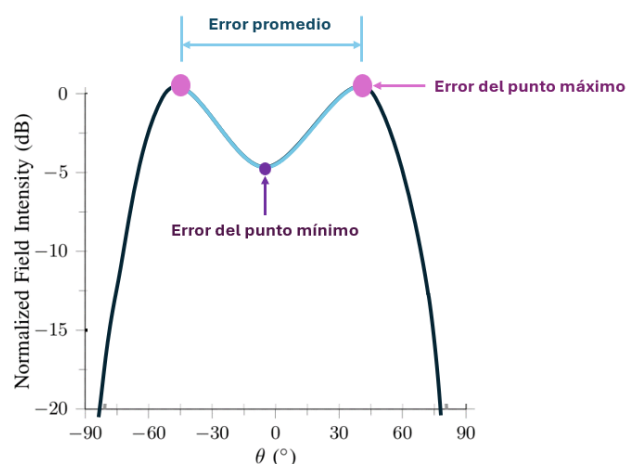
Esta capacidad que tiene el individuo para la resolución del problema se puede obtener con las siguientes métricas: el error en los puntos máximos de la máscara Isoflux, el error promedio, el error del punto intermedio y el error de punto mínimo, estas métricas se representan gráficamente en la Figura 30. Se muestra en la ecuación (15) la función objetivo final.

**Error promedio:** calcula el error del patrón de radiación generado en comparación de la máscara Isoflux generada. Al tener simetría solo es necesario tomar los puntos entre el punto máximo y el punto mínimo de la máscara Isoflux.

**Error punto máximo:** calcula el error que existe entre el patrón de radiación contra los puntos máximos de la máscara Isoflux.

**Error punto mínimo:** calcula el error del punto más bajo de la máscara Isoflux.

$$F.O. = [Error_{promedio} + Error_{puntomáximo} + Error_{puntomínimo}] \quad (15)$$



**Figura 30.** Visualización de los puntos a evaluar para el patrón de radiación generado por cada individuo.

Por último, queda establecer la combinación del número de individuos y el número de generaciones que se quieran tener, por fortuna no hay cierta cantidad que sea la mejor para cada arreglo de antena que utilice este método, solo siguiendo las condiciones antes mencionadas. Si nosotros agregamos un número muy alto de elementos, de individuos y de generaciones va a requerir un mayor tiempo de simulación y eso no es algo deseable ya que al tratarse de valores aleatorios se necesita iniciar varias veces el programa para determinar que los resultados son viables o no, por lo que solo se utilizaría combinaciones grandes solo para comprobar y llevar al máximo el algoritmo genético para alguna órbita que necesite reforzarse. Se estarán utilizando las combinaciones de individuos y generaciones mostradas en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Combinación de individuos y generaciones aplicados al algoritmo.

# Individuos	# generaciones
50	150
100	250
250	550
300	650
300	1000

Estos son los puntos más importantes para comenzar las primeras pruebas de este diseño las cuales se concentraron solo a nivel de factor de arreglo considerando a los elementos isotrópicos ya que teniendo una visualización de cómo se vería el patrón de radiación se puede tener una idea de cómo sería con un elemento propuesto, siendo esto la siguiente parte del diseño la propuesta de 3 elementos de antena distintos. Cabe mencionar, que, como parte de la estrategia de estudio de esta tesis, se realizaron pruebas

de simulación a nivel factor de arreglo considerando la estructura de arreglo de antenas de espiral. El análisis de factor de arreglo ayuda a verificar la viabilidad de la estructura de arreglo de antenas en este tipo de órbitas. Los resultados de esta tesis considerarán la utilización del tipo de elemento de antena, por lo que en la siguiente sección se describen los elementos de antena a utilizar.

#### **4.4 Antenas propuestas**

El diseño de esta tesis considera el tipo de elemento de antena en la simulación para generar la máscara de radiación isoflux, por lo tanto, se tiene el interés de ver que tan viable es este diseño al momento de utilizar patrones de elementos de antena, de esta forma haciendo que los resultados sean más cercanos a lo que sería hacer este arreglo en la realidad. Para ello se utilizará el programa CST Studio Suite el cual es un software de alto rendimiento para diseñar, analizar y optimizar componentes y sistemas electromagnéticos, en este caso los elementos de antena.

A pesar de que las frecuencias de interés actual son de la banda X a la Ka, para comenzar con el diseño se propone trabajar en una banda C con frecuencia de 5.5-6 GHz para ver qué tan viable puede ser el arreglo en esta frecuencia un poco más comercial, sigue siendo una banda que se sigue utilizando por lo que en todos los casos de antena estarán trabajando en esta frecuencia.

Para agregar el patrón de radiación del elemento solo se debe multiplicar por el factor de arreglo como se ve en la ecuación (10), ambos deben tener la misma cantidad de muestras las cuales en este caso se utilizan 360 muestras, lo que facilita la extracción del patrón de radiación del CST y pasarlo al algoritmo de MATLAB.

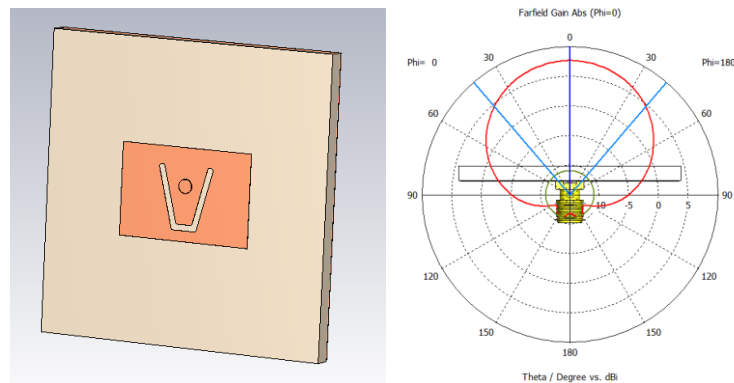
##### **4.4.1 Elemento de antena 1 (EA1)**

El elemento de antena 1 (EA1) es un diseño inspirado en dos artículos:

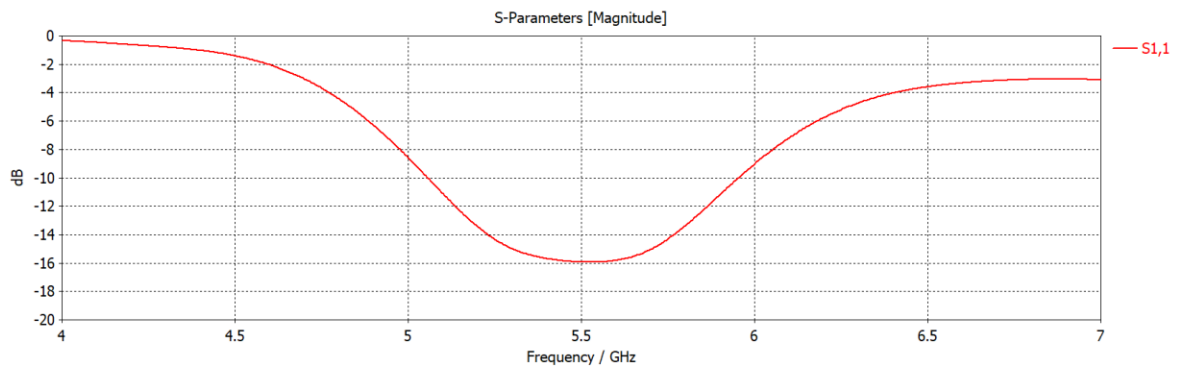
- “Antena de parche con ranura en V de banda ultraancha alimentada por proximidad con sonda-L para la detección temprana del cáncer de mama” (Khan et al., 2015), En donde se busca una alternativa a las mamografías utilizando microondas para detectar el cáncer de mama.

- “Antenas Microstrip con ranura en V para aplicaciones de banda ancha” (Rafi & Shafai, 2017), En donde se busca configuraciones para aplicaciones de banda ancha.

El interés en utilizar esta antena es su simetría en el patrón de radiación en el corte  $\theta=0$  con una frecuencia de 6 GHz, tiene un ancho de banda de un 1GHz lo cual nos da un buen margen y unas dimensiones de 5cm x 5cm. En la Figura 31 se muestra el diseño de la EA1 y su patrón de radiación y en la Figura 32 se ilustra el comportamiento del coeficiente de reflexión. El valor de este coeficiente por debajo de -10 dB nos proporciona el ancho de banda del elemento de antena.



**Figura 31.** Diseño del EA1 y su patrón de radiación.

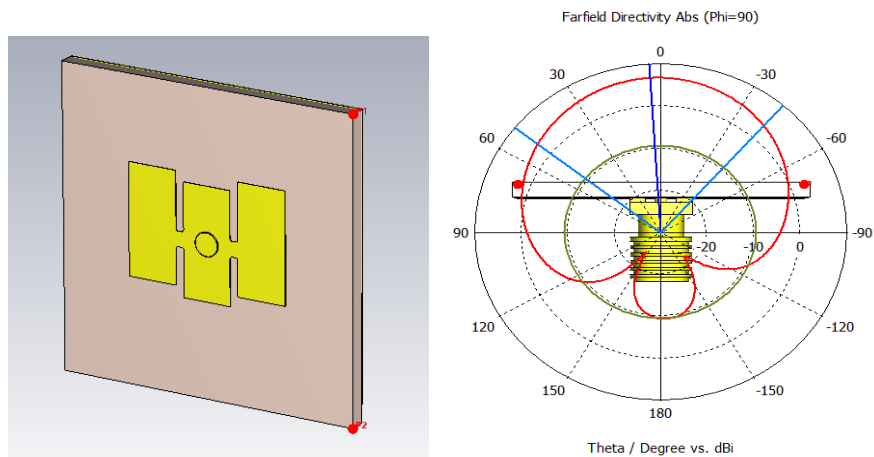


**Figura 32.** Rango de frecuencia de la EA1 de 5 GHz a 6 GHz.

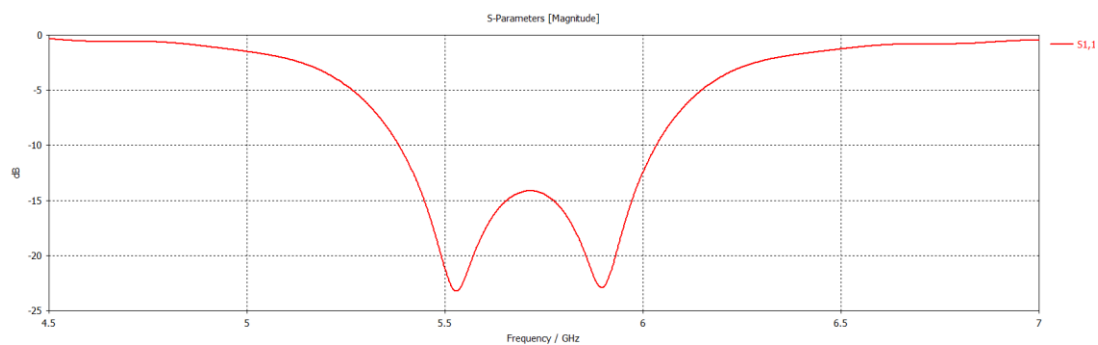
#### 4.4.2 Elemento de antena 2 (EA2)

El elemento de antena 2 (EA2) mostrado en la Figura 33 es un diseño inspirado del artículo “Una simple antena microcinta compacta de banda ancha que consiste en 3 parches escalonados” escrito por Yoo y Son (2020). En el que se busca un diseño de antena de microcinta que logre obtener un ancho de banda amplio. Al estar trabajando con la órbita LEO se necesita de un elemento de antena que su patrón de radiación sea ancho, de preferencia una radiación hemisférica algo que se cumple con la antena en el corte

$\theta=90$  con una frecuencia de 5.5 GHz, tiene un tamaño pequeño de 2cm x 2 cm y además tiene un ancho de banda de 5 GHz a 6 GHz como se ve en la Figura 34.



**Figura 33.** Diseño del EA2 y su patrón de radiación.



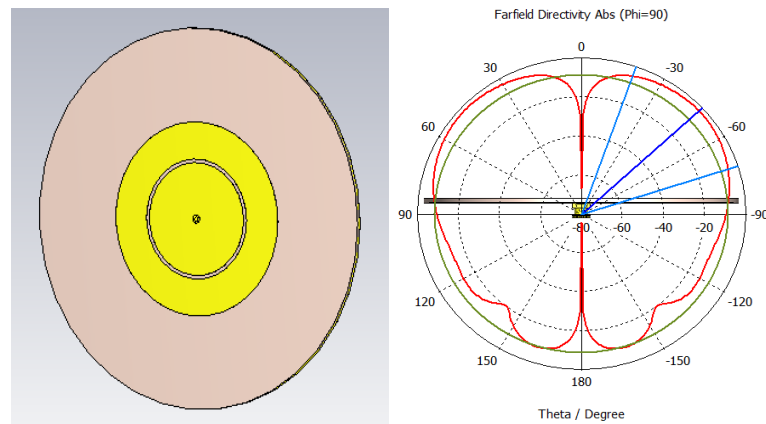
**Figura 34.** Rango de frecuencia de la EA2 de 5.5 GHz a 6 GHz.

#### 4.4.3 Elemento de antena 3 (EA3)

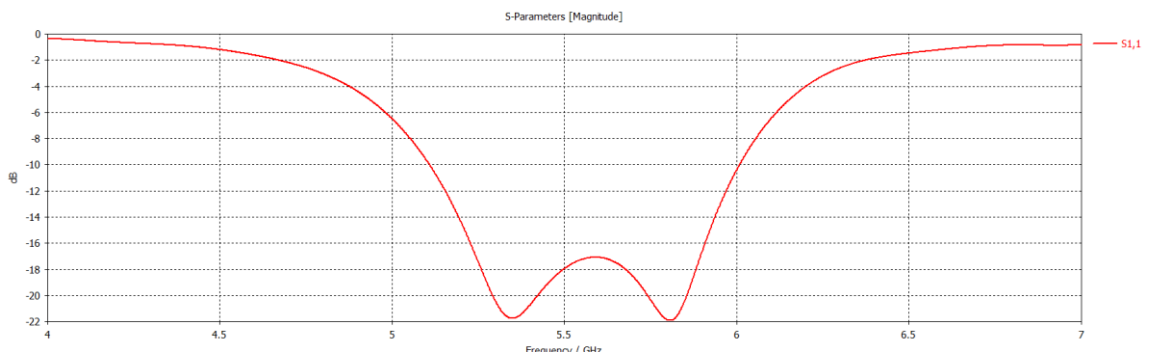
El elemento de antena 3 (EA3) mostrado en la Figura 35 es un diseño inspirado del artículo “Una antena de anillo de conexión circular de alimentación central de banda ancha con un patrón de radiación tipo monopolar” de Al-Zoubi et al. (2009), del cual se experimenta cambiando las variables de radio para ajustar a una frecuencia deseada.

Tiene una radiación tipo hemisférica en el corte  $\theta=90$  con una frecuencia de 5.5 GHz como se aprecia en la Figura 36 **Figura 35**, siendo esto lo que se busca para este trabajo y presenta una forma que puede ser conveniente para la radiación Isoflux. Aunque esta antena tiene una dimensión de 10 cm de diámetro

siendo esto una desventaja en la reducción del tamaño total del arreglo se le hará prueba para determinar si la forma de radiación del elemento pueda darnos alguna ventaja.



**Figura 35.** Diseño del EA3 y su patrón de radiación.



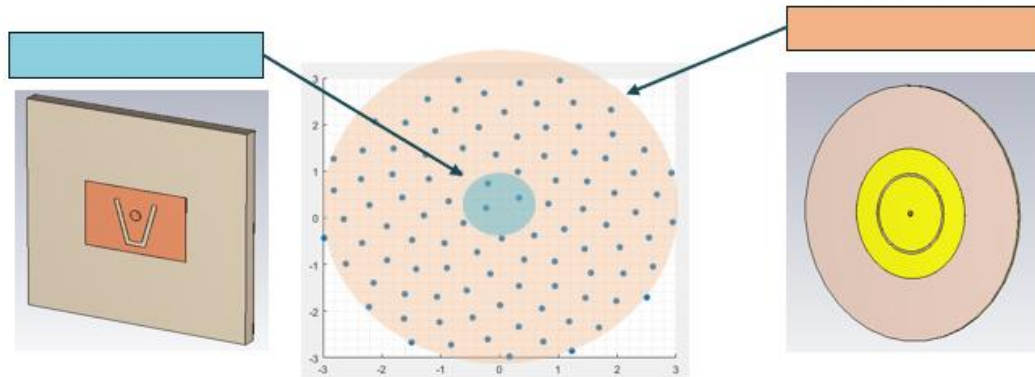
**Figura 36.** Rango de frecuencia de la EA3 de 5.5 GHz a 6 GHz.

#### 4.4.4 Combinación de la antena 1 y antena 3

Se decide proponer un caso de diseño en donde se utilice la combinación de dos antenas esto para ver la posibilidad de como trabajaría el arreglo con dos antenas distintas y en un futuro ver la posibilidad de utilizar más combinaciones. Se decide utilizar la EA1 junto con la EA3, debido a que se necesita una buena simetría en el patrón de radiación del elemento y al mismo tiempo se necesita un elemento que tenga una radiación del tipo hemisférica.

El diseño consiste en colocar 2 antenas EA1 en el centro del arreglo y el resto siendo de EA3 como se muestra en la Figura 37 para así evitar que la depresión que tiene el patrón de radiación de EA3 pueda

aumentarse con el Isoflux. Lo importante es que sea en el centro el cambio ya que es donde el arreglo influye más en la parte central del haz que en este caso será la máscara de Isoflux.



**Figura 37.** Distribución de antenas en combinación de EA1 y EA3.

## 4.5 Conclusiones

En este capítulo se describió el procedimiento a utilizar para nuestro algoritmo genético, ya que estos mismos pueden variarse en la selección de padres o en los operadores que utilizan para generar nuevas generaciones de individuos. Después aplicamos algunas condiciones antes de empezar las simulaciones en MATLAB ya que por cuestiones de tiempo no se podría analizar el comportamiento del arreglo en todas las órbitas en combinación con los otros parámetros tales como: cantidad de elementos, número de iteraciones e individuos. Al ser algo nuevo no se tiene un margen que pueda definir cuáles son las variables correctas para cada caso de diseño.

En el siguiente capítulo se muestran los resultados de diseño de arreglos de antena espiral utilizando un patrón de radiación del elemento con las tres propuestas.

## Capítulo 5. Resultados

---

### 5.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de diseño para una radiación de tipo Isoflux utilizando un arreglo de antenas espiral para órbitas LEO de 346 km, 550 km y 1,325 km, cuyos parámetros del algoritmo genético fueron vistos en el capítulo anterior. Sin embargo, se tiene una gran cantidad de resultados de todas las combinaciones posibles debido a que cada vez que se inicia el programa genera resultados distintos, cada vez ya que ninguna población inicial será igual que la anterior. Por esto se decide seleccionar los mejores resultados para cada órbita con sus correspondientes variables que los hacen ser el mejor.

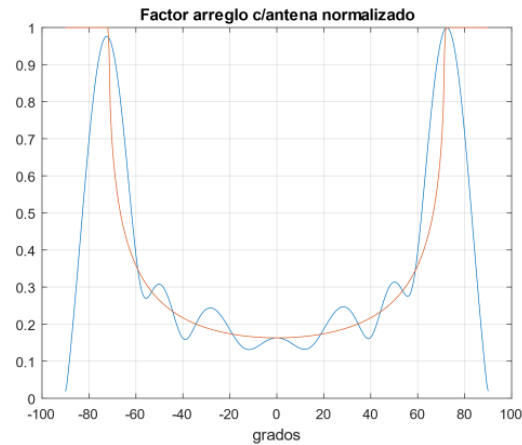
En esta sección se mostrará los mejores resultados en general para cada tipo de antena, acompañados de tablas comparativas y material extra en la sección de anexos para las excitaciones de amplitud obtenidas.

### 5.2 Órbita de 346 km

Los resultados en esta órbita se dividen por las cantidades de elementos de antena utilizados, los cuales para este caso fueron: 10, 30, 50 y 100 elementos. El EA2 para todas las variables es el único elemento de antena que no logra producir los puntos máximos deseados incluso cuando se utilizan cantidades grandes lo cual es algo lamentable ya que en cuanto a la curva de la máscara Isoflux le da buena forma sin tantas oscilaciones. En el caso de EA1 mantiene una buena simetría en el patrón de radiación del arreglo, a pesar de que marca ciertas oscilaciones que en diseños con una mayor cantidad de elementos parecen aumentar su magnitud. Utilizando EA3 es muy notable la similitud con la máscara de Isoflux sin embargo marca una constante depresión en la zona central, esta misma se pudo eliminar utilizando la combinación de EA1 y EA3 la cual en todos los casos da un resultado muy cercano a lo que se desea.

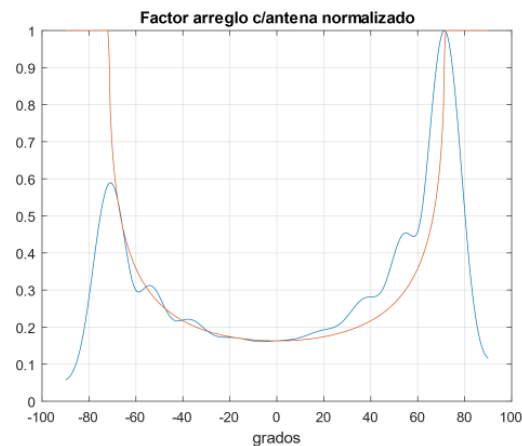
Como se observa en la Figura 38 obtenemos un buen patrón de Isoflux ya que logra cumplir con los puntos máximos y la forma de la máscara Isoflux, aunque cabe destacar la presencia de varias oscilaciones que pueden ser asociadas con la cantidad de elementos de antena que hacen que el arreglo sea más directivo. En este caso su mejor resultado fue obtenido por 50 elementos, población de 250 e iteraciones de 550.





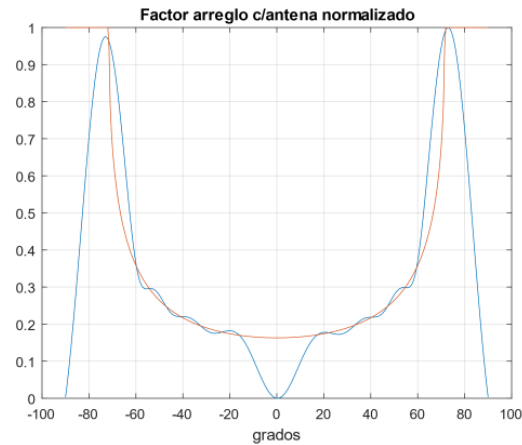
**Figura 38.** Patrón de radiación órbita de 346 km utilizando EA1 con  $N=50$ ,  $i=550$ ,  $P=250$ .

En la Figura 39 se puede observar como de un lado si se cumple un punto máximo del Isoflux mientras que en el otro queda muy por debajo de lo que debería al menos considerarse aceptable, siendo lo visto en las tablas cuando se tiene una cantidad menor de 50 elementos esta forma decae. Aunque no sea muy notorio en el patrón de antena esa pequeña variación asimétrica puede ser la causante de esta desigualdad en los puntos máximos.



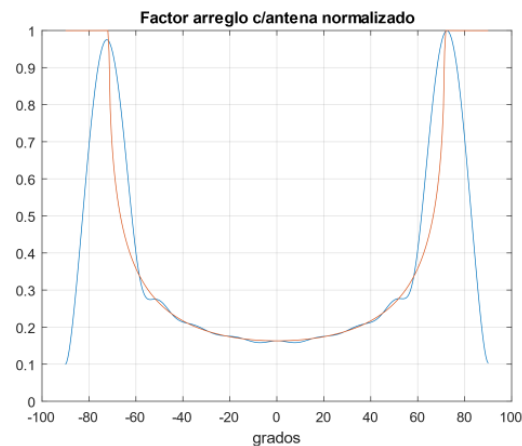
**Figura 39.** Patrón de radiación órbita de 346 km utilizando EA2 con  $N=100$ ,  $i=1000$ ,  $P=200$ .

En la Figura 40 se puede apreciar que se alcanzan los puntos máximos y parte de la máscara Isoflux puede verse casi ideal ya que tiene pocas oscilaciones en la parte curva, sin embargo, lo que se pensaba podría beneficiar en la forma de la máscara Isoflux en realidad hace que se aumente una depresión en la parte central, para ser un arreglo hecho por 30 elementos de antena es una cantidad razonable, se puede corregir el comportamiento de la parte central proponiendo utilizar una combinación de antenas.



**Figura 40.** Patrón de radiación órbita de 346 km utilizando EA3 con  $N=30$ ,  $i=1000$ ,  $P=300$ .

En la Figura 41 se muestra el patrón de radiación de la combinación de 2 antenas de EA1 y el resto siendo de EA3, se cumple con los puntos máximos y la máscara Isoflux. En comparación de los otros resultados este es el que más se acerca a lo que se desea y con una cantidad de antenas relativamente buena, aun así, este es solo el mejor resultado en general, pero en la Tabla 4 se puede apreciar que con solo 10 elementos de antenas se puede lograr un buen resultado.



**Figura 41.** Patrón de radiación órbita de 346 km utilizando EA1 y EA3 con  $N=30$ ,  $i=1000$ ,  $P=300$ .

En la sección de Anexo se encuentra la Tabla 14, la Tabla 15, la Tabla 16 y la Tabla 17 en las cuales están los valores de las excitaciones de amplitud utilizadas para cada uno de los resultados en esta órbita, categorizadas por cantidad de elementos de antena y diferenciadas por cada tipo de antena utilizado. A continuación, se muestran tablas comparativas de los mejores resultados para cada cantidad de antenas en una órbita de 346 km.

**Tabla 4.** Mejores resultados con 10 elementos para la órbita 346 km.

10 elementos de antena			
Antena utilizada	número de población	número de iteraciones	Patrón del arreglo c/antena
EA1	500	1000	
EA2	500	1000	
EA3	300	1000	
EA1 y EA3	500	1000	

**Tabla 5.** Mejores resultados con 30 elementos para la órbita 346 km.

30 elementos de antena			
Antena utilizada	número de población	número de iteraciones	Patrón del arreglo c/antena
EA1	300	1000	
EA2	300	1000	
EA3	300	1000	
EA1 y EA3	300	1000	

Tabla 6. Mejores resultados con 50 elementos para la órbita 346 km

50 elementos de antena			
Antena utilizada	número de población	número de iteraciones	Patrón del arreglo c/antena
EA1	250	550	
EA2	250	550	
EA3	250	550	
EA1 y EA3	250	550	

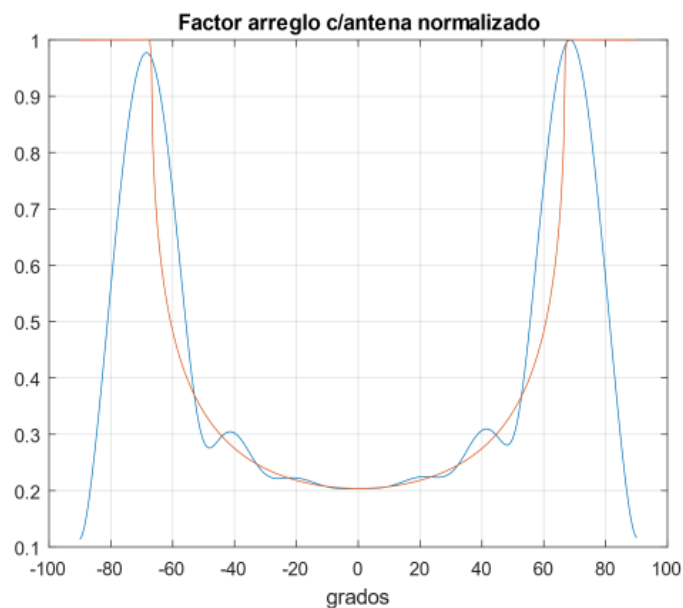
**Tabla 7.** Mejores resultados con 100 elementos para la órbita 346 km.

100 elementos de antena			
Antena utilizada	número de población	número de iteraciones	Patrón del arreglo c/antena
EA1	200	600	
EA2	200	1000	
EA3	250	550	
EA1 y EA3	200	1000	

### 5.3 Órbita de 550 km

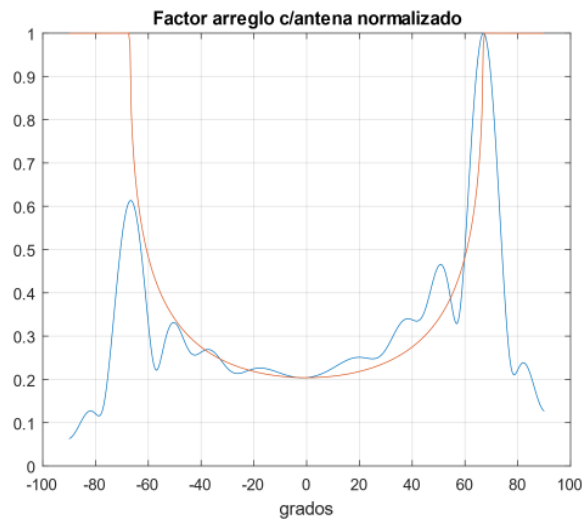
Los resultados en esta órbita se dividen por las cantidades de elementos de antena utilizados, los cuales para este caso fueron: 30, 50 y 100 elementos. En este caso, no se utilizó la cantidad de 10 elementos ya que se buscaba que los resultados fueran más directivos en comparación de la Tabla 4 que a pesar de que fueran buenos resultados algunas antenas no mostraban una buena curva como sería el caso de EA1 y EA2. Al igual que la sección anterior se cuenta con la Tabla 8, la Tabla 9 y la Tabla 10 con los mejores resultados para cada categoría de antenas.

En la Figura 42 se ilustra el mejor resultado para EA1 utilizando 30 elementos, 300 individuos y 1,000 iteraciones, se logra apreciar una buena simetría y forma de la máscara Isoflux, comparado a resultados anteriores la antena EA1 se comporta mejor en la órbita 550 km.



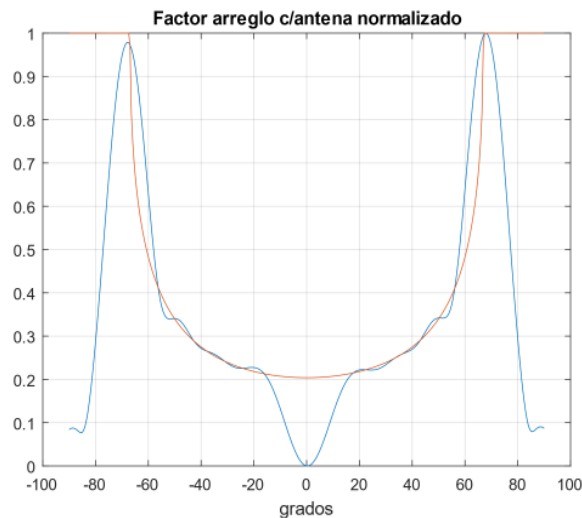
**Figura 42.** Patrón de radiación órbita de 550 km utilizando EA1 con N=30, i=1000, P=300.

Para la Figura 43 el mejor resultado en este caso fue el utilizar 100 elementos de antena con una población de 200 y 1000 iteraciones, para esta antena no eran suficientes los 30 elementos del arreglo por esto mismo en las siguientes tablas de resultados no se considera porque en realidad no tiene una mejora considerable, muy apenas con 100 elementos puede elevarse el máximo del lado izquierdo, sin embargo, se busca que los resultados sean buenos con una menor cantidad.



**Figura 43.** Patrón de radiación órbita de 550 km utilizando EA2 con  $N=100$ ,  $i=1000$ ,  $P=200$ .

Para el elemento de antena EA3 su mejor resultado es el de la Figura 44 con 50 elementos de antena, por la cercanía de la curva de la máscara Isoflux, pero también lo logra solo con 30 antenas quiere decir que esta configuración puede lograrlo en cantidades menores incluso, su único punto malo es la parte central hace que el patrón de radiación tenga una depresión en esa zona lo cual no es deseado.

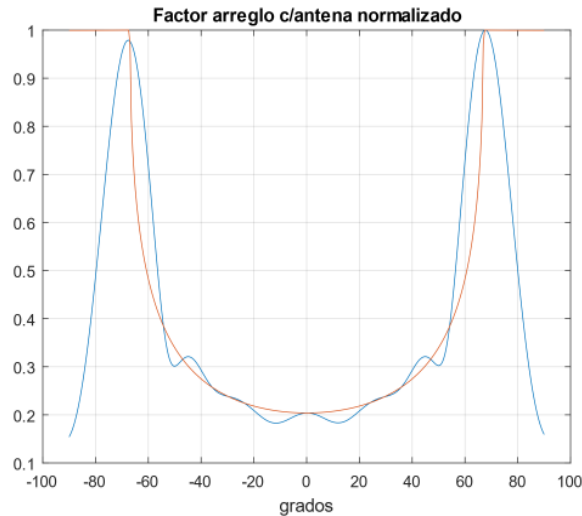


**Figura 44.** Patrón de radiación órbita de 550 km utilizando EA3 con  $N=50$ ,  $i=1000$ ,  $P=300$ .

El resultado de la combinación de EA1 y EA3 logra un buen patrón de radiación con solo 30 elementos de antena como se ve en la Figura 45. A pesar de tener algo de oscilación en la máscara Isoflux no es tanto comparado a las otras configuraciones, incluso un resultado con 50 elementos de antena produce un



resultado casi idéntico a lo que se busca en la máscara Isoflux, lo cual es muy sorprendente lo que dos antenas del centro del arreglo pueden hacer cambiar los resultados de un patrón de arreglo con un solo tipo.



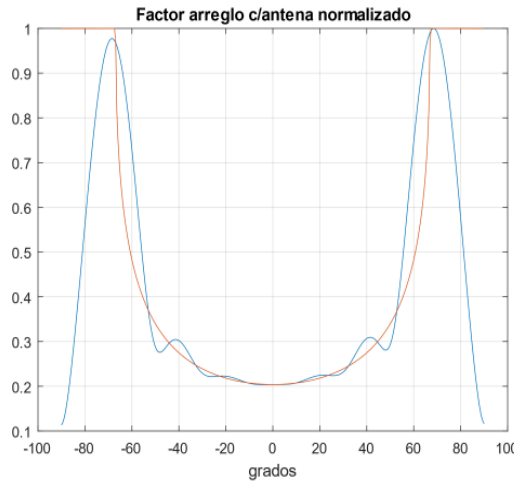
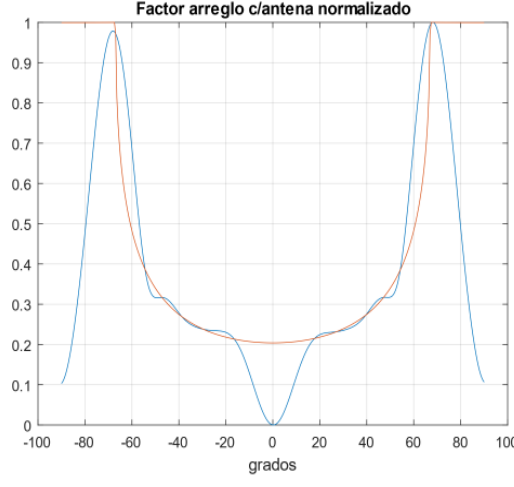
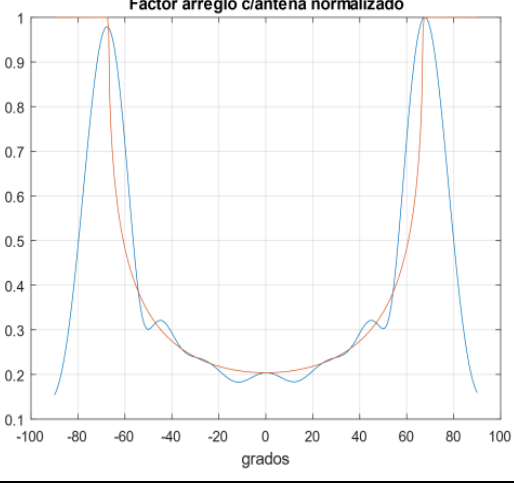
**Figura 45.** Patrón de radiación órbita de 550 km utilizando EA1 y EA3 con  $N=30$ ,  $i=1000$ ,  $P=300$ .

En la sección de Anexo se encuentra la Tabla 18, la Tabla 19 y la Tabla 20, en las cuales están los valores de las excitaciones de amplitud utilizadas para cada uno de los resultados en esta órbita, categorizadas por cantidad de elementos de antena y diferenciadas por cada tipo de antena utilizado.

A continuación, se muestran las tablas comparativas de los mejores resultados, en el caso de 30 antenas para la antena A2 no se muestra un resultado ya que esta antena solo puede mostrar un poco de mejoría a partir de 50 elementos de otra forma su punto máximo izquierdo no logra tener casi nivel siendo que aún con una mayor cantidad no alcanza a ser aceptable.

EA1 se desempeña muy bien en los diferentes casos, aunque puede mostrar una mayor cantidad de oscilaciones más si utiliza cantidades grandes de elementos. La combinación de antenas favorece al arreglo de A3, ya que puede notarse que logra tener cierta similitud a la máscara Isoflux deseada a excepción de la parte central, el combinarla con la A2 genera una buena simetría y compensa la depresión que se tenía en el patrón del arreglo en cada caso.

**Tabla 8.** Mejores resultados con 30 elementos para la órbita 550 km.

30 elementos de antena			
Antena utilizada	número de población	número de iteraciones	Patrón del arreglo c/antena
EA1	300	1000	
EA3	300	1000	
EA1 y EA3	300	1000	

**Tabla 9.** Mejores resultados con 50 elementos para la órbita 550 km

50 elementos de antena			
Antena utilizada	número de población	número de iteraciones	Patrón del arreglo c/antena
EA1	300	1000	
EA2	300	1000	
EA3	300	1000	
EA1 y EA3	300	1000	

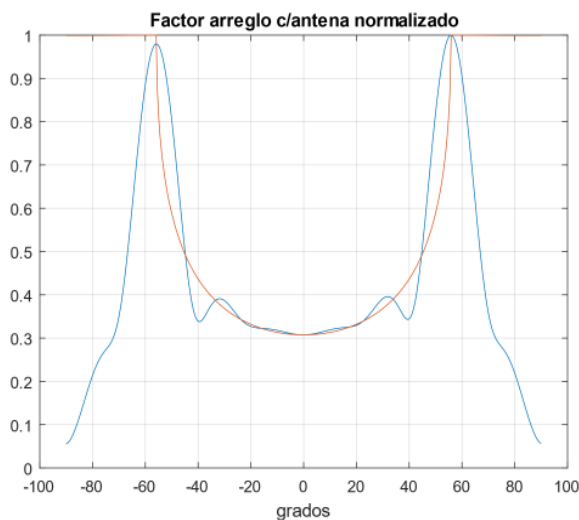
Tabla 10. Mejores resultados con 100 elementos para la órbita 550 km

100 elementos de antena			
Antena utilizada	número de población	número de iteraciones	Patrón del arreglo c/antena
EA1	200	1000	
EA2	200	1000	
EA3	200	600	
EA1 y EA3	200	1000	

## 5.4 Órbita de 1,325 km

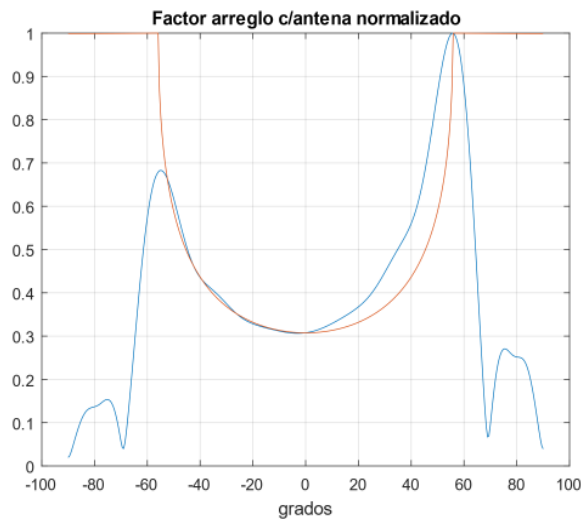
Los resultados en esta órbita se dividen por las cantidades de elementos de antena utilizados, los cuales para este caso fueron: 30, 50 y 100 elementos. Este es el caso con una altitud mayor en comparación a las otras por lo que puede surgir la aparición de lóbulos laterales, sin embargo, gracias a la configuración del arreglo espiral estos no llegan a tener el mismo nivel que el haz principal que en este caso son los puntos máximos de la máscara Isoflux. Se cuenta con la Tabla 11, la Tabla 12 y la Tabla 13 con los mejores resultados para cada categoría de antenas.

En la Figura 46 se muestra el mejor resultado obtenido por la EA1 en esta órbita con una cantidad de 50 elementos de antena, 1000 iteraciones y 300 de población, como en otros resultados se muestra una buena simetría y respeta los puntos máximos de la máscara Isoflux. Comparado en otras órbitas los resultados de este elemento de antena muestran un mejor comportamiento en esta última sin tantas oscilaciones.



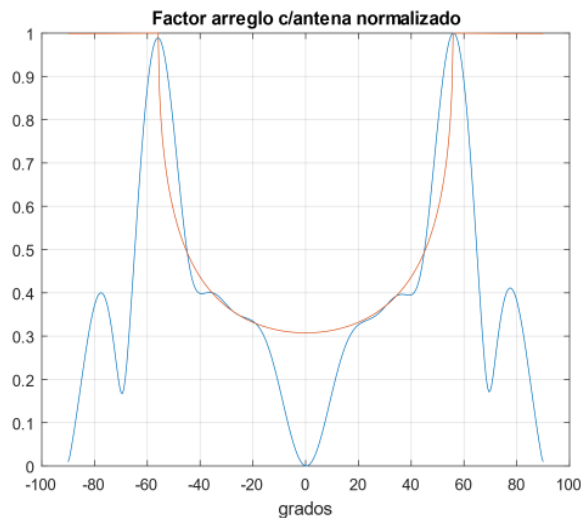
**Figura 46.** Patrón de radiación órbita de 1,325 km utilizando EA1 con  $N=50$ ,  $i=1000$ ,  $P=300$ .

En la Figura 47 se muestra el resultado de EA2, igual que en los resultados anteriores para este mismo elemento su pequeña variación asimétrica se refleja en el patrón final del arreglo, lo cual no lo hace óptimo ya que también en esta órbita necesita de grandes cantidades para que pueda subir un poco el punto máximo. También presenta un nivel de lóbulos laterales muy bajo, a pesar de que su patrón de la máscara Isoflux no es el indicado, se puede confirmar que el arreglo espiral logra mantener de manera natural estos niveles bajos sin la necesidad de utilizar otros métodos como los filtros para reducirlos.



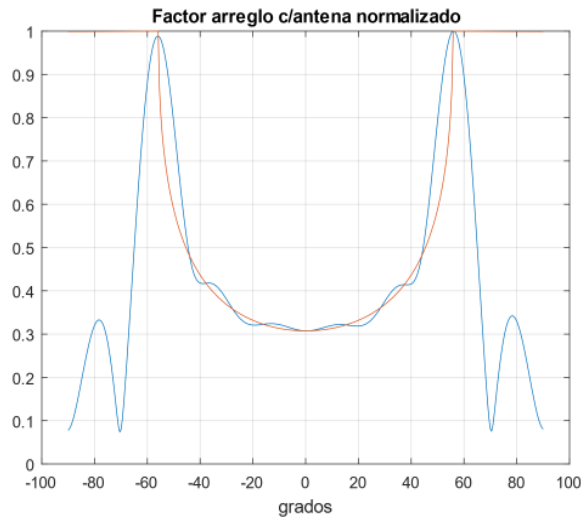
**Figura 47.** Patrón de radiación órbita de 1,325 km utilizando EA2 con  $N=100$ ,  $i=1000$ ,  $P=500$ .

En el caso de EA3 de la Figura 48 sigue teniendo un comportamiento similar en los casos anteriores, es el que mejor logra la curva de la máscara Isoflux con pocas antenas en este caso 30 elementos. Sin embargo, al ser una órbita con mayor altitud puede influenciar más en la depresión que ya se notaba en la zona central y la pequeña aparición de lóbulos laterales.



**Figura 48.** Patrón de radiación órbita de 1,325 km utilizando EA3 con  $N=30$ ,  $i=1000$ ,  $P=300$ .

Por último, en la Figura 49 se muestra el resultado de EA1 y EA3 a pesar de ser una órbita con mayor altitud este diseño de arreglo espiral cumple muy bien en todas las órbitas hasta se puede decir que trabaja muy bien con solo 30 elementos, ya que si utilizamos cantidades más grandes de 100 elementos la aparición de lóbulos laterales es mayor aun así se mantienen en un nivel más bajo que el haz principal.



**Figura 49.** Patrón de radiación órbita de 1,325 km utilizando EA1 y EA3 con N=30, i=1000, P=300.

En la sección de Anexo se encuentra la Tabla 21, la Tabla 22 y la Tabla 23 en las cuales están los valores de las excitaciones de amplitud utilizadas para cada uno de los resultados en esta órbita, categorizadas por cantidad de elementos de antena y diferenciadas por cada tipo de antena utilizado.

Los resultados para esta órbita son similares a las anteriores con la diferencia de que empieza a aparecer los lóbulos laterales antes mencionados, gracias a la geometría del arreglo espiral estos no llegan a exceder el haz principal lo cual es algo muy bueno para no tener algún otro método de reducción de los mismos, es decir, el comportamiento natural del arreglo espiral muestra resultados muy aceptables para estas condiciones que podrían mejorarse si se le agrega otra técnica que pueda ayudar ya sea disminuir las oscilaciones en la máscara Isoflux y la reducción de Lóbulos laterales.

Se puede destacar que en cada órbita los mejores resultados eran de la combinación de elementos de antena EA1 y EA3 con diferentes cantidades de elementos, sin embargo, se puede decir que para esta órbita de 1,325 km al estar más alejada se necesita un menor ángulo de apertura de la máscara Isoflux, ocasionando un haz algo directivo en comparación de otras altitudes, al utilizar una cantidad grande de elementos de antena es más fácil que aparezcan lóbulos laterales haciendo que sea mejor utilizar una menor cantidad.

Al tener una menor cantidad de elementos es más sencillo realizar conexiones y posibles sub-arreglos, algo que la combinación de elementos EA1 y EA3 destaca por producir un patrón del arreglo en cantidades menores.

**Tabla 11.** Mejores resultados con 30 elementos para la órbita 1,325 km.

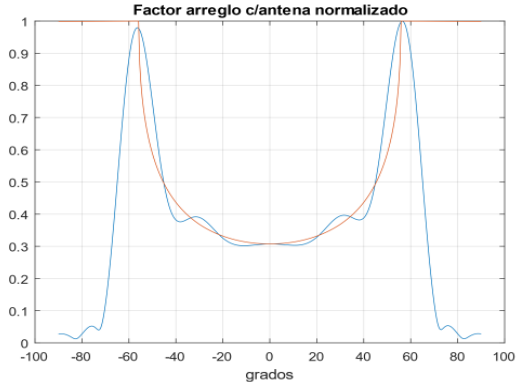
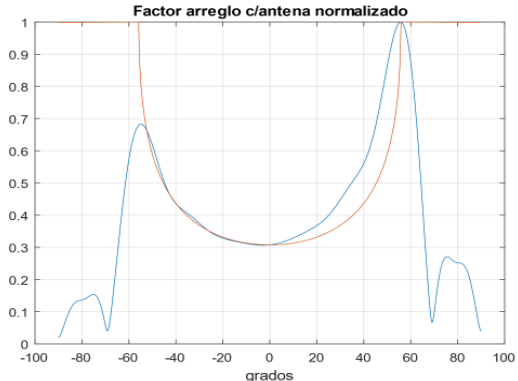
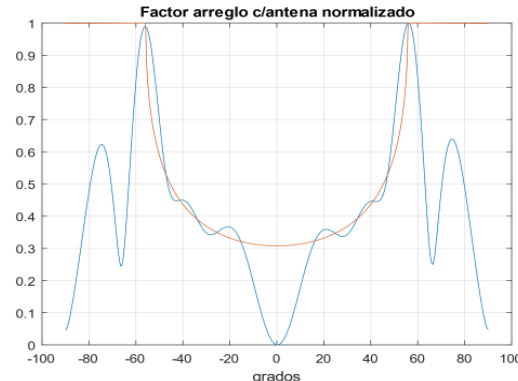
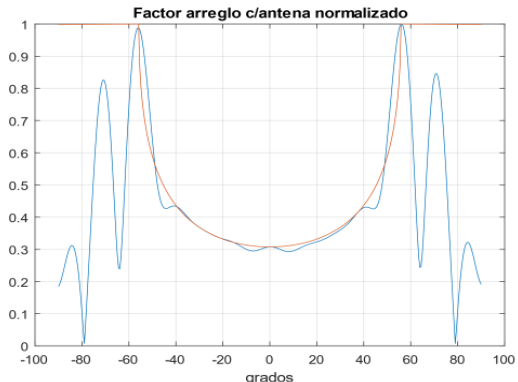
30 elementos de antena			
Antena utilizada	número de población	número de iteraciones	Patrón del arreglo c/antena
EA1	300	1000	
EA3	300	1000	
EA1 y EA3	300	1000	



Tabla 12. Mejores resultados con 50 elementos para la órbita 1,325 km

50 elementos de antena			
Antena utilizada	número de población	número de iteraciones	Patrón del arreglo c/antena
EA1	300	1000	
EA2	300	1000	
EA3	300	1000	
EA1 y EA3	300	1000	

Tabla 13. Mejores resultados con 100 elementos para la órbita 1,325 km

100 elementos de antena			
Antena utilizada	número de población	número de iteraciones	Patrón del arreglo c/antena
EA1	500	1000	
EA2	500	1000	
EA3	200	600	
EA1 y EA3	200	1000	

## 5.5 Conclusiones

Los elementos de antena que obtuvieron buenos resultados en las diferentes órbitas y distribución del arreglo son AE1 y la combinación de AE1 con AE3. Ya que el utilizar EA2 genera una variación en la simetría del patrón de radiación del arreglo para cada cantidad de elementos utilizada, debido a esto se determina que este elemento no es apto para ser utilizado en una radiación Isoflux.

El elemento EA3 sorpresivamente cumple con la curva de la máscara Isoflux, su patrón de radiación hemisférica con una depresión en el centro se creía esto podía beneficiar en la formación del Isoflux, sin embargo, en los resultados obtenidos no fue así incluso a mayor órbita se aumentaba. A pesar de eso la curva de Isoflux parecía estar muy cerca a lo que se deseaba, por lo que proponer cambiar en la zona central por dos antenas AE1 podría solucionarlo. El arreglo tiene una mayor concentración en la parte del centro de la espiral por lo que este cambio ayudó a contrarrestar esa depresión en el patrón de arreglo. Los mejores resultados fueron obtenidos por dicha combinación para todos los casos de elementos en todas las órbitas.

En la siguiente sección se tendrán las conclusiones de esta tesis y sus recomendaciones a trabajo futuro.

## Capítulo 6. Conclusiones

---

### 6.1 Conclusiones generales de la tesis

En esta tesis se presenta un nuevo diseño de arreglos de antena con aplicación en satélites con una radiación de tipo Isoflux para las órbitas: 346 km, 550 km, 1325 km. Para lograrlo se decide aprovechar las ventajas que una geometría espiral de Fermat ofrece siendo estas las más destacables: bajos niveles de lóbulos laterales, respeta una distancia uniforme en un arreglo aperiódico.

Se decide solo optimizar las excitaciones de amplitud para cada elemento de antena en un rango de valores entre -20 a 20, esto con el fin de asegurar valores negativos que puedan crear la máscara Isoflux. En todos los casos se optimizó un solo corte del patrón de radiación siendo este  $\phi=0$ , esto para facilitar la comparación entre los resultados, además de que aumentaría el tiempo de simulación necesario para cumplir con un solo corte.

Se utilizó el método de optimización algoritmos genéticos (AG) para encontrar los mejores valores de excitaciones de amplitud para cada arreglo. Los parámetros del algoritmo podían ser variables en cuanto cual fue el mejor resultado de cada órbita siempre y cuando cumplieran con los siguientes puntos:

- El número de población debe ser el doble del número de elementos.
- El número de iteraciones/generaciones debe ser al menos el doble de la población.

Siendo esto con el fin de lograr mejorar los resultados conforme las iteraciones del programa se definían, en algunos casos se puede tener cantidades menores ya que en algunos casos se podía interpretar el comportamiento que tendría el arreglo incluso si se aumentaba la cantidad. En algunos casos necesitaron cantidades de 100 elementos, 500 de población y 1000 iteraciones para intentar generar la máscara de Isoflux como lo sería para el elemento EA2 y el elemento EA3 que son los que presentan cierta deformación, sin embargo, estas cantidades consumían tiempo de simulación bastante largo.

Los resultados obtenidos en este estudio revelan que la geometría espiral inspirada en la espiral de Fermat es capaz de generar una radiación Isoflux de manera satisfactoria, en algunos casos hasta sorprendente. En el Capítulo 3. se incluye el marco teórico de los arreglos de antenas, algunas de las geometrías más

utilizadas como el arreglo lineal o el arreglo planar han sido utilizadas en la generación de radiación Isoflux para distintas órbitas, el mayor reto se encontraba en la órbita LEO, ya que la máscara Isoflux debía extenderse más de 70 grados. Siendo esto un reto debido a que es difícil tener una apertura de haz muy ancho lo cual en el arreglo espiral fue posible.

Se llega a la conclusión de que el arreglo espiral permite crear una máscara Isoflux muy ancha, ya que para la órbita de 1,325 km puede llegar a extenderse ligeramente los puntos máximos, si bien se encuentra dentro del margen aceptable puede significar que para órbitas mayores requiera de un filtro que ayude a ajustar este resultado.

La combinación de elementos de antena EA1 con EA3 es el resultado más destacable en comparación de los demás elementos por si solos, ya que es el que mejor cumple la radiación Isoflux, cumpliendo los puntos máximos y la forma de la máscara Isoflux con una cantidad de elementos de antena aceptables, incluso es un arreglo que puede reducir esa cantidad y mostrar un buen resultado. Sin embargo, el tamaño del elemento de EA3 es muy grande en comparación de los otros elementos haciendo que el arreglo sea probablemente grande haciendo que no sea un elemento viable para la reducción de dimensiones del sistema de radiación. Esto puede mejorarse buscando un elemento de antena que tenga un patrón de radiación hemisférico o incluso aumentando la frecuencia de trabajo del arreglo puede ayudar a reducir el tamaño del elemento EA3.

## **6.2 Contribuciones de la tesis**

Las principales contribuciones de la tesis son las siguientes:

- Se presenta un nuevo diseño de arreglo de antenas tipo espiral para aplicaciones satelitales con radiación de tipo Isoflux.
- Se presenta el análisis de los resultados obtenidos con un arreglo de geometría espiral de Fermat que puede ser consultado para la exploración de este tipo de geometría en el diseño de arreglos de antena con radiación Isoflux en órbita LEO.
- Se implementa la técnica de optimización de algoritmos genéticos para optimizar los valores de amplitud para satélites en órbitas LEO.

### 6.3 Trabajo a futuro

A continuación, se presentan algunas propuestas de trabajos futuros basados en la problemática abordada en esta tesis:

- Optimizar en otros cortes en el plano azimutal en el diseño de arreglos de antenas de tipo espiral con radiación Isoflux para satélites en órbita LEO.
- Implementar el uso de sub-arreglos en el diseño de arreglos de antenas tipo espiral con radiación Isoflux para órbita LEO.
- Implementar el diseño de arreglos de antena tipo espiral de Fermat para órbitas MEO y GEO.
- Optimizar excitaciones de fase y la distancia entre elementos en el diseño de arreglos tipo espiral con radiación Isoflux.
- Implementar nuevos elementos de antena con radiación hemisférica con una frecuencia de trabajo en bandas Ka y Ku para un arreglo de antenas espiral con radiación Isoflux.
- Investigar la viabilidad de utilizar variaciones de espirales en el diseño de arreglo espiral con radiación Isoflux.

## Literatura citada

- Alcívar M., E., Cabay Macías, M., Falconi Verdesoto, K., & Gómez Alejandro, D. (1996). *Sistema de comunicación satelital* [Tesis de Licenciatura, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/61162>
- Al-Zoubi, A., Yang, F., & Kishk, A. (2009). A broadband center-fed circular patch-ring antenna with a monopole like radiation pattern. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57(3), 789–792. <https://doi.org/10.1109/TAP.2008.2011406>
- Baker, J. E. (1985). Adaptive selection methos for genetic algorithms. *Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and their Applications*, 101–111. <https://doi.org/10.4324/9781315799674>
- Balanis, C. A. (2005). *Antenna Theory* (3.<sup>a</sup>). John Wiley & Sons, Inc.
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory* (4.<sup>a</sup>). John Wiley & Sons, Inc.
- Cakaj, S. (2009). Practical horizon plane and communication duration for Low Earth Orbiting (LEO) satellite ground stations. *WSEAS Transactions on Communications*, 8(4), 373–383. <https://www.researchgate.net/publication/229022121>
- Cakaj, S. (2021). The Parameters Comparison of the “Starlink” LEO Satellites Constellation for Different Orbital Shells. *Frontiers in Communications and Networks*, 2. <https://doi.org/10.3389/frcmn.2021.643095>
- Calvillo, G. (2022). *Diseño de redes de conformación de haz utilizando estructuras periódicas de radiación coherente* [Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional: <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3768>
- Cardama Aznar, A., Roca Jofre, L., Romeu Robert, J., Blanch Boris, S., & Bataller, M. F. (2002). *Antenas* (2.<sup>a</sup> ed). Edicions UPC.
- Chen, Q., Giambene, G., Yang, L., Fan, C., & Chen, X. (2021). Analysis of Inter-Satellite Link Paths for LEO Mega-Constellation Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(3), 2743–2755. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3058126>
- Clarke, A. C. (1945). Extra-Terrestrial Relays Can Rocket Stations Give World-wide Radio Coverage? *Wireless World*, 305–308.
- Coello, C. A. (2001, mayo). *Introducción a la Computación Evolutiva*. <https://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/compevol/apuntes.pdf>
- Díaz de la Paz, P. (2023). *Arreglos de antenas para radiación tipo Isoflux en satélites LEO con diferentes alturas orbitales* [Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional: <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3979>
- Elbert, B. R. (2008). *Introduction to Satellite Communication* (3a ed.). Artech House.

- 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. *ACES JOURNAL*, 34(11), 1694–1703.
- Encino, K. E. (2020). *Diseño de arreglos de antenas basados en configuraciones tipo espiral* [Tesis de Maestría en Ciencias]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional: <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3271>
- Encino, K., Panduro, M. A., Reyna, A., & Covarrubias, D. H. (2022). Novel Design Techniques for the Fermat Spiral in Antenna Arrays, for Maximum SLL Reduction. *Micromachines*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/mi13112000>
- Fernández, R. R. (2022). *Diseño de sistemas de radiación tipo Isoflux para aplicaciones satelitales* [Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional: <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3711>
- Gabrielli, L. H., & Hernández-Figueroa, H. E. (2016). Aperiodic antenna array for secondary lobe suppression. *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(2), 209–212. <https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2492419>
- Gentile, S., & Abdulla, M. (2022, diciembre). *Starlink Overview*. [http://www.stavrogentile.com/ELEE36312D\\_Starlink\\_StavroGentile\\_991516120.pdf?i=1](http://www.stavrogentile.com/ELEE36312D_Starlink_StavroGentile_991516120.pdf?i=1)
- He, Y., & Wang, C. (2023). Optimization Design for Sparse Planar Array in Satellite Communications. *Electronics (Switzerland)*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/electronics12081763>
- Ibarra, M., Andrade, A. G., Panduro, M. A., & Mendez, A. L. (2014, diciembre 5). Design of Antenna Arrays for Isoflux Radiation in Satellite Systems. *2014 IEEE 33rd International Performance Computing and Communications Conference (IPCCC)*.
- 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>
- Jafargholi, A., & Kamyab, M. (2010). Pattern Optimization in an UWB Spiral Array Antenna. *Progress In Electromagnetics Research M*, 11, 137–151. <https://doi.org/doi:10.2528/PIERM10010302>
- Johnson, N. L. (2010, enero 1). MEDIUM EARTH ORBITS: IS THERE A NEED FOR A THIRD PROTECTED REGION? *61st International Astronautical Congress*.
- Keijsers, J. G. M. (2016). *Density Tapering for Sparse Planar Spiral Antenna Arrays* [Tesis de maestría, Delft University of Technology]. <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:d059fea6-2861-49b4-ae36-5d31db109231>
- Khan, M., Ketharnath, D., Dandu, V. K., & Chatterjee, D. (2015, octubre 26). UWB L-Probe Proximity Fed V-Slot Patch Antenna for Early Detection of Breast Cancer. *2015 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. <https://doi.org/10.1109/APS.2015.7305330>



- Kim, Y., & Jaggard, D. L. (1986). The fractal Random Array. *Proceedings of the IEEE*, 74(9), 1278–1280. <https://doi.org/10.1109/PROC.1986.13617>
- Koskinen, H. E. J., & Kilpua, E. K. J. (2021). *Physics of Earth's Radiation Belts*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82167-8>
- Li, M. J., Li, M., Liu, Y. F., Geng, X. Y., & Li, Y. Y. (2022). A Review on the Development of Spaceborne Membrane Antennas. *Space: Science and Technology*, 2022. <https://doi.org/10.34133/2022/9803603>
- Martínez-Graullera, O., Martín, C. J., Godoy, G., & Ullate, L. G. (2010). 2D array design based on Fermat spiral for ultrasound imaging. *Ultrasonics*, 50(2), 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2009.09.010>
- McDowell, J. C. (2020). The Low Earth Orbit Satellite Population and Impacts of the SpaceX Starlink Constellation. *The Astrophysical Journal Letters*, 892(2). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8016>
- Montenbruck, O., & Gill, E. (2001). *Satellite Orbits: Models, Methods and Applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-58351-3>
- Nakano, H., Shinma, Y., Mimaki, H., Yamauchi, J., & Hirose, K. (1996, agosto 6). Fan beam formation using spiral array antennas. *IEEE Antennas and Propagation society International Symposium*. <https://doi.org/10.1109/APS.1996.549912>
- Office of Science and Technology Policy. (1995). *Interagency Report on Orbital Debris*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20000011871>
- Piñero, P. Y., Arco, L., García, M. M., & Acevedo, L. (2003). Algoritmos genéticos en la construcción de funciones de pertenencia borrosas. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*. No, 7(18), 25–35. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92501803>
- Rafi, G. Z., & Shafai, L. (2017). V-Slot Microstrip Antennas for Wideband Applications. *2002 9th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, 1–4. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7864681>
- Reyna, A., Panduro, M. A., & del Rio, C. (2011). Design of concentric ring antenna arrays for isoflux radiation in GEO satellites. *IEICE Electronics Express*, 8(7), 484–490. <https://doi.org/10.1587/elex.8.484>
- 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>
- Reyna, A., Panduro, M. A., del Rio-Bocio, C., & Méndez, A. L. (2017). Design of different planar geometries of antenna arrays for isoflux radiation in GEO satellites. *Telecommunication Systems*, 65(2), 269–279. <https://doi.org/10.1007/s11235-016-0227-6>
- Rozenvasser, D., & Shulakova, K. (2023). Estimation of the Starlink Global Satellite System Capacity. *Proceedings of the 12th International Conference on Applied Innovations in IT*, 11(1), 55–59. <https://doi.org/10.25673/101912>

- Silvério, H., Rodrigues, L., & Arns, M. (2013). Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional. En *Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional*. Omnipax. <https://doi.org/10.7436/2013.mhpo.0>
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE]. (1983). *IEEE Std 145-1983 IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas*.
- True, S. A. (2004, julio 6). Planning the future of the World Geodetic System 1984. *PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium*. <https://doi.org/10.1109/PLANS.2004.1309054>
- Tsiolkovsky, K. E. (1960). *The Call of the Cosmos*. Foreign Languages Publishing House Moscow.
- Viganó, M. C. (2011). *Sunflower Array Antenna for Multi-Beam Satellite Applications* [Tesis de Doctorado, Università di Ingegneria di Firenze]. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:33e95433-514f-4367-8385-ae3cc9ddc6f5>
- Yoo, J. U., & Son, H. W. (2020). A Simple Compact Wideband Microstrip Antenna Consisting of Three Staggered Patches. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19(12), 2038–2042. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2020.3021491>
- Zhang, J., Cai, Y., Xue, C., Xue, Z., & Cai, H. (2022). LEO mega constellations: Review of development, impact, surveillance, and governance. *Space: Science and Technology*, 2022. <https://doi.org/10.34133/2022/9865174>
- Zhu, Q., Ng, K. B., & Chan, C. H. (2017). Printed Circularly Polarized Spiral Antenna Array for Millimeter-Wave Applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(2), 636–643. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2640019>

## Anexo

En este anexo se presentan las tablas que contienen las excitaciones de amplitud utilizadas en el diseño de los arreglos de antenas presentados en el Capítulo 5.

**Tabla 14.** Excitaciones de amplitud con 10 elementos para la órbita 346 km.

10 elementos de antena	
Antena utilizada	Excitaciones de amplitud
EA1	8.731425, 18.4511, 15.8244, 14.9190, 6.24377, 16.6771, 6.7790, 6.5331, 8.4516, 4.0947
EA2	7.4727, 13.5128, 17.5201, 5.1289, -0.5464, 19.0164, 12.7263, 2.6345, 12.2729, 13.2555
EA3	14.2567, 17.9637, 8.4824, 2.4821, 17.8408, 19.7419, 8.4727, 9.4013, 16.7861, 18.8048
EA1 y EA3	-2.5515, -3.5118, -16.9215, 0.5029, 4.2189, -18.5516, -17.2608, -8.8271, -12.7109, -8.3937

**Tabla 15.** Excitaciones de amplitud con 30 elementos para la órbita 346 km.

30 elementos de antena	
Antena utilizada	Excitaciones de amplitud
EA1	17.9556, -12.772, 18.134, 12.208, -19.8094, 14.5626, 16.1468, -18.2754, 11.5113, 13.5301, -10.4706, 7.5331, -9.2588, 11.4058, 4.2096, -8.0112, 1.5428, -11.9605, 17.3524, 16.0165, -13.4312, 15.5329, -6.7021, -15.2793, 17.8302, -14.7991, 6.8447, 1.1471, -10.1806, -4.6536
EA2	6.6391, 19.5733, -10.0926, 15.5959, 0.5758, 18.6798, 18.5642, 12.166, 4.2581, 9.8863, 8.7585, 5.157, 14.1417, 8.9945, 14.1577, -12.1404, -2.2081, -17.9382, 13.21, 19.8939, -5.6782, 9.2976, 14.3069, 7.2276, 11.9011, -17.5032, 19.8087, 15.288, 2.3004, -15.524
EA3	-8.3505, -13.4568, -14.2615, -1.916, 19.3039, -9.5698, -17.4444, 12.7358, -18.2808, 19.776, 10.7846, -15.9276, 17.7185, -18.6916, 9.0415, 8.6455, -14.3479, 6.2359, -4.7769, -14.5425, 16.2453, 4.0339, 16.4647, 15.2842, -15.2738, 6.4552, -4.1134, 14.1631, 13.0136, -17.2715
EA1 y EA3	8.8439, -10.7574, -15.5436, 19.8847, -19.9066, 0.7064, 0.6179, -17.6996, 14.3179, -11.8427, 3.4578, 9.9261, -4.5249, 9.7249, 5.3838, -14.5513, 19.9751, -16.1086, -8.4999, -16.4137, -16.1749, 10.3634, -6.0253, -10.3814, 4.5727, 3.311, -0.4424, 8.9049, -15.4503, 13.2533

**Tabla 16.** Excitaciones de amplitud con 50 elementos para la órbita 346 km.

50 elementos de antena	
Antena utilizada	Excitaciones de amplitud
EA1	-5.8328, 3.8108, 9.1661, 11.5537, -13.1972, 19.6256, 10.6512, -1.7242, 7.0678, -18.3432, -13.9788, 9.8902, -5.2022, 18.7657, 3.5861, -19.0845, 5.7629, -4.1193, 14.5913, -6.3986, -11.7637, 12.8109, 16.3583, 1.9033, -7.0998, -17.6567, -12.7806, 19.12, 9.997, 2.4876, -19.5672, 8.0165, 4.1146, -9.5659, 5.6076, -8.8376, -14.5708, -4.2655, -19.3834, -3.0246, 16.2854, -15.7204, 16.9702, 4.4602, -7.1165, -8.3637, 10.452, -4.9202, 10.2105, 8.2556
EA2	16.658, 16.1915, 12.3692, -4.7795, 3.2936, 19.5096, -15.6986, -11.4768, 0.5335, -0.86, 11.4364, 1.893, 14.9704, 8.3452, -2.175, 2.0932, -7.3668, -4.3969, 14.5991, -10.3265, 7.9256, -16.3449, -3.5782, 13.9136, -14.5849, 4.6571, -15.2392, 9.7848, -5.4832, -15.8242, 18.7783, 18.1733, 17.4019, -12.6638, -17.097, -3.35, -18.2983, -17.2459, -1.3166, -2.0685, -4.2369, 3.868, -13.5237, 12.967, -1.3494, 15.064, -12.9097, -15.765, 14.9481, 6.6624
EA3	13.8897, 6.3526, 15.0183, 12.2591, 8.165, 9.4645, 12.8064, 16.1739, 0.2511, 4.1504, 7.8085, 0.787, -17.0673, 14.8331, 15.7235, -3.0289, 7.2012, -17.0553, 4.3903, 13.3951, -16.1266, 11.8292, -2.6082, -17.112, 15.1843, -19.2638, 8.7568, 16.7459, 6.3427, -10.6435, -17.131, 15.0806, -0.3894, -7.8615, 0.3518, 7.7155, -11.4781, -8.9575, -17.9505, 1.5299, 16.4428, -7.2142, 14.4614, 3.3198, -0.6053, -5.3557, 4.1238, -12.6242, 18.0893, -18.1919
EA1 y EA3	-2.5541, 16.6284, 8.1599, 6.5619, -10.8903, 4.7067, 14.2414, -3.9241, 10.3003, 15.5929, 8.7637, -15.4798, -7.5548, 2.4305, -5.1443, -12.1583, 10.4578, -1.6773, 13.2867, 17.9701, -18.9099, 17.6958, -14.8105, -3.0704, 17.3306, 10.93, 14.3801, 6.2178, -12.9857, 4.2878, 0.0405, -7.1932, -18.8976, -0.023, -19.377, 15.4505, -6.9055, -10.3961, -15.7767, 13.4023, 18.6746, -11.2751, -4.0733, -1.086, -19.5079, 3.0314, -8.8224, -1.2563, 19.9221, -12.0743

**Tabla 17.** Excitaciones de amplitud con 100 elementos para la órbita 346 km.

100 elementos de antena	
Antena utilizada	Excitaciones de amplitud
EA1	14.1968, 18.055, 15.046, 13.0285, -8.5841, 5.8515, 11.2112, -7.9945, 14.5618, 13.8212, -13.5892, 18.7278, 4.3672, 14.1695, 9.6329, 9.6536, -19.3801, -16.3991, 6.6543, 9.538, -1.767, -13.7957, -6.863, -11.36, 3.54, -10.1332, 12.6517, 8.7576, -15.4771, -18.6811, -7.7601, 18.0806, -9.538, -4.098, 5.7135, 4.4709, -6.7922, -18.7818, 1.433, 18.6918, -14.5404, 12.9351, 1.1068, -12.129, 13.777, -15.4408, 11.7279, 11.7662, -4.3453, -0.9958, -12.6162, 13.086, -10.5328, -9.68, 1.3825, -19.6825, 15.6752, 13.3313, -13.9659, -6.3368, 12.5923, -11.4143, 13.3866, -7.5423, -15.297, -6.601, -8.5204, -17.7214, -1.8134, 18.9221, 6.9161, 2.0053, -13.9539, 18.8909, -17.4373, 16.6848, 11.9152, -4.1032, -11.2966, -19.8827, 6.7756, -1.6434, -11.6292, 14.8549, -4.6057, -15.2194, -19.4705, -14.3518, 18.9077, 10.3377, 9.5556, -15.6003, -14.1156, -11.7033, 1.6547, 11.1157, 17.3896, 13.8675, -5.426, -13.7078
EA2	-13.6525, -11.7577, -18.6298, -8.5772, -14.4557, -17.4928, 18.869, 10.0209, -8.7083, -2.4393, 1.2012, 13.0052, -5.0326, -4.3822, 4.4542, 16.0806, 15.0462, -5.0119, -3.5549, 18.9519, 10.3071, 14.0801, -6.7414, -13.3604, 15.7777, -6.3498, 19.5411, 5.8614, 12.3972, 15.3774, 13.092, -16.9011, 14.3191, 16.4725, -2.9136, -2.5763, 19.7074, 0.8319, 15.2802, -11.2814, 3.7269, 16.9025, 16.5988, -18.9129, -18.388, 10.0914, 4.1229, 16.3111, -11.219, 15.3037, 0.7638, 16.57, -12.4903, -2.3957, 5.3691, 9.4382, -15.6593, 10.0133, 19.1659, -19.0955, -11.2599, 17.9972, 4.1793, 9.0268, -7.988, -15.3647, 4.2035, -6.6558, 8.3578, -18.4282, -7.2662, 2.4146, 11.115, -19.663, 17.1318, 5.5886, 17.2757, -18.465, 11.202, -10.44, 0.9586, -17.9133, -1.8961, -19.6398, -10.3963, 1.4085, -8.8345, -0.1844, -14.98, 15.547, -18.1557, 0.3732, 4.1521, -4.9578, -12.1752, 16.3096, 6.6929, 16.7291, 0.1418, 8.1878
EA3	-19.6288, -13.987, -10.0819, 1.0365, 19.2342, 7.6897, 15.0184, -13.0838, 17.2073, -13.0629, -18.4288, 5.189, -8.2401, -13.5761, 4.2797, 3.4568, 16.3535, 10.1771, -10.3366, 11.7558, 11.9206, -14.1257, -14.1387, -18.42, 0.1279, 10.4413, -2.1772, -8.0254, -0.0497, 15.5499, -18.3298, -15.7865, 19.3209, 12.2451, 18.0001, -18.8826, -13.2177, 14.1219, -15.9281, -12.5619, 14.3765, 10.3569, -9.4432, -6.5103, 7.553, 16.5747, -7.7373, 10.4663, -1.1377, -14.5035, 7.6888, 12.6743, -9.5267, 18.0732, 18.5115, -12.5908, -11.0541, -15.1298, -18.9607, 13.3298, 14.7915, 18.6781, -7.125, -14.2102, -16.9696, -13.0248, -15.961, 19.9436, -13.1037, 2.1466, 6.1767, -12.0812, -0.9509, -15.265, 19.4756, 3.9356, 16.3018, -11.6903, 11.7889, 16.3339, 8.4149, -6.8177, 9.5698, 15.0363, -15.9954, 18.3273, 0.8096, -5.8362, 12.4455, 4.1013, -8.4602, 4.845, -14.201, -0.3178, 17.9442, 16.0725, -1.2846, -12.3033, -10.7085, -9.4444
EA1 y EA3	14.2869, -15.5687, -1.8815, -10.0206, -9.8259, -8.9985, 9.6953, -11.0888, 18.9644, -4.5318, 1.8975, 6.4187, 2.494, -0.8241, 9.6296, -13.3401, 4.8842, -12.6389, 18.937, 3.4269, -3.9274, 4.5341, -0.58, -6.0561, 1.278, -14.6287, 15.9905, 7.9442, -14.064, -11.5508, -14.4865, -19.2909, 13.5611, -6.5712, 12.594, 2.4296, -13.8809, -19.9115, -10.8567, -8.6647, -14.5184, -17.3747, -0.3957, 7.9513, 10.9947, 8.025, 18.1405, 13.3018, 9.3374, -17.4948, -11.5231, 10.2756, 0.7416, 15.5335, 17.1149, -13.3031, -14.6433, 8.5619, -16.0257, 3.5633, 3.9006, -15.0733, -3.8885, 17.7005, -6.5596, 7.0972, -2.5555, 16.3895, 2.046, -14.7538, 7.439, -13.1388, -12.3834, -18.4483, -12.9451, -13.7816, -8.833, -14.3845, -14.0079, -15.5542, -1.5458, -1.6537, -1.7332, -19.0565, -11.0836, 2.1401, -16.145, 2.6159, 0.4788, -19.5033, -5.7655, -2.9471, 0.8554, 3.6077, 14.5817, -0.4315, 5.816, -8.276, 4.9589, -16.1761

**Tabla 18.** Excitaciones de amplitud con 30 elementos para la órbita 550 km.

30 elementos de antena	
Antena utilizada	Excitaciones de amplitud
EA1	4.9759, 3.3007, 3.3099, 14.197, -18.6054, 15.4168, -3.6908, -18.5447, 15.9237, -13.8068, 10.5157, 10.8869, -19.148, 15.1894, 12.0425, -7.0334, 6.7618, -8.1482, 17.3129, -10.6807, -18.5095, 9.8067, -0.9146, 6.5585, 9.6146, 7.7127, 12.9631, 13.1191, -8.2653, -8.8464
EA3	7.6721, -13.188, -15.2954, -3.9082, 11.8413, -16.2195, -18.1782, -7.5672, -1.4859, -16.4047, -16.7328, 17.1055, -0.0852, -13.2963, 19.9427, 18.7144, -11.3876, 8.0873, -17.6163, 15.2021, -5.539, -11.7431, 2.0224, 3.8828, 3.9336, 19.998, -16.3507, -19.6732, 19.9213, 11.6978
EA1 y EA3	12.9228, -16.424, 18.3911, -19.02, -12.62, -7.5378, -2.9796, 15.9598, -8.5155, 3.224, 13.5381, -18.7962, -6.2056, -15.1132, -14.668, 8.5608, -11.8752, 15.9037, 0.3485, -19.18, 10.3171, -18.0265, 19.7538, 15.5467, -10.4995, -11.2856, -6.5096, 3.6549, -15.3362, -18.5749

**Tabla 19.** Excitaciones de amplitud con 50 elementos para la órbita 550 km.

50 elementos de antena	
Antena utilizada	Excitaciones de amplitud
EA1	2.0572, -14.6753, 3.9924, 4.061, 1.1299, -0.1304, 7.9428, 7.452, 3.0086, -12.3646, -2.8332, 4.1227, 11.3531, 15.1181, -4.4626, 4.6952, 15.3976, 5.8163, -4.676, 2.1385, 1.6788, -1.7995, -12.528, -10.7118, -13.0508, 16.9614, -3.5821, 14.3398, 7.5331, 6.1536, -2.7347, 9.4997, 17.4553, 16.5533, 12.8747, -16.2072, 14.2075, -12.5013, 7.8911, -3.1977, 19.9155, 1.9421, 15.1854, -5.455, 9.5778, 7.4573, 14.2489, -1.2198, -15.1456, 3.8732
EA2	19.8263, 0.5173, 15.3207, -1.8416, 14.5102, 0.8947, 10.3769, -6.1944, -5.456, 19.9742, 13.5691, -15.9317, -16.1125, -18.2644, 5.5813, 12.5956, -12.9303, 13.8734, 18.9825, -10.752, -19.5763, -15.176, 17.9762, -16.5331, -16.34, -5.5313, -14.3084, -18.8205, 19.3294, -3.6228, -17.0899, 5.3583, -8.9054, -13.9579, -5.2903, 4.5988, -4.3026, -6.0894, -18.1016, 7.4908, 9.3677, 18.8074, -14.9594, -10.9439, 16.0053, 3.8509, -15.6329, -15.5829, -6.7841, -5.355
EA3	-19.9613, -16.0479, 0.152, 10.6835, -8.2998, -15.3571, -4.664, -6.9645, 10.756, -5.2123, -10.3418, 18.1405, 19.8964, 5.5085, 11.1595, -1.4593, 13.6122, -12.4464, -16.0946, 8.502, 8.2073, -0.6008, -17.1392, -1.3647, 19.7375, -6.5646, 12.724, 6.9318, 6.7746, 3.3798, 0.6344, 11.8323, 12.5665, 9.6895, 14.9187, -13.4519, 12.1882, -10.2967, -10.6737, -14.6111, 1.454, 6.8447, 14.3567, -15.6054, -0.7685, -1.254, 12.7407, -8.6724, 15.9266, 11.9652
EA1 y EA3	-17.6962, -11.6072, 10.9033, 15.543, -9.7362, -11.9676, 10.5952, 16.5181, -11.2492, -16.8648, 13.187, 5.4644, 9.6741, 4.4932, 5.5263, 10.2135, -11.3197, 18.7613, -16.9174, 0.4662, 4.5079, 9.0886, -14.5395, 11.1489, 14.9951, 12.0172, 18.9505, -14.796, 6.7728, -3.6012, -13.8873, 8.1885, 12.4875, 11.4659, 17.3496, 0.3471, 16.0905, 12.7829, 11.4607, 6.164, 12.0709, 13.0596, 16.8277, 2.2652, -12.1131, 5.3494, 3.9278, 17.5519, 16.062, -4.3517

**Tabla 20.** Excitaciones de amplitud con 100 elementos para la órbita 550 km.

100 elementos de antena	
Antena utilizada	Excitaciones de amplitud
EA1	-6.5313, 8.5939, 0.6277, 11.101, -14.8172, 10.8656, 18.6482, -2.1129, 14.4452, -17.2269, -1.6529, -3.3115, 10.936, 2.8754, 19.8437, -16.6793, 18.4879, -2.1766, -11.2637, 10.0721, 5.7417, 7.9199, -15.2416, -18.9271, -16.7397, -6.6013, 19.4377, 17.9758, 13.6456, 3.9921, -17.5627, -9.7832, -6.5983, -15.2122, -14.8354, -18.6048, -19.4303, 17.6017, 3.1736, 17.6435, -1.664, 3.6828, -0.7041, 4.6963, -18.2111, -16.3502, 19.4668, -4.4084, -6.0071, 2.0216, -1.1497, -15.1379, 17.7684, -9.8296, 15.5028, -12.9308, 18.343, -19.0839, 16.8628, 15.2439, 6.5467, 15.7699, -4.3724, -3.3849, -19.3624, 1.0706, -10.9003, 18.4278, -18.3843, 18.2159, -18.9773, -3.8548, -17.0876, 6.8401, -11.0861, -15.1414, 15.736, -10.1822, 0.9466, -4.8574, -3.809, 13.6542, -3.3615, 7.9886, 19.8174, 11.1367, -4.8218, -11.9043, 7.8938, -5.3438, -2.8547, 9.7435, 2.6079, -0.8192, 19.3558, -7.8023, 18.6723, 17.7861, -6.0603, -15.1108
EA2	13.6411, 9.5371, -14.8146, 14.372, 16.7734, 12.3719, -8.6935, -11.6118, -18.4313, 6.1371, -7.889, 3.8472, 5.7153, 17.3833, 13.0366, -12.2123, -2.0083, -3.1804, -12.0858, 19.573, 14.2372, -11.7185, 16.8246, -5.9092, -19.5808, 13.3791, 13.3763, 5.9078, -12.9591, -18.2898, -9.2894, 15.7912, 3.8748, 2.915, -11.143, 19.5935, -5.2108, -18.8413, -19.1924, 5.6562, -8.4327, -7.8697, -15.6753, 3.0763, -8.2899, -5.5526, 15.911, -18.6464, 4.0127, 10.921, 17.4748, 8.6852, 17.1748, -18.9256, 12.0111, -19.5775, -5.8823, -19.6345, -12.8026, 11.7684, 2.3372, -11.4654, -11.2242, -1.4023, -0.1048, -12.5828, 14.4948, 6.0978, -3.9838, 11.1826, -9.5291, 15.4526, 9.8304, 2.3556, -17.0251, -3.6592, -15.0637, 2.3121, 9.6782, 16.2529, 18.8192, 19.2092, 17.5428, 14.3864, 9.3773, 3.0544, 14.8713, 4.6834, 1.0899, -14.0477, -4.054, 14.3669, 2.9019, 8.8567, 12.0907, -8.4981, 7.2552, 4.3161, -17.7014, 12.8954
EA3	-11.2778, -15.7999, -7.6956, -4.0744, 9.9826, -12.9771, -15.0153, -18.9213, -4.8459, -14.4358, -7.9238, -19.6992, -2.6298, -18.5254, -2.5089, 19.8292, -19.1465, 13.6045, 5.9766, 7.3515, 4.845, -3.249, -5.0051, 14.4313, 13.6341, 11.0699, -2.1115, 0.1855, 16.6061, 6.7951, 15.1574, 8.1068, 7.6268, -16.2131, -7.1869, -4.9976, -6.0148, 8.0485, 13.5735, -3.1616, 5.447, -12.9502, -12.1073, -4.1059, 16.1261, 15.3248, 0.5822, -9.6089, -15.6971, 10.0147, 18.7056, 15.3186, -18.0662, 17.0565, -9.1915, 0.0046, 1.9191, -2.6302, -1.6795, -3.9015, -2.6596, 19.5792, -17.6502, 2.3511, -14.0941, -3.463, 19.3753, -5.1018, 0.3758, -17.7847, -16.6343, 7.5242, -15.7374, -11.5788, 10.848, -6.0195, 1.7082, 4.1466, 12.9663, 2.8317, -2.8474, 19.7112, -7.1251, -18.9779, 15.4654, 18.2358, -3.0846, -11.0995, 2.4473, 17.451, -14.3279, -19.2599, -14.9912, 4.0756, -3.978, 18.833, 6.1531, -3.057, 0.4586, -6.0582
EA1 y EA3	-19.667, 14.717, -11.9184, 16.9968, -1.1019, 15.3675, -19.5948, -6.3289, 0.8624, 0.4561, -15.3776, 19.9871, -5.9338, -0.896, 10.2974, 5.0232, 14.0422, 13.0562, -3.0032, 7.2825, 5.6017, -7.5248, 9.4969, 1.2127, 11.0818, 8.7849, -9.7033, 19.8865, -5.0399, -11.1258, 3.2439, -10.8301, 2.0799, 9.7793, 5.4789, 1.9083, -2.2703, -17.7885, 2.8335, -13.3609, -7.0149, 3.4789, 1.6169, 9.3845, -14.2588, 4.4565, 4.7604, 19.3572, -14.5323, -12.6399, 8.7477, 16.9969, -0.6236, 4.6658, 1.2307, 19.4662, -8.4232, -9.7636, 11.7261, 8.2706, 14.802, 16.6168, 3.6745, 1.9742, 12.2061, 4.4489, -13.6128, -4.6523, 1.0317, 8.165, -2.7438, 5.9273, 7.0764, -11.5509, 15.8075, 17.7781, -7.8349, -11.2499, 3.4709, -0.3658, 8.2076, 6.9738, 0.4302, -2.4401, -1.8963, 14.1826, -10.7431, -5.1849, 0.0548, -1.7728, -6.1163, 7.0468, 13.2206, -8.4981, 2.6727, 2.1369, -11.7132, -12.5591, -4.1548, -1.9938

**Tabla 21.** Excitaciones de amplitud con 30 elementos para la órbita 1,325 km.

30 elementos de antena	
Antena utilizada	Excitaciones de amplitud
EA1	7.5633, 12.7953, 19.2109, -15.1861, 13.5767, 10.4453, 12.9979, -9.7309, 3.7105, 0.6405, 14.3005, -19.0586, -6.5179, -4.7859, 19.3458, -19.5958, -4.7835, 17.4627, 5.9943, 13.0385, -15.9068, -9.6761, 5.0966, -10.1125, 4.8121, -8.593, -7.2319, -3.6681, 0.1633, 8.8148
EA3	6.9323, 1.2122, -18.5883, -11.0625, -19.4274, 10.1543, 6.0665, 13.6171, 3.1478, 19.9167, -7.5951, 4.2597, -9.5792, -11.4919, 3.1915, -3.7775, -14.9386, 0.0772, 17.6007, 4.209, 17.5962, -11.4632, -10.3253, 19.9663, -11.3543, 18.2546, -10.3908, 2.0045, 4.0244, -16.6023
EA1 y EA3	-14.8429, 19.2952, 2.9737, -1.4945, 0.051, 12.3862, -9.8482, -14.8323, -6.7572, 2.1214, -7.0383, 3.5303, -18.3902, -3.0354, -9.6762, 6.4828, -13.0377, 8.6412, 10.5759, 3.8091, -3.8107, 17.4272, 2.9229, -12.5961, 18.8299, -10.1169, -15.6466, 3.089, -17.3751, 13.2345

**Tabla 22.** Excitaciones de amplitud con 50 elementos para la órbita 1,325 km.

50 elementos de antena	
Antena utilizada	Excitaciones de amplitud
EA1	4.9611, 15.339, 19.8345, -16.9305, -2.2098, 12.9882, -1.8369, -19.3184, 16.242, 13.4748, 4.286, -5.0474, 6.9258, -13.8666, 8.8478, -9.5909, -0.6163, -9.6887, 2.3961, -10.4988, -11.2893, 5.0885, -11.159, -13.7098, -10.5291, -1.4334, 13.7705, 6.8015, -0.4849, 5.9625, -10.8853, -1.7647, 12.5436, -1.4261, -6.603, -6.4565, -15.8009, 3.1464, 1.599, 11.6325, -5.2047, -1.4052, 1.1069, -3.1091, 5.2666, 18.1165, 9.8678, 14.5794, 5.0438, 8.4289
EA2	8.3379, 5.2046, 18.9121, -13.3543, 14.1202, 2.5732, -17.4818, 0.7392, -8.5044, -1.8875, 14.9051, -18.8054, -15.431, 1.0032, -18.1124, -9.6603, 19.2571, -15.0279, -14.318, 10.2169, -19.3133, 12.6414, -0.0251, -16.4368, 16.5236, -18.9917, -9.206, 0.0867, -11.7339, 4.7827, 6.2702, 1.3779, -14.1793, -10.2082, 13.027, 7.2928, -19.0447, 6.2429, 16.2622, -10.5026, -19.9463, -4.4628, 7.26, -4.5847, -14.4395, 19.7667, 7.1985, 11.0783, -13.9501, -1.9561
EA3	-6.6118, -6.7726, 19.7867, 2.6562, -17.6724, -2.9257, -1.8571, -18.1607, -9.3024, -9.2768, 19.5651, -2.801, -17.3557, 15.4486, -0.566, -14.5281, 10.271, 13.2228, -17.1429, 17.9488, -16.1773, 10.699, 19.5624, -8.0212, 17.8453, -1.2525, 14.7435, -8.2125, -13.5729, 9.3804, -9.7229, -5.048, 9.403, -15.2436, 3.7782, 13.3692, 13.0755, 5.2831, -16.3097, 1.266, 4.1313, 13.3893, 17.5473, 5.0377, -2.6062, 18.1543, 14.0047, 4.7541, 5.7624, 14.2985
EA1 y EA3	-17.7897, 17.3644, 5.9196, -13.896, -3.5872, -7.0998, 16.7527, -9.2749, -1.5074, -10.8052, -4.2285, -16.4451, -4.8623, -7.3204, -18.8144, 14.6702, -10.3773, 5.0662, 14.3716, 2.6609, -5.5371, -3.3694, -16.5167, 0.7017, -18.0761, 18.6941, 14.1893, 13.5906, 16.2214, 6.8067, -3.2719, 9.851, 7.6337, 1.7496, 11.5771, -3.7583, -17.0585, 16.4712, 10.5072, 9.0902, 5.4858, 12.9566, 5.1769, -1.132, -7.7094, 5.8579, 13.2952, -14.2034, -12.5648, -14.4835



**Tabla 23.** Excitaciones de amplitud con 100 elementos para la órbita 1,325 km.

100 elementos de antena	
Antena utilizada	Excitaciones de amplitud
EA1	-17.1823, -16.1516, -13.4029, 2.4709, 16.15, -10.6729, 0.3436, 14.5405, 11.6138, -13.9334, -5.903, -9.6211, -6.0937, 12.1358, -3.3559, -17.9672, 8.076, 5.8992, -17.685, 10.0185, -7.7375, 3.9147, 17.0891, 9.9258, 7.9182, -1.1199, -19.6564, 2.6788, -16.0639, 9.4699, -2.4832, -5.4401, 1.5593, 11.1498, 19.7159, -18.9289, -7.9555, 0.3953, -5.404, -16.9603, 12.125, 6.8801, 9.0107, 19.0022, 12.9012, -1.7898, -7.0357, 16.4348, -2.787, -13.1849, 2.2496, -11.6925, 1.4559, -9.587, -0.7114, -14.3415, 16.3309, 13.2325, -15.8446, -6.736, 6.9711, 2.1896, 9.1485, 13.2157, 4.985, 9.8298, -16.3401, 19.299, -2.7352, -11.4161, -7.3152, 12.5237, -14.0523, 7.4241, -9.7461, -11.4415, 4.5773, 15.6586, 12.2246, -14.7465, -9.1663, -4.4522, 12.4979, 1.4333, -12.0429, -10.8899, 3.2428, -9.6375, 14.9303, -6.3151, -4.8849, -2.6995, 14.349, 8.044, 15.3348, 11.3115, 12.6677, 4.367, 15.9752, 7.435
EA2	8.6452, 5.1903, -17.1706, -13.8225, -17.4293, 3.9648, 18.8257, -13.049, -15.349, -2.7991, -19.4825, 5.2268, 9.1939, -10.0323, 15.5019, -16.4938, 13.4092, -5.495, 11.3737, 3.6685, 6.5639, -12.3461, -15.3389, -15.2913, 19.7892, -8.9337, 6.9538, -7.0655, 8.8917, 13.0698, 15.2638, 6.4345, -7.0717, -1.6811, -11.7894, -7.8556, 14.1362, -2.174, 12.4055, 10.2953, -15.9685, 10.8981, 4.1607, -18.3745, 6.2916, 14.286, -11.3546, -18.8549, 7.7647, 6.0139, 7.4465, -12.6043, -13.5864, 4.9144, -9.1191, 11.9548, -19.281, 7.5059, 10.1124, 7.4606, 16.0478, -11.4116, -14.7303, 9.6421, -7.0517, -14.6716, -3.8479, -0.4749, 9.4055, 2.9069, 12.3365, -5.4189, 0.2271, -6.2317, -10.4122, -13.6328, 13.9932, 1.191, 10.225, 14.4306, -4.9384, -12.1738, 7.5282, -12.1587, -2.149, 16.1026, -17.2364, 13.1401, -0.3985, 8.5558, 7.6329, -15.0511, 18.2456, 11.5631, -3.0045, -16.4456, -8.8004, 4.9228, -9.0909, 6.0581
EA3	-11.2778, -15.7999, -7.6956, -4.0744, 9.9826, -12.9771, -15.0153, -18.9213, -4.8459, -14.4358, -7.9238, -19.6992, -2.6298, -18.5254, -2.5089, 19.8292, -19.1465, 13.6045, 5.9766, 7.3515, 4.845, -3.249, -5.0051, 14.4313, 13.6341, 11.0699, -2.1115, 0.1855, 16.6061, 6.7951, 15.1574, 8.1068, 7.6268, -16.2131, -7.1869, -4.9976, -6.0148, 8.0485, 13.5735, -3.1616, 5.447, -12.9502, -12.1073, -4.1059, 16.1261, 15.3248, 0.5822, -9.6089, -15.6971, 10.0147, 18.7056, 15.3186, -18.0662, 17.0565, -9.1915, 0.0046, 1.9191, -2.6302, -1.6795, -3.9015, -2.6596, 19.5792, -17.6502, 2.3511, -14.0941, -3.463, 19.3753, -5.1018, 0.3758, -17.7847, -16.6343, 7.5242, -15.7374, -11.5788, 10.848, -6.0195, 1.7082, 4.1466, 12.9663, 2.8317, -2.8474, 19.7112, -7.1251, -18.9779, 15.4654, 18.2358, -3.0846, -11.0995, 2.4473, 17.451, -14.3279, -19.2599, -14.9912, 4.0756, -3.978, 18.833, 6.1531, -3.057, 0.4586, -6.0582
EA1 y EA3	-19.0729, 18.492, 6.7682, 7.1085, 2.1259, -1.172, -13.8983, 15.533, -7.2827, -2.194, 15.7394, 10.5853, 8.4567, -1.1959, -7.84, -13.3672, -3.9402, 15.8542, 2.135, -5.4328, -3.8128, 0.3693, -9.7557, 1.3825, -7.1466, -3.4785, -10.412, -1.0859, -17.9155, 13.8038, -4.1522, -10.1557, -5.3426, -13.5444, 6.0155, 17.1597, 14.7872, -8.6247, 3.9791, 12.7262, 10.0419, 14.355, -11.9987, -6.1052, 1.0965, 14.4263, -1.1623, 13.0108, 19.9586, 12.6367, 15.1525, 6.3886, 18.6141, 12.749, -15.0502, 10.026, -19.3328, 4.2359, -8.3455, 18.0367, 5.4699, 5.2904, -2.9703, -7.779, -7.398, -9.4304, -8.766, 13.4192, -4.6421, 11.0634, 16.6826, 15.0244, 5.3622, 1.4908, -9.2842, 9.328, -15.5444, -4.7858, -13.1879, 3.7754, 14.9627, 6.8128, -2.7386, -4.1779, -7.9671, 2.0941, 14.6582, -14.7676, -5.6409, -4.0756, -15.4537, 14.5998, 1.3437, 11.1793, -13.4193, 7.2143, 0.5038, -18.6867, 2.324, -9.4301