

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



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

**Diseño de sistemas de radiación tipo Isoflux para aplicaciones
satelitales**

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

Presenta:

Rodolfo René Fernández Rangel

Ensenada, Baja California, México
2022

Tesis defendida por

Rodolfo René Fernández Rangel

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza

Codirector de tesis

Dr. Roberto Conte Galván

Codirector de tesis

Miembros del comité

Dr. Jorge Enrique Preciado Velasco

Dr. Jorge Torres Rodríguez

Dr. Eduardo Antonio Murillo Bracamontes



Dr. María Del Carmen Maya Sánchez

Coordinadora del Posgrado en Electrónica y Telecomunicaciones

Dr. Pedro Negrete Regagnon

Director de Estudios de Posgrado

Rodolfo René Fernández Rangel © 2022

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Rodolfo René Fernández Rangel** como requisito parcial para la obtención del grado de en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones.

Diseño de sistemas de radiación tipo Isoflux para aplicaciones satelitales

Resumen aprobado por:

Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza

Codirector de tesis

Dr. Roberto Conte Galván

Codirector de tesis

Las telecomunicaciones constituyen un factor de gran importancia en temas tecnológicos, económicos y de servicios a nivel mundial. Por tal motivo los satélites de nueva generación son un requerimiento primordial en el proceso de globalización. En dicha comunicación satelital a fin de difundir y propagar información de forma rápida y segura, se propone una radiación global del tipo Isoflux, necesaria para evitar los efectos que son causados por la distancia y otros factores. Un sistema de radiación tipo Isoflux proporciona una iluminación de la superficie de la Tierra dentro de su margen de visión en el polo ecuatorial. En este caso, un sistema de radiación convencional genera pérdidas de potencia en las partes lejanas del nadir (por los efectos causados por las longitudes distintas que recorre la señal radiada), poco tiempo de visibilidad en satélites MEO (se pierde la señal) y atención a pocas estaciones en Tierra para satélites GEO (mismo caso de satélites MEO). Un sistema de radiación tipo Isoflux evita las pérdidas de potencia en puntos lejanos del nadir iluminando la Tierra de manera uniforme siguiendo la cobertura de la Tierra. Por lo tanto, esta tesis tiene principalmente el objetivo de diseñar arreglos no uniformes o aperiódicos con la finalidad de mejorar el desempeño radiante del sistema y simplificar el sistema de antenas mediante una reducción de hardware, reduciendo el número de excitaciones de antena para simplificar el hardware del sistema de antena en un satélite creando así el patrón de radiación Isoflux. En este trabajo de tesis este diseño se plantea como un problema de optimización usando algoritmos genéticos.

Palabras clave: Isoflux, Diseño de arreglos de antenas, Optimización evolutiva.

Abstract of the thesis presented by Rodolfo René Fernández Rangel as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Telecommunications.

Design of Isoflux type radiation systems for satellite applications

Abstract approved by:

Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza

Codirector de tesis

Dr. Roberto Conte Galván

Codirector de tesis

Telecommunications are a factor of great importance in technological, economic and service issues worldwide. For this reason, new generation satellites are a primary requirement in the globalization process. Satellite communication in order to spread and spread information quickly and safely, a global radiation of the Isoflux type is proposed, necessary to avoid the effects that are caused by distance and other factors. An Isoflux-type radiation system provides illumination of the earth's surface within its range of vision at the equatorial pole. In this case, a conventional radiation system generates power losses in the far parts of the nadir (due to the effects caused by the different lengths that the radiated signal travels), little time of visibility in MEO satellites (the signal is lost) and attention a few stations on Earth for GEO satellites (same case of MEO satellites). An Isoflux type radiation system avoids power losses at points far from the nadir by illuminating the earth evenly. Therefore, this thesis mainly has a function in the design of non-uniform or aperiodic arrangements in order to improve the performance of the system and simplify the antenna system through a hardware reduction, reducing the number of antenna excitations to simplify the hardware of the antenna system on a satellite thus creating the Isoflux radiation pattern. This design is posed as an optimization problem using genetic algorithms.

Keywords: Isoflux, Antenna array design, Evolutionary optimization

Dedicatoria

“Cada uno de nosotros estamos destinados a una función especial en la vida a partir del día en el que dios nos concede nuevamente el regalo de despertar una vez más después de un sueño que pareciera eterno, la cual para cierta sociedad que goza de la total plenitud, le coloca el nombre de la resurrección. Sin embargo, en el camino antes de cumplir dicho destino en el cual se nos otorga el mismo día en el que volvemos a nacer, nos encontraremos con espejos de nosotros mismos que ayudarán a edificarnos, nos acompañarán en el viaje para después marcharse y no volver nunca más a nuestra realidad. Y una vez arribando al puerto del éxito donde yace nuevamente el jardín del edén, los recuerdos de cada alma compañera se manifestarán en la conciencia y quedarán sellados en nuestro corazón por la eternidad, al fin cumpliremos nuestra función a la cual fuimos elegidos para contribuir a la humanidad y junto a esa gloria.... nuestra alma gemela”.

A mis padres

Luís René Fernández Rangel y a María Elena Rangel Gervasio los cuales fueron en vida las personas que principalmente formaron la personalidad que me definió, me define y me definirá por el resto de mis días. El no rendirme y cerrar el círculo (si empezaba algo tratar de terminarlo), fueron palabras sabías de mi madre el cual hizo que me diera un empujón a un mundo de crecimiento personal y el carisma y sencillas de mi padre, fueron las virtudes que me dieron la oportunidad de abrir puertas y relacionarme con personas de buen corazón cuyos sueños asemejan a los míos. Aunque ya no existan en este plano terrenal, la presencia de ambos quedará impregnada en mi corazón cada vez que sueñe despierto y recorra por mi mente aquellos mares del pasado y respire la maravillosa brisa del recuerdo.

A mis amigos

A los HOPUS, que fueron donde encontré la hermandad, el apoyo y sobre todo aprender que una familia no depende de tener lazos sanguíneos, sino de ser buenas personas con el prójimo de corazón. Junto con el secretario musical del décimo noveno ayuntamiento afiliado al sitatir Marcelo Flores Yáñez que empezamos esta fraternidad.

Quiero agradecer a Armando peralta, uno de mis amigos cercanos y sobre todo casi hermano el cual le atribuyo este agradecimiento por escrito porque fue el que me otorgó la idea de expandir mis conocimientos en todos los aspectos en una maestría. Fue, es, será el espejo y alma compañera más allegado a mí.

A Roilhi, que fue la persona que me ayudó a relacionarme con muchos personajes interesantes dentro de la maestría, que fueron de auxilio en dudas respecto a trabajos y tareas de la maestría. El regalarme desinteresadamente tu amistad e invitarme al club musical fue y será uno de los recuerdos más increíbles dentro de la institución. Gracias por creer en mi...

A Luviano por tener esa disponibilidad de ayudarme y compartir momentos los cuales fueron de aprendizaje y compañía mutua. Compartir y debatir ideales fueron los factores de mi crecimiento personal tanto académica y moral. Y, sobre todo, al explicarme las cosas que no entendía. Por las veces que compramos pollo para concentrarnos en las tutorías.

A Rubersy por ayudarme en explicarme las cosas, a enseñarme a ser humilde con su manera de ver el mundo, honesto de corazón al no sentir mentiras dentro de sus palabras, al demostrarme sus ganas de salir adelante haciendo ver en mi cualidades y virtudes las cuales no podía verlas debido que mis ojos sostenían la venda de la absoluta soberbia y mi corazón ejerciendo la magistral arrogancia.

No he conocido a otro ser humano que goce de tanta humildad y sencillas en su corazón, estás benditamente condenado al éxito hermano.

“¿Has visto un hombre diestro en su trabajo? Estará delante de los reyes”.

Proverbios 22:29.

A Elisván por ayudarnos tanto en asesorías, regalarnos tiempo y espacio para resolver nuestras dudas. Es un excelente maestro que domina por excelencia lo que ejerce.

A mis abuelos

A mi abuelo Agustín (Q.E.P.D) que fue un ejemplo a seguir y motivación de llegar a ser una persona de respeto en la vida, su vida motivó gran parte de la mía en ciertas situaciones y su recuerdo siempre estará en cada momento que las personas se dirijan a mi como ingeniero.

A mi abuela Margarita que es la parte fundamental y más importante en mi vida, fue la que me enseñó a desarrollar mi corazón hacia las demás personas, a salir adelante, ser siempre un soñador, a descubrir la vida a la manera de un niño curioso, pero siempre y cuando recordando los valores aprendidos. Me siento orgulloso de portar su esencia en mi ser que algún día, cuando conquiste el mundo podré compartirla en su esplendor.

Y sobre todo a la persona que más me motivó a terminar con esto, Efraín Duarte. Para mí fue un honor terminar con tu tesis a pesar de lo sucedido. La persona que me instruyó, preparó para mi examen de admisión y no sólo en ese si no en varios exámenes por parte de la licenciatura, me mostró las instalaciones, con varias personalidades en la institución y poder haber llegado al final, es algo que compartiré con mi buen amigo Duarte.

Agradecimientos

A todo el personal del CICESE y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por permitirme continuar con mis estudios y por el apoyo económico suministrado en el cual se me otorgó el **No. CVU: 995324**.

A DIOS por escucharme, por ofrecerme de poco a poco y a su tiempo lo que realmente iba necesitando para crecer y desarrollar la conciencia, donde en cada suspiro al viento anhelaba poder llegar a sobrellevar esta gran prueba de vida debido a la pandemia y en parte de poder haber pertenecido a esta institución que fué y será parte de mi desarrollo personal. Ahora estoy listo para el verdadero destino.

“Después de esta experiencia gane o pierda, al fin podré obtener mi libertad”

Al Dr. Roberto Conte Galván, por sus consejos y comentarios que me dieron la oportunidad de aprender de su filosofía de vida, la cual, sin darme cuenta, tuve el honor de ser un espejo de su pasado y él un espejo mío de mi futuro, fué algo increíble.

Al Dr. MARCO PANDURO, por todo su apoyo otorgado desde el inicio de mis estudios en CICESE como asesor durante el primer año, hasta la culminación de este trabajo de tesis. Gracias por sus consejos, críticas, la guía adecuada y sobre todo humildad, ya que permitieron forjar en mí la forma en que se realizan las cosas para la obtención de resultados. Y sobre todo por toda su paciencia que tuvo conmigo.

Las casualidades no existen, las personas se cruzan en tu camino para guiarte hasta la parte final de tu destino, alcanzar ese despertar de conciencia que forma parte del sendero y después llega la prueba final; que está pendiente por venir y la que espero con ansias.

Si algo me ha enseñado la vida, es que cada persona que permanece en tu círculo interno, es una polaridad de uno mismo manifestada con cualidades tuyas frente a ti, sean positivas o negativas.

“GRACIAS QUERIDOS MAESTROS DE VIDA POR CREER EN MI, APOYARME Y AYUDARME EN MI CAMINO”.

A los miembros de mi comité de tesis, Dr. JORGE TORRES, Dr. JORGE PRECIADO, Dr. EDUARDO MURILLO, por sus explicaciones y aportaciones realizadas para este trabajo, pero sobre todo gracias por formar parte de este comité, ya que ayudaron en gran medida.

También agradezco a mis compañeros de la maestría por toda su amistad brindada: Eduardo, Leonel, Marisela, Neftalí, Fernando, German, Antonio.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	vii
Lista de figuras.....	xi
Lista de tablas.....	xiv
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación	5
1.4 Objetivos.....	7
1.4.1 Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
Capítulo 2. Marco de referencia	9
2.1 Introducción: Satélites y tipos de órbitas.....	9
2.2 Origen de los satélites artificiales	9
2.3 Aplicaciones de los satélites artificiales	11
2.4 Ventajas e inconvenientes de los satélites artificiales	12
2.5 Órbitas satelitales.	13
2.5.1 Coberturas y conceptos para determinación de una órbita	13
2.6 Tipos de órbita.....	14
2.6.1 Órbita geoestacionaria (GEO).	17
2.6.2 Órbita de Media Altura (MEO).....	19
2.7 Radiación tipo isoflux.....	20
2.8 Conclusiones.....	23
Capítulo 3. Arreglos de antena	24
3.1 Introducción	24
3.2 Justificación del uso de arreglos de antenas.....	24

3.3 Diferentes Estructuras de Arreglos de Antenas	25
3.4. Arreglos lineales de antenas	26
3.5. Parámetros de radiación.....	29
3.5.1 Diagrama de Radiación generado por un arreglo lineal.....	29
3.5.2 Campo Cercano y Lejano	32
3.5.3 Factor de Arreglo	33
3.5.4 Lóbulo Principal	33
3.5.5 Lóbulos Laterales	33
3.5.6 Ancho de Haz.....	33
3.5.7 Eficiencia.....	34
3.5.8 Ganancia y Directividad	34
3.5.9 Lóbulos de Rejilla (Grating Lobes).....	34
3.6. Conclusiones.....	34
Capítulo 4. Metodología de diseño de sistemas de radiación tipo Isoflux.....	36
4.1 Introducción	36
4.2. Algoritmo Genético.....	38
4.3 Métodos de representación	40
4.4. Evaluación y selección.	41
4.4.1. Evaluación.....	41
4.4.2. Selección	42
4.5. Métodos de cambio.....	43
4.6 Cruzamiento.	44
4.6.1 Desventajas y limitaciones.....	45
4.7. Diseño de arreglos de antena para sistemas de radiación tipo Isoflux.	45
4.8. Planteamiento del problema.	46
4.8.1. Función Objetivo.....	48
4.9 Conclusiones.....	49
Capítulo 5. Resultados de simulación.....	50
5.1. Introducción	50
5.2. Desarrollo del proceso de simulación.....	50
5.3. Consideraciones de simulación.....	50

5.4. Escenarios de simulación51

 5.4.1. Sistema de radiación Isoflux para satélites tipo GEO51

 5.4.2. Sistema de radiación Isoflux para satélites tipo MEO59

5.5. Conclusiones**69**

Capítulo 6. Conclusiones72

 6.1. Conclusiones72

 6.2 Aportaciones.....73

 6.3 Recomendaciones y trabajos a futuro.73

Literatura citada75

Lista de figuras

Figura 1. a) Sistema de radiación convencional, b) Sistema de radiación tipo Isoflux Comparación de sistema convencional y tipo Isoflux.	6
Figura 2. Satélites Sputnik I, Telstar I e ISS (Luque Ordóñez, 2013).	10
Figura 3. Órbita geoestacionaria (Sáenz et al., s/f).....	18
Figura 4. Tipos de órbitas (Satélites pequeños - GOR, s/f).....	19
Figura 5. (a) Radiación convencional con efectos causados por las distintas longitudes de camino. (b) Sistemas de radiación para distintos tipos de enlace satelital (Reyna et al., 2012).....	20
Figura 6. Sistema de radiación tipo Isoflux (Ibarra et al., 2015).....	21
Figura 7. Diagrama de radiación Isoflux de las órbitas GEO, MEO y LEO	23
Figura 8. Distintas configuraciones geométricas para los arreglos de antenas: (a) arreglo lineal unidimensional; (b) arreglo circular unidimensional; (c) arreglo elíptico unidimensional; (d) arreglo de rejilla bidimensional [Hayt, 1991].	26
Figura 9. Arreglo lineal uniformemente espaciado [Hayt, 1991].	27
Figura 10. Patrón de radiación de un arreglo lineal con 8 elementos, $N=8$ y una distancia $d = 0.5\lambda$	30
Figura 11. Contribución de los elementos individuales a la respuesta total del arreglo de antenas [Hayt, 1991]......	32
Figura 12. John Holland el primero en proponer explícitamente el cruzamiento y otros operadores de recombinación (Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a).....	37
Figura 13. El proceso se repite las iteraciones que haga falta, hasta que obtengamos soluciones suficientemente.....	39
Figura 14. El pseudocódigo asociado a este proceso.	39
Figura 15. Una mutación en un algoritmo genético también causa pequeñas alteraciones en puntos concretos de la codificación del individuo.....	43
Figura 16. El cruzamiento consiste en seleccionar a dos individuos para que intercambien segmentos de su código genético, produciendo una "descendencia" artificial cuyos individuos son combinaciones de sus padres [(Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a)].	44
Figura 17. Representación de un sistema Isoflux [(Isoflux pattern representation Download Scientific Diagram, s/f)]......	46
Figura 18. Esquema de un arreglo lineal cuyos parámetros dependerán del número de elementos de antena y separaciones entre elementos para las órbitas GEO y MEO [(Stutzman, W. L., & Thiele, s/f)].	47

Figura 19. Parámetro de diseño de una geometría lineal para generar el patrón de radiación deseado. .	48
Figura 20. a) Patrón de radiación generado a partir de 12 elementos de antena y un nivel de SLL de -24.4 dB; b) Vista en detalle de la radiación obtenida.....	52
Figura 21. a) Patrón de radiación generado a partir de 12 elementos de antena, un nivel de SLL de -28 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 6 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....	53
Figura 22. a) Patrón de radiación generado a partir de 12 elementos de antena, un nivel de SLL de -21.8 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 7.6 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....	54
Figura 23. a) Patrón de radiación generado a partir de 12 elementos de antena, un nivel de SLL de -20.42 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 8 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....	55
Figura 24. a) Patrón de radiación generado a partir de 12 elementos de antena, un nivel de SLL de -27 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 8 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....	56
Figura 25. a) Patrón de radiación generado a partir de 10 elementos de antena, un nivel de SLL de -45.4 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 8 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....	57
Figura 26. a) Patrón de radiación generado a partir de 10 elementos de antena, un nivel de SLL de -33 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 8 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....	58
Figura 27. a) Patrón de radiación generado a partir de 12 elementos de antena, un nivel de SLL de -12.6 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 14 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....	60
Figura 28. a) Patrón de radiación generado a partir de 12 elementos de antena, un nivel de SLL de -30.77 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 13 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....	61
Figura 29. a) Patrón de radiación generado a partir de 14 elementos de antena, un nivel de SLL de -14 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 13 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....	62
Figura 30. a) Patrón de radiación generado a partir de 14 elementos de antena, un nivel de SLL de -13.44 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 13 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....	63
Figura 31. a) Patrón de radiación generado a partir de 10 elementos de antena, un nivel de SLL de -21.38 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 14 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....	64

- Figura 32. a) Patrón de radiación generado a partir de 10 elementos de antena, un nivel de SLL de -14.22 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 13 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....65
- Figura 33. a) Patrón de radiación generado a partir de 10 elementos de antena, un nivel de SLL de -13.74 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 13 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....66
- Figura 34. a) Patrón de radiación generado a partir de 10 elementos de antena, un nivel de SLL de -19.3 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 14 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....67
- Figura 35. a) Patrón de radiación generado a partir de 10 elementos de antena, un nivel de SLL de -17.34 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 13 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.....68

Lista de tablas

Tabla 1. Constelaciones en diferentes órbitas geocéntricas.	16
Tabla 2. Comparativa entre órbitas geocéntricas	16
Tabla 3 valores utilizados en el algoritmo.	70
Tabla 4. valores utilizados en el algoritmo.	71

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

La primera incursión del hombre en el Espacio Ultraterrestre resultó también en la primera comunicación a distancia realizada en la historia de la humanidad por medio de un satélite desde el Espacio. El lanzamiento del Sputnik 1 no sólo permitió la llegada del hombre por primera vez al Espacio, sino que también fue un hecho fundamental de las telecomunicaciones por satélite.

Sin embargo, la exploración del Espacio Ultraterrestre con fines de uso para las telecomunicaciones se remonta hasta el año de 1945, fecha en la que Arthur C. Clarke publicó su obra *Extra-Terrestrial Relays: Can Rocket Stations Give WorldWide Radio Coverage?* (Russo et al., 1997) (*Advantages of Satellite communication, disadvantages of Satellite communication, s/f*).

Clarke fue un pionero en la investigación del Espacio con fines de implementar sistemas de telecomunicaciones mediante el uso de tecnología que ahora conocemos como Vía Satélite. Fue precisamente su propuesta de la instalación de satélites que orbitaran la Tierra para permitir la comunicación desde y hacia todos los puntos del planeta, la que se considera la piedra fundante de las telecomunicaciones satelitales. Sumado a esto, su estudio de las órbitas geoestacionarias para ubicación de satélites de telecomunicaciones fue el elemento inicial para la comunicación por medio de satélites geoestacionarios. En su artículo seminal, Clarke señala que al colocar un objeto a una distancia exacta de 35,785 kilómetros sobre la línea ecuatorial de la Tierra (42,164 km de radio desde el centro de la Tierra), debido a la masa y otras condiciones propias de la Tierra, y la fuerza de gravedad, este objeto girará a la misma velocidad angular que el planeta (casi 24 horas), permitiendo que la transmisión de señales entre uno y el otro sea permanente. Esto significa que al ubicar un satélite en órbita geoestacionaria, siempre estará ubicado en la misma posición geográfica con respecto a la Tierra, por lo cual podrá emitir permanentemente señales a una antena receptora ubicada en dicha posición geográfica. (*Advantages of Satellite communication, disadvantages of Satellite communication, s/f*)

En octubre de 1957 la entonces Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS) lanzó el primer satélite de telecomunicaciones, el Sputnik 1, con transmisores a 20 y 40 MHz en órbita inclinada de 65° entre 215 y 939 km sobre el ecuador. Los Estados Unidos de América (EUA) iniciaron diversas misiones para poner en órbita sus propios satélites artificiales, por lo que el 1 de febrero de 1958 Estados Unidos lanzó al Espacio el satélite Explorer 1 en su primera incursión del Espacio Ultraterrestre, en una órbita inclinada de

33° entre 358 y 2,550 km sobre el ecuador. El primer satélite exclusivo de telecomunicaciones enviado al espacio por los Estados Unidos fue el Echo 1 (Lanzado en agosto 12 de 1960), el cual consistía de un globo metálico construido por la NASA. En estos primeros años de exploración del Espacio también se lanzaron satélites que emitieron telecomunicaciones como lo fueron el SCORE (1958), el Telstar (1962) y el Relay 1 (1962)

Sin embargo, la mayor revolución en la implementación de satélites de telecomunicaciones se dio, tal y como lo había anticipado Clarke en su artículo de 1945, con el hecho de lograr ubicar satélites de telecomunicación en la órbita geoestacionaria. La posibilidad de contar con un satélite que girara alrededor de la Tierra a su misma velocidad angular, fue innovador y revolucionario, no sólo por el hecho de reducir sustancialmente los costos de operación, sino que permitió una transmisión y recepción constante, y consecuentemente de mayor calidad.

El primer satélite lanzado y ubicado en órbita de los satélites geoestacionarios fue el Syncom 3, lanzado por los Estados Unidos en 1964 con la intención de emitir y recibir telecomunicaciones a través del Océano Pacífico para la transmisión de los Olímpicos de Tokio 1964 al continente americano, uno de los primeros sucesos que fueron posibilitados por la operación de este satélite.

Después del lanzamiento del Syncom 3, Estados Unidos lanzó el segundo satélite geoestacionario, el Intelsat 1 (Early Bird) en abril de 1965, en esta ocasión con la finalidad de lograr la telecomunicación vía satélite a través del Océano Atlántico entre los EUA y Europa.

Al llegar la década de los 1970s Canadá lanzó su primer satélite geoestacionario, el Anik A1 (noviembre de 1972), siendo éste un satélite de cobertura nacional con la función de permitir la telecomunicación a lo largo de Canadá y los EUA.

En abril de 1974 los Estados Unidos lanzaron el primer satélite de telecomunicaciones netamente comercial. En esta fecha la NASA en asoció con la compañía Western Union para lanzar el Westar, estableciendo así la primera intervención de un ente privado en la actividad de las telecomunicaciones satelitales.

En diciembre de 1975 se lanzó el satélite Satcom 1, satélite comercial de la compañía RCA, una vez más mediante una asociación público-privada. Este lanzamiento fué crucial en el desarrollo y evolución de la transmisión de televisión satelital, ya que entre las particularidades del satélite estaba que tenía una

capacidad de comunicación ampliamente superior a sus antecesores. Por tal motivo este satélite se convirtió en el primer gran transmisor de televisión de cable por satélite de la historia, y diferentes cadenas de televisión americanas, lo utilizaron para transmitir su señal a largo del territorio estadounidense. Entre los primeros canales de televisión que reprodujeron su señal vía el Satcom 1 estaban NBC, ABC, CBS, HBO y The Weather Channel.

El Satcom 1 fue el primer satélite en ser receptor y transmisor de señales de televisión comercial de manera masiva, abriendo de esta manera la puerta al concepto moderno de telecomunicaciones comerciales masivas vía satélite.

Desde el descubrimiento de la órbita geoestacionaria (GEO), y el posterior suceso en la ubicación de múltiples satélites en la misma órbita, actualmente tenemos que la gran mayoría de los satélites de telecomunicaciones se encuentran localizados en la órbita GEO alrededor de la Tierra. Existen además otros tipos de órbitas donde se ubican satélites como lo son las órbitas bajas (Low Earth Orbit, LEO), las órbitas medias (Medium Earth Orbit, MEO), las órbitas Molniya, las órbitas altas (High Elliptical Orbit, HEO) y las órbitas polares, pero debido al fenómeno de la órbita de los satélites GEO son menos los satélites de telecomunicaciones ubicados en estas otras órbitas. En la actualidad los satélites ubicados en estas órbitas diferentes tienen otras clases de funciones. (Advantages of Satellite communication, disadvantages of Satellite communication, s/f) (Gavish, 1997) (Lourdes et al., s/f).

Las telecomunicaciones vía satélite han tenido un importante desarrollo a lo largo de los últimos años, y esta evolución es la que permite que la comunicación vía satélite sea el eje central de las comunicaciones y transmisiones de tanto televisión, telefonía, radio e internet, así como nuevas aplicaciones de transmisión de datos y redes sociales. El concepto central para el pleno desarrollo de la telecomunicación satelital se encuentra en el hecho de que además de contar con un satélite girando en una órbita geoestacionaria (contando con un transmisor a bordo), también se necesitan antenas (receptoras/emisoras) para que puedan emitir y recibir las señales hacia y desde el satélite gracias a su área de cobertura por medio de su ubicación directa en el satélite.

El proceso de una señal que viaja desde una antena emisora hacia el satélite, y este acto seguido de recibir la señal la emite hacia una antena receptora, es común para los diferentes tipos de telecomunicación por radio, o radiocomunicaciones. El elemento que varía entre las diferentes clases de comunicación es la frecuencia que utilizan. Entre estas frecuencias se encuentran las bandas anchas y las bandas más angostas, cuya diferencia se encuentra en la capacidad y potencia necesaria para efectuar la transmisión

de información correspondiente. Quien se encarga de regular el uso de las diferentes frecuencias en el espacio electromagnético y otorgar los permisos para el uso de dichas frecuencias es la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) a nivel mundial, y el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) como su contraparte en México.

Las bandas que permiten la telecomunicación comercial por medio de satélites son las bandas C (4-6 GHz) y Ku (10-14 GHz), aunque cada vez más se empieza a utilizar más la banda Ka (20-30 GHz). (Advantages of Satellite communication, disadvantages of Satellite communication, s/f). Además de esto existen diversos componentes tecnológicos que se utilizan para el adecuado proceso de la telecomunicación vía satélite. Entre los más convencionales se encuentran las tecnologías Fixed Services Satellites (FSS), la cual usa principalmente la banda C y partes bajas de la Ku, pero por su frecuencia y potencia ser muy bajas necesita una antena receptora de gran tamaño para la adecuada transmisión de señales. Por el otro lado está la Direct Broadcast Satellite (DBS), la cual opera por medio de la frecuencia superior de la banda Ku, debido a esto es que su señal puede ser recibida fácilmente por antenas pequeñas tipo plato (dish), lo que permite que sea enviada directamente a un decodificador sin complicaciones. Esta es la tecnología usada por la mayoría de compañías comercializadoras de Televisión por Cable, como lo hace en todo el continente americano DirecTv. En la actualidad se han desarrollado y se siguen desarrollando tecnologías que usan bandas más veloces, como la banda Ka, la cual apenas está comenzando su comercialización, inicialmente en aplicaciones de sistemas satelitales de alto rendimiento (High Throughput Satellites, HTS).

La capacidad de adaptar el patrón de radiación de una antena a una forma singular para satisfacer requisitos particulares de cobertura para las aplicaciones actuales es el principal beneficio del uso de los sistemas de arreglos de antenas bidimensionales. En consecuencia, los enfoques de diseño de los arreglos de antenas bidimensionales siguen siendo un campo de investigación abierto. Por ejemplo, en sistemas de antenas modernos para telecomunicaciones basados en la órbita terrestre geostacionaria (Geostationary Earth Orbit, GEO), existen importantes requisitos que se deben considerar para el diseño del sistema de antenas, como son: la simplificación del hardware, las dimensiones físicas del arreglo, la eficiencia energética y la generación de diagramas de radiación Isoflux. Estos últimos permiten iluminar uniformemente la superficie terrestre con una cobertura global (Maldonado et al., 2013; Reyna et al., 2012).

En la literatura se han propuesto contribuciones relevantes utilizando algunos enfoques deterministas para sintetizar arreglos uniformes y arreglos planares para generar una máscara de Isoflux deseable (Maldonado et al., 2013; Reyna et al., 2012). No obstante, estas contribuciones presentan las desventajas

de 1) Considerar muchos niveles de excitación (amplitudes y fases) en el arreglo de antenas complicando el sistema de disipación de calor en el satélite, y 2) El uso de geometrías uniformes, aumentando el tamaño de la red de conformación de haz. El nombre de la radiación tipo Isoflux significa de “igual flujo” y proporciona un diagrama de radiación con máximo de radiación en cierto ángulo de llegada con respecto del nadir. Es útil para poder transmitir la misma densidad de potencia e iluminar de forma uniforme la superficie de la Tierra. La radiación tipo Isoflux global es necesaria para evitar los efectos que son causados por la distancia y otros factores.

Un sistema de radiación tipo Isoflux proporciona una iluminación de la superficie de la Tierra dentro de su margen de visión en el polo ecuatorial. En este caso, un sistema de radiación convencional genera pérdidas de potencia en las partes lejanas del nadir debido a los efectos causados por las longitudes distintas que recorre la señal radiada, además del poco tiempo de visibilidad en satélites de órbita media (Medium Earth Orbit, MEO), ya que se pierde la señal y la menor atención a las estaciones necesarias en Tierra para satélites de órbita GEO, con el mismo caso para satélites de órbitas MEO.

1.2 Justificación

La radiación tipo Isoflux global es necesaria para evitar los efectos que son causados por la distancia y otros factores. Un sistema de radiación tipo Isoflux proporciona una iluminación de la superficie de la tierra dentro de su margen de visión en el polo ecuatorial, tal como se muestra en la Figura 1. En la Figura 1 se ilustra la diferencia entre un sistema de radiación convencional (Figura 1a) y un sistema de radiación tipo Isoflux (Figura 1b). En este caso, un sistema de radiación convencional genera pérdidas de potencia en las partes lejanas del nadir (por los efectos causados por las longitudes distintas que recorre la señal radiada), poco tiempo de visibilidad en satélites MEO y atención a pocas estaciones en Tierra para satélites GEO. Un sistema de radiación tipo Isoflux evita las pérdidas de potencia en puntos lejanos del nadir iluminando la tierra de manera uniforme. Las mejoras que proporciona el sistema Isoflux son:

- Potencia uniforme dentro del margen visible del satélite.
- Señal uniforme en el margen visible del satélite
- Atención a más estaciones en Tierra
- Mayor tiempo de visibilidad del satélite

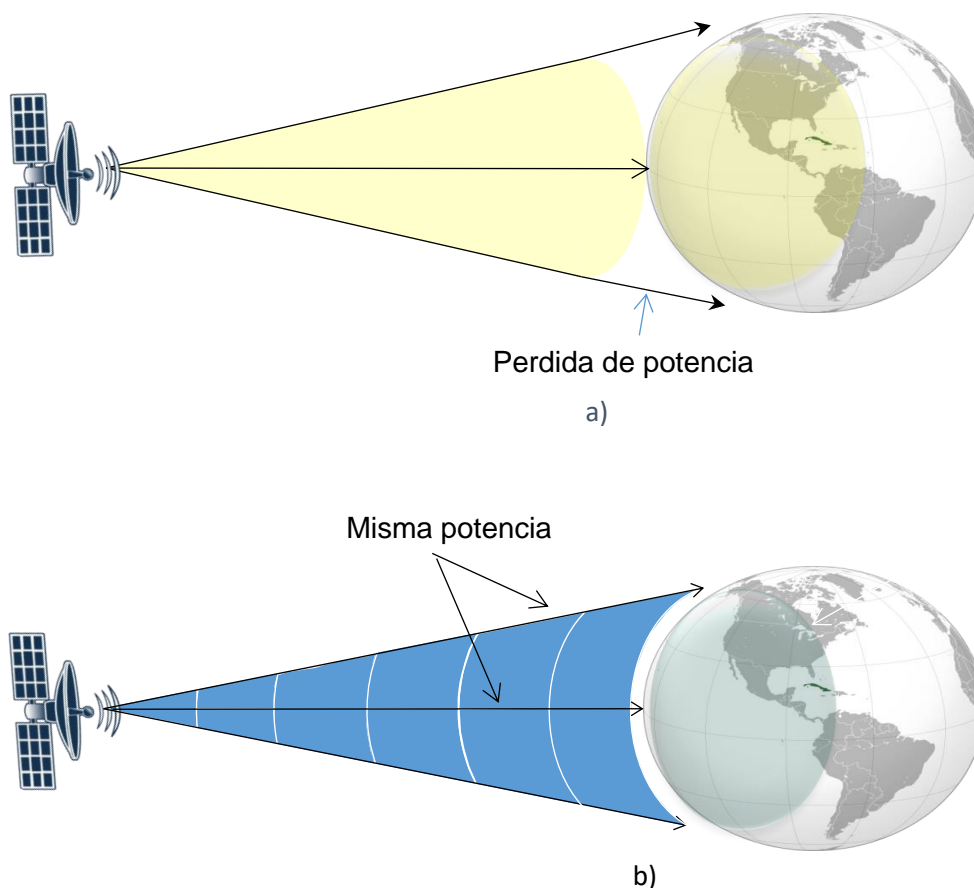


Figura 1. a) Sistema de radiación convencional, b) Sistema de radiación tipo Isoflux Comparación de sistema convencional y tipo Isoflux.

Como se mencionó en un principio, este proyecto de investigación estará enfocado principalmente al diseño de arreglos no uniformes o aperiódicos (Reyna et al., 2012), con la finalidad de mejorar el desempeño del sistema y simplificar el sistema de antenas a bordo del satélite mediante una reducción de hardware, así como de disminuir el número de excitaciones de antena para simplificar el hardware del sistema de antenas satelitales. La optimización evolutiva mediante algoritmos genéticos será evaluada y tomará un papel importante para el diseño de los arreglos de antena. Los diseños de arreglos de antena que se generarán en este proyecto de investigación podrían generar soluciones convenientes para los requerimientos de la radiación tipo Isoflux para diferentes tipos de órbitas, además de la reducción de hardware de antena que simplifique la red de formación de haz y la reducción del nivel de lóbulos laterales. Los resultados que se generen deben cumplir estas características incluso más que los resultados de investigaciones previas que se encuentran actualmente en la literatura.

El estudio en este proyecto de investigación estará basado principalmente en el diseño de arreglos no uniformes o aperiódicos con la finalidad de reducir el número de excitaciones de antena para simplificar

el hardware del sistema de antena en un satélite. Este diseño se plantea como un problema de optimización. En este caso, el problema de optimización utilizará diversas variables que fuerzan la no uniformidad de los elementos de antena de las distintas geometrías. Además, se generarán distintas reglas de diseño para arreglos no uniformes en satélites. Para solucionar este problema de optimización, se utilizará la optimización evolutiva (Método de optimización por acumulación o enjambre de partículas, el método de la armonía “harmony”, entre otros) debido a la dependencia no lineal y no convexa de los parámetros involucrados. En este caso, la optimización evolutiva es una herramienta muy apropiada para buscar los mejores modelos de diseño. La optimización evolutiva se ha aplicado de manera exitosa para resolver problemas electromagnéticos y ha recibido mucha atención debido a que pueden resolver una variedad de problemas y su implementación no es compleja. (Guney y Onay, 2011)

En este proyecto de investigación la optimización evolutiva será adaptada convenientemente para el diseño de los arreglos de antena. Los diseños de arreglos de antena que se generarán en este proyecto de investigación podrían generar soluciones aceptables para los requerimientos de la radiación tipo Isoflux para diferentes tipos de órbitas ilustrada anteriormente, la reducción de hardware de antena que simplifica la red de formación de haz y la reducción del nivel de lóbulos laterales. Los resultados que se generen cumplirán estas características incluso más que los resultados de investigaciones previas que se encuentran actualmente en la literatura. (Maldonado et al., 2013; Reyna et al., 2012).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar sistemas de radiación tipo Isoflux con la capacidad de reducir la complejidad total del sistema y manteniendo un nivel de lóbulos laterales mínimo.

1.4.2. Objetivos específicos

El objetivo principal del estudio de este proyecto es el combinar diferentes formas de diseño para definir la geometría del arreglo de antenas, y la optimización evolutiva para buscar las posiciones de los elementos de antena y las excitaciones de amplitud y fase, de manera que se genere un sistema de antena con

radiación tipo Isoflux para diferentes tipos de órbitas satelitales que simplifique la red de conformación de haz. En base a lo anteriormente mencionado, el desarrollo de este proyecto de investigación tratará de dar respuesta a las siguientes preguntas:

1. ¿Dependiendo de una aplicación en particular o tipo de órbita, ¿cuál sería el intercambio de compromisos (trade-off) entre la simplicidad del sistema y la capacidad del sistema de antena para generar la radiación Isoflux?
2. ¿Qué tipo de geometría de arreglos de antenas permite más grados de libertad en este intercambio de compromisos entre la simplicidad del sistema y la capacidad para generar la radiación tipo Isoflux?
3. ¿Qué tipo de aplicaciones de antena pudieran beneficiarse de esta teoría?

En los siguientes capítulos trataremos de dar respuesta a las preguntas arriba mencionadas:

El Capítulo 2 trata sobre el marco teórico de los tipos de satélites en órbita alrededor de la Tierra, sus coberturas y aplicaciones, así como las generalidades de la radiación Isoflux para estos tipos de órbitas.

El Capítulo 3 trata sobre el marco de la teoría de arreglos de antenas, así como sus parámetros de radiación como herramienta para generar la radiación Isoflux deseada.

El Capítulo 4 trata sobre la metodología para el diseño o aplicación de arreglos lineales en la generación de radiación tipo Isoflux en diferentes órbitas satelitales mediante el uso de algoritmos genéticos.

El Capítulo 5 describe el proceso de simulación computacional del algoritmo Isoflux usando algoritmos genéticos, y los resultados obtenidos considerando escenarios de órbitas GEO y MEO.

Finalmente, el Capítulo 6 describe las conclusiones de las simulaciones efectuadas y las potenciales aportaciones logradas por este trabajo de investigación, así como un número de recomendaciones para el uso futuro de esta metodología en el diseño de arreglos de antenas con radiación tipo Isoflux, para satélites en distintas órbitas.

Capítulo 2. Marco de referencia

2.1 Introducción: Satélites y tipos de órbitas

Un satélite se define como un cuerpo celeste opaco que solo brilla por la luz que refleja del Sol y gira alrededor de un planeta primario (Luque Ordóñez, 2013). En un concepto más amplio, un satélite se define como un cuerpo que gira alrededor de otro (denominado principal o primario) de masa preponderante, y cuyo movimiento se determina principalmente por la fuerza de atracción de este último (Luque Ordóñez, 2013). Por lo tanto, un satélite artificial es un dispositivo fabricado por el ser humano para la realización de unas funciones determinadas describiendo una trayectoria en el espacio exterior. Los satélites artificiales son enviados al espacio mediante vehículos de lanzamiento, que constituyen un tipo de cohete diseñados para enviar una carga útil al espacio exterior (Luque Ordóñez, 2013). Los satélites son empleados de forma general para llevar a cabo algún tipo de radiocomunicación, por lo que con frecuencia son denominados satélites de comunicaciones (Luque Ordóñez, 2013). Además, un satélite se dice activo si posee una estación operativa destinada a la transmisión o retransmisión de señales de radiocomunicación.

En este capítulo se establecen algunas definiciones y funciones que le han dado la singularidad y la aplicabilidad a los sistemas de comunicaciones basados en satélites. Además, se describen algunas aplicaciones y los tipos de órbitas satelitales, que nos ayudarán a establecer las ideas que se requieren para plantear el problema de diseño de esta tesis de investigación.

2.2 Origen de los satélites artificiales

El empleo de satélites artificiales es relativamente reciente. La primera referencia a este término la realiza el escritor británico Arthur C. Clarke en 1945, cuando publicó el artículo titulado “Extra-terrestrial relays” en la revista británica *Wireless World*, incluyendo la propuesta de un sistema de comunicación global usando estaciones espaciales construidas por el ser humano (Luque Ordóñez, 2013). En este artículo, Clarke sugirió que podían eliminarse todos los cables utilizados para telefonía, si se instalaban 3 estaciones de comunicaciones espaciales en cierta órbita y a cierta altura, tales que pudieran transmitir señales cubriendo toda la superficie del planeta. Esta propuesta sirvió de base posteriormente para el uso de la órbita geoestacionaria, también llamada por ello órbita o cinturón de Clarke (Luque Ordóñez, 2013).

El empleo de satélites artificiales se vio claramente impulsado por la guerra fría. El primero enviado al espacio fue el Sputnik I, lanzado por la Unión Soviética el 4 de octubre de 1957 en una órbita elíptica de baja altura. Este satélite, no tripulado, únicamente emitía un tono intermitente, y estuvo funcionando durante 21 días. En ese mismo año el Sputnik II puso al primer pasajero en órbita, la famosa perra Laika, estando 162 días en órbita. El primer ser humano en viajar al espacio fue el ruso Yuri Gagarin, a bordo del Vostok I en 1961 (Luque Ordóñez, 2013).

Por otro lado, los Estados Unidos crearon su agencia espacial y el 31 de enero de 1958 lanzaron al espacio desde Cabo Cañaveral el satélite Explorer. Más tarde, el 10 de julio de 1962, lanzaron el Telstar 1, el primer satélite con capacidad bidireccional para transmitir y recibir simultáneamente información, empleado para transmitir señales de televisión entre Estados Unidos y Europa (Luque Ordóñez, 2013).

Desde entonces, miles de satélites han sido enviados a diferentes órbitas del espacio con múltiples propósitos. La gran mayoría prestan servicios de radiocomunicaciones orbitando alrededor de la Tierra. También se encuentran satélites orbitando alrededor del Sol y de otros planetas.

El satélite artificial más grande que se ha construido hasta la fecha es la Estación Espacial Internacional (ISS), estación de investigación fruto de la colaboración de varios países, que ha sido construido en órbita ensamblando en el espacio las diferentes partes enviadas en fases sucesivas de construcción. La ISS orbita alrededor de la Tierra a unos 360 kilómetros de altitud y mide 108 metros de largo y 88 metros de ancho. En la figura 2 se ilustran los satélites Sputnik I, Telstar y la ISS.



Figura 2. Satélites Sputnik I, Telstar I e ISS (Luque Ordóñez, 2013).

2.3 Aplicaciones de los satélites artificiales

Se estima que desde el lanzamiento del Sputnik I en 1957 se han enviado al espacio más de 15.000 satélites artificiales. En la actualidad, sin contar con aquellos destinados a uso militar, se encuentran operando más de 1.000, de los cuales en torno a 400 se ubican en la órbita geoestacionaria. Los satélites artificiales se emplean para múltiples aplicaciones, todas ellas basadas en la recepción, almacenamiento y reenvío de información (Miles, 1995). Existen muchas aplicaciones y servicios de radiocomunicación de las cuales podemos mencionar las siguientes (Miles, 1995).

- Enlaces entre estaciones fijas o móviles, a través de repetidores situados en una órbita alrededor de la Tierra.
- Servicio de radiodifusión por satélite, de tipo punto a zona.
- Servicios de meteorología por satélite.
- Servicio móvil por satélite entre estaciones de base fija y terminales móviles.
- Servicio fijo por satélite entre múltiples puntos fijos.
- Servicios de localización y navegación por satélite.
- Servicios de exploración de la Tierra por satélite.
- Servicios de investigación del espacio exterior desde telescopios espaciales.
- Servicios de telemando y telemedida.
- Servicios de radioaficionados por satélite.

Entre otros muchos ejemplos, los servicios anteriores se pueden ubicar en aplicaciones tan útiles como la telefonía móvil vía satélite, tareas de salvamento marítimo, ayuda al aterrizaje de aeronaves, estudios del comportamiento de la litósfera, estudio de radiaciones en el espacio exterior, difusión de eventos televisivos en directo a escala mundial, comunicaciones privadas corporativas, etc.

Además, las aplicaciones que usan satélites y establecen una comunicación directa con el usuario final (por ejemplo, la televisión digital por satélite), se diseñan de manera que las antenas de usuario sean de tamaño y precio razonables. Por ejemplo, el sistema VSAT (Very Small Aperture Terminal, terminales de pequeña abertura) está pensado para aplicaciones de control distribuido con una estación central y múltiples terminales en una amplia zona geográfica. La ganancia y tamaño de los terminales VSAT son muy reducidos comparados con la estación central (Miles, 1995).

Aplicaciones en función del tratamiento de la información.

Reenvío de información (función de repetidor).

Obtención de información (función de recolector).

La función recolectora, empleada en los servicios científicos de radiocomunicaciones, obtiene la información mediante sensores pasivos o activos. Los primeros son instrumentos de medida, empleados en el servicio de exploración de la Tierra por satélite o en el servicio de investigación espacial, mediante los cuales se obtiene información por recepción de ondas radioeléctricas de origen natural. Los segundos, utilizados en el servicio de exploración de la Tierra por satélite o en el servicio de investigación espacial, mediante los cuales se obtiene información por emisión y recepción de ondas electromagnéticas. Un ejemplo de sensor pasivo es un telescopio espacial, y una sonda espacial es un ejemplo de sensor activo.

2.4 Ventajas e inconvenientes de los satélites artificiales

Los satélites artificiales poseen diversas ventajas que los hacen idóneos para su empleo en radiocomunicaciones (Advantages of Satellite communication, disadvantages of Satellite communication, s/f):

No dependen de fronteras ni barreras físicas.

Son muy estables en su funcionamiento.

La señal se propaga por el espacio libre, con márgenes de desvanecimiento muy reducidos.

Sustituyen o complementan las comunicaciones terrenas, inalámbricas o cableadas.

Permiten grandes coberturas, alcanzando el 100% de la población con pocos satélites.

Permiten comunicaciones de ancho de banda grande.

Sin embargo, las comunicaciones por satélite también poseen algunos inconvenientes de consideración.

Los más importantes son los siguientes (Advantages of Satellite communication, disadvantages of Satellite communication, s/f):

- Pueden emplearse pocas bandas de frecuencia. En la práctica, limitado a bandas C, Ku y Ka.

- Existe un elevado retardo de propagación (en órbitas GEO, de 250 ms).
- Los gases atmosféricos y la climatología producen atenuaciones importantes.
- Se necesita una potencia elevada de transmisión (equipos caros) para distancias grandes.
- Normalmente existe asimetría en los enlaces de subida y de bajada.

El procedimiento de construcción, puesta en órbita y dotación de combustible de los satélites es de costo muy elevado. Los satélites poseen una vida útil limitada, lo que obliga a amortizar la inversión.

Las órbitas son limitadas. GEO está muy saturada, LEO también muy poblada.

Los procesos de gestión y mantenimiento de un satélite son complejos.

2.5 Órbitas satelitales.

2.5.1 Coberturas y conceptos para determinación de una órbita

Una órbita es una trayectoria que describe, en relación a un sistema de referencia dado, el centro de gravedad de un satélite o de otro objeto espacial, por la acción principal de fuerzas naturales, en particular la de gravitación (ESA - Types of orbits, s/f) (ESA - Types of orbits, s/f).

El período orbital o de revolución de un satélite es el intervalo de tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos de un satélite por un punto característico de su órbita. A su vez, la inclinación de una órbita es el ángulo que forma el plano de la órbita del satélite con el plano principal de referencia (en el caso de la Tierra, con el ecuador terrestre) (ESA - Types of orbits, s/f).

El apogeo es el punto más lejano en la órbita de un satélite, esto es, la distancia máxima con respecto al centro del cuerpo principal que alcanza un satélite en su recorrido orbital. Por el contrario, perigeo es el punto más cercano, es decir, la distancia mínima. Para determinar la posición de un cuerpo en el espacio en cualquier instante, es necesario conocer su órbita respecto de un sistema de referencia, así como la posición de su centro de gravedad sobre la misma (ESA - Types of orbits, s/f).

Para esto último es necesario conocer su altitud (en el caso de la Tierra, respecto del nivel del mar), latitud (norte o sur, plano de referencia el ecuador) y longitud (este u oeste, plano de referencia el meridiano de Greenwich). Adicionalmente, para el posicionamiento del satélite y en especial de su antena receptora, es necesario determinar su ángulo de elevación y su ángulo de azimut.

Ambos dependen de la posición de la estación terrena (latitud y longitud), así como de la posición del satélite en órbita (latitud y longitud) (ESA - Types of orbits, s/f). A continuación se presentan las definiciones de los ángulos de elevación y azimut (ESA - Types of orbits, s/f; Luque Ordóñez, 2013):

Ángulo de elevación. Es el ángulo formado entre el eje horizontal y la dirección de una onda radiada desde una antena de la estación terrena hacia el satélite. El ángulo de elevación mínimo aceptable es de 5° , y el error máximo aceptable de 0.2° . A menor ángulo de elevación, mayor será la distancia que una onda propagada debe atravesar en la atmósfera de la Tierra, lo que provoca pérdidas por absorción.

Ángulo de azimut. Es el ángulo de apuntamiento horizontal de una antena, es decir, el ángulo que hay que girar la antena (hacia este u oeste) desde el polo norte terrestre (norte magnético) hasta ubicarse en la línea del satélite.

2.6 Tipos de órbita

Las órbitas pueden clasificarse de acuerdo a diversos criterios (ESA - Types of orbits, s/f):

Según el centro (cuerpo primario) de la órbita. Puede ser galactocéntrica (galaxia), heliocéntrica (Sol), geocéntrica (Tierra), areocéntrica (Marte) o lunar (Luna).

Según su excentricidad. Existen circulares (cerradas), elípticas (cerradas), parabólicas (abiertas), hiperbólicas (abiertas) o radiales (abiertas o cerradas).

Según su inclinación. Son inclinadas (por ejemplo, la órbita polar se encuentra inclinada 90° respecto del plano ecuatorial) o no inclinada (por ejemplo, la órbita ecuatorial en el plano del ecuador terrestre).

Según la sincronía del período de rotación del satélite respecto del cuerpo primario. Son síncronas, subsíncronas o supersíncronas.

Según el sentido de rotación. Son prógradas o retrógradas.

Según la altitud del satélite. Bajas, medias, altas, etc., según unos límites flexibles.

Esta última es la clasificación más habitual. La distancia de las órbitas respecto del centro terrestre viene determinada por diversos factores, entre otros: coberturas, retardos, número de satélites, inclinación de la órbita, tele operación, envío al espacio, vida útil o posición de los cinturones de radiación, entre otros. Los cinturones de radiación son concentraciones de partículas cargadas de energía debidas a la interacción de la magnetósfera terrestre con la radiación cósmica y el viento solar. Estas partículas impiden el buen funcionamiento del satélite, por lo que se debe evitar su ubicación en estas regiones del espacio. Existen dos cinturones de radiación: interior y exterior (ESA - Types of orbits, s/f).

Así, según la distancia de la órbita al centro terrestre, pueden clasificarse genéricamente como:

- De altitud baja (LEO, Low Earth Orbit). Para distancia entre 500 y 1,500 kilómetros. No pueden ser más bajas para evitar coberturas y pequeñas fricciones con la capa superior de la atmósfera, y tampoco pueden ser mayores para evitar el primer cinturón de radiación. Se usan constelaciones para cubrir el área de servicio.
- De altitud media (MEO, Medium Earth Orbit). Entre 6,000 y 11,000 kilómetros, entre el primer y el segundo cinturón de radiación, y también existen en torno a los 20,000 kilómetros de altitud. Las órbitas MEO circulares se denominan ICO (Intermediate Circular Orbit).
- Órbita geoestacionaria (GEO, Geostationary Orbit). Situada a 35,788 kilómetros, en ella el satélite gira solidariamente con la Tierra aparentando estar en un punto fijo. Elípticas (HEO, High Elliptical Orbit). Cubren regiones no alcanzables por GEO.

En las órbitas geocéntricas (una órbita alrededor de la tierra), cuya referencia es el centro de gravedad terrestre, las órbitas LEO y MEO están destinadas a constelaciones de satélites pequeños. Las órbitas HEO, por su parte, permiten dar cobertura a los polos terrestres. Y la órbita GEO es la más saturada, debido a su idoneidad para ubicar en ella satélites de comunicaciones. La Tabla 1 muestra las constelaciones en las diferentes órbitas geocéntricas y la Tabla 2 una comparación entre diferentes tipos de órbitas (geocéntricas).

Si bien la órbita más utilizada para las radiocomunicaciones es la geoestacionaria, existen múltiples servicios prestados por constelaciones de satélites en otras órbitas geocéntricas. Cada una de ellas tiene sus ventajas y sus inconvenientes, que las hacen más adecuadas para unos determinados servicios.

Tabla 1. Constelaciones en diferentes órbitas geocéntricas.

	LEO	MEO	GEO	HEO
Tipo de orbita	Circular	Circular	Circular, geosíncrona y ecuatorial	Elíptica, perigeo de cientos de km, apogeo de miles de km.
Área de cobertura	Total, con constelaciones	Total, con constelaciones	120° en longitud y 80 °en latitud	Diseñados para cubrir un area bajo el apogeo
Retardo	Muy bajo	100 – 200 ms	250 ms	250 ms (apogeo)
Congestión	No	No	Si	No
Seguimiento en tierra	Antenas de baja ganancia, patrones hemisféricos	Antenas de baja ganancia con patrones hemisféricos	Antena fija en tierra: satélite fijo en un punto del espacio	Antenas fijas para el sector más lento del apogeo
Potencia y ganancia	Potencia de transmisión baja	Potencia de transmisión baja	Antena de alta ganancia en el satélite	Antena de alta ganancia en el satélite
Efecto doppler	Alto	Medio	No	Bajo
Coste lanzamiento	Medio, con constelaciones	Medio, con Constelaciones	Muy alto	Alto
Daño por radiación	No pasan por cinturones de radiacion	Solo durante el lanzamiento	Solo durante el lanzamiento	Paso breve en cada órbita.

Tabla 2. Comparativa entre órbitas geocéntricas

	NOMBRE	NÚMERO	ALTITUD (KM)	INCLINACIÓN (°)
LEO	ISS	1	360-400	51,64
	ORBCOMM	29	785	45
	GLOBALSTAR	48	1.414	52
	IRIDIUM	66	765	86
MEO	GPS	24	20.200	55
	GLONASS	24	19.132	64,8
GEO	ASTRA	16	35.788	0
	HISPASAT	7	35.788	0
	GOES	4	35.788	0
	METEOSAT	3	35.788	0
	INTELSAT	63	35.788	0
	INMARSAT	12	35.788	0
	THURAYA	3	35.788	0
HEO	MOLNIYA	4	35.788	63,4

En general, cada tipo de órbita posee características propias que la hacen más adecuada para una aplicación u otra. Factores como el retardo, la necesidad de seguimiento, la necesidad de cobertura, la potencia o el coste influyen en el diseño de soluciones de comunicaciones por satélite.

Además de satélites activos, en las órbitas se encuentra la denominada basura o chatarra espacial, consistente en cualquier objeto artificial sin utilidad que orbita la Tierra. Suelen ser restos de cohetes o satélites procedentes de explosiones y colisiones, o bien satélites que han finalizado su vida útil, pero continúan orbitando.

Esta chatarra espacial es peligrosa para los satélites operativos, ya que puede dañarlos o inutilizarlos, por lo que a los satélites que finalizan su vida útil se les ubica en una órbita diferente llamada órbita cementerio, en la que estos satélites inactivos orbitan sin colisionar con satélites activos ni caen descontrolados a la superficie terrestre.

2.6.1 Órbita geoestacionaria (GEO).

Una órbita geosíncrona es una órbita geocéntrica que tiene el mismo período orbital que el período de rotación sideral de la Tierra (23h, 56m, 4,01s), como se muestra en la figura 2. Una órbita geoestacionaria es una órbita geosíncrona que es además circular y ecuatorial, manteniendo por tanto su posición relativa respecto de la superficie terrestre. Su radio es de unos 35,788 kilómetros sobre el nivel del mar. A esta distancia se igualan la fuerza centrífuga del satélite (debido a que la velocidad angular de rotación provoca una aceleración normal) con la fuerza centrípeta del mismo (provocada por la atracción gravitacional terrestre) (Howell, Elizabeth. 2015. What Is a Geosynchronous Orbit? | Space, s/f).

Un satélite geoestacionario es un satélite cuya órbita es geoestacionaria y por ello está fijo respecto de la Tierra. En la práctica, la órbita geoestacionaria no es exacta, ya que el satélite se desvía de su órbita debido a los campos gravitacionales de la Luna y el Sol y a otras perturbaciones como el viento solar. Así, los satélites ubicados en la órbita geoestacionaria deben emplear propulsores para corregir su posición y orientación de manera que se mantengan en dicha órbita. La órbita geoestacionaria, circular y ecuatorial, tienen el mismo período de rotación que la Tierra, por lo que tiene su misma velocidad de rotación angular. A la distancia de esta órbita, con un haz de antena de 17° se consigue cubrir el planeta completo (salvo los polos) con solo 3 satélites. (Howell, Elizabeth. 2015. What Is a Geosynchronous Orbit? | Space, s/f)

El hecho de que en esta órbita el satélite mantenga una posición fija relativa respecto de la superficie terrestre la hace idónea para las comunicaciones, ya que las estaciones deben apuntar a una única posición sin cambiar su orientación en el tiempo, y no necesitan buscar el satélite. Esta órbita además no se ve afectada por los cinturones de radiación. Su principal inconveniente es que el retardo es elevado, alrededor de 250 ms para el tiempo de ida y vuelta de la señal (What Is a Geosynchronous Orbit? | Space, s/f). véase lo anteriormente mencionado en la fig. 2.

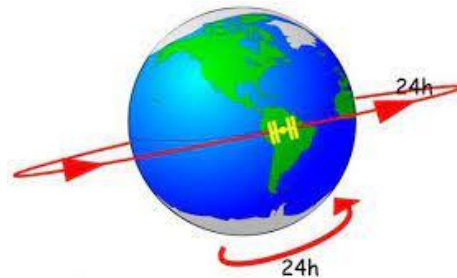


Figura 3. Órbita geoestacionaria (Sáenz et al., s/f).

Los satélites geoestacionarios son caros de desplegar, debido a la lejanía de la órbita y a la necesidad de equipo de lanzamiento (cohetes) muy complejo. La operación de dichos satélites también es complicada debido a los retardos, si bien los procedimientos empleados ya están muy extendidos.

Por otro lado, la órbita geoestacionaria es única, lo que hace que sea un recurso natural limitado, que debe gestionarse internacionalmente en el seno de la UIT (Unión Internacional de las Telecomunicaciones), órgano encargado de la coordinación y armonización internacional en el uso del espectro electromagnético y la órbita geoestacionaria. Así, los satélites geoestacionarios deben compartir un espacio y espectro de frecuencia limitados, dentro de un arco específico en una órbita geoestacionaria. Para ello, a cada satélite de radiocomunicaciones se le asigna una longitud en la órbita geoestacionaria (la latitud es en este caso de 0° o de aproximadamente 0°), dependiendo su posición, entre otros factores, de la banda de frecuencias utilizada. La separación espacial requerida depende de las siguientes variables (Howell, Elizabeth, 2015. What Is a Geosynchronous Orbit? | Space, s/f):

- Frecuencia de la señal portadora.
- Potencia de la portadora de transmisión.
- Técnicas de codificación y modulación empleadas.

- Límites aceptables de interferencia.
- Ancho de haz y radiación del lóbulo lateral de la estación terrena y antenas del satélite.

2.6.2 Órbita de Media Altura (MEO)

Los satélites de órbitas bajas (MEOS, por sus siglas en inglés), son aquellos satélites que se encuentran entre las órbitas bajas (LEO) y la órbita geostacionaria (GEO). Estas órbitas se localizan entre los límites de las órbitas bajas (4,000 km) y el límite inferior de la órbita geostacionario (35,000 km). Las alturas orbitales comunes que usan los MEOS están entre los 18,000 y los 24,000 km de altura sobre la superficie de la Tierra.

Debido a su altura orbital, los MEOS tienen periodos orbitales que están entre las 6 y las 12 horas por cada circunferencia alrededor de la Tierra, por lo que en casos de sistemas espaciales en órbitas MEO se utilizan varios satélites consecutivos en cada órbita, y sincronizados con otras órbitas, para dar cobertura global. El arreglo de múltiples satélites que trabajan en varios planos orbitales de manera coordinada se conoce como Constelación de satélites.

El uso más común de estas órbitas en los sistemas satelitales de navegación global, como el Sistema de Posicionamiento Global por satélite (GPS, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de América, o el Sistema de Navegación Global por Satélite de la Federación Rusa (GLONASS, por sus siglas en inglés). En la actualidad, aparte de los sistemas de satélites aquí mencionados, hay pocos satélites operando en la órbita MEO. (Satélites pequeños - GOR, s/f).

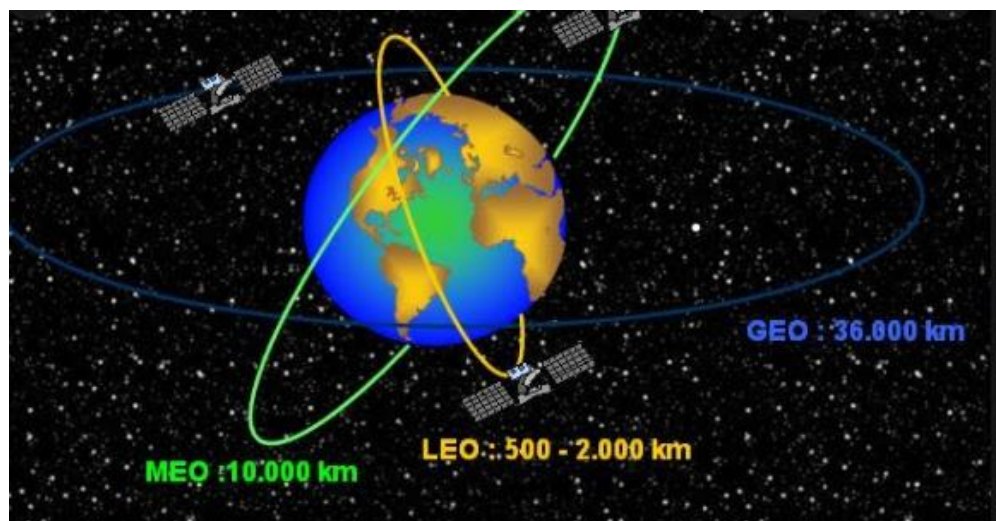


Figura 4. Tipos de órbitas (Satélites pequeños - GOR, s/f).

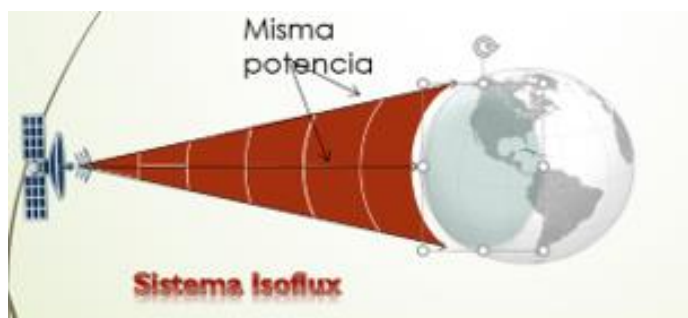
2.7 Radiación tipo Isoflux

Existen importantes requisitos en los sistemas de telecomunicaciones modernos basados en la órbita terrestre geoestacionaria (GEO) para la transmisión de televisión, posicionamiento global o incluso servicios de pronóstico del tiempo como: la simplificación del hardware de la antena (como las dimensiones físicas y la eficiencia energética) y una radiación Isoflux, es decir, una cobertura global uniforme para iluminar la superficie terrestre (Gavish, 1997; Gavish y Kalvenes, 1997; Reyna et al., 2012; Stutzman, W. L., & Thiele, s/f). En esta tesis nos enfocaremos en el segundo aspecto.

La radiación Isoflux es aquella que tiene una forma elíptica (o “cuneta”) en el lóbulo principal para adaptarse a la forma de la Tierra, la cual se considera que no es completamente redonda. En la figura 4 se ilustra una diferencia entre un sistema de radiación convencional donde se tienen efectos causados por las distintas longitudes de camino fig. 5(a), y un sistema de radiación tipo Isoflux, fig. 5(b). En el caso de la radiación tipo Isoflux, la radiación del sistema llega con la misma potencia a la superficie terrestre por lo que no presentaría los efectos que se tienen en un sistema tradicional.



(a)



(b) Radiación tipo Isoflux

Figura 5. (a) Radiación convencional con efectos causados por las distintas longitudes de camino. (b) Sistemas de radiación para distintos tipos de enlace satelital (Reyna et al., 2012).

Los efectos ocasionados por las distintas longitudes de camino serían las siguientes (Reyna et al., 2012):

- Efectos ocasionados por distancia y atenuación atmosférica.
- Pérdida de potencia en partes lejanas del nadir y zenith.
- Atención a pocas estaciones en tierra (GEO)
- Efectos ocasionados por distancia y atenuación atmosférica.
- Pérdida de potencia en partes lejanas del nadir y zenith.
- Atención a pocas estaciones en tierra (GEO)
- Las ventajas que se tienen al tener un sistema de radiación Isoflux son:
- Potencia uniforme dentro de su margen visible del satélite.
- Atención a más estaciones en tierra.
- Mayor tiempo de visibilidad del satélite.
- Menor cantidad de satélites.
- Niveles bajos de nivel de lóbulos laterales (SLL).

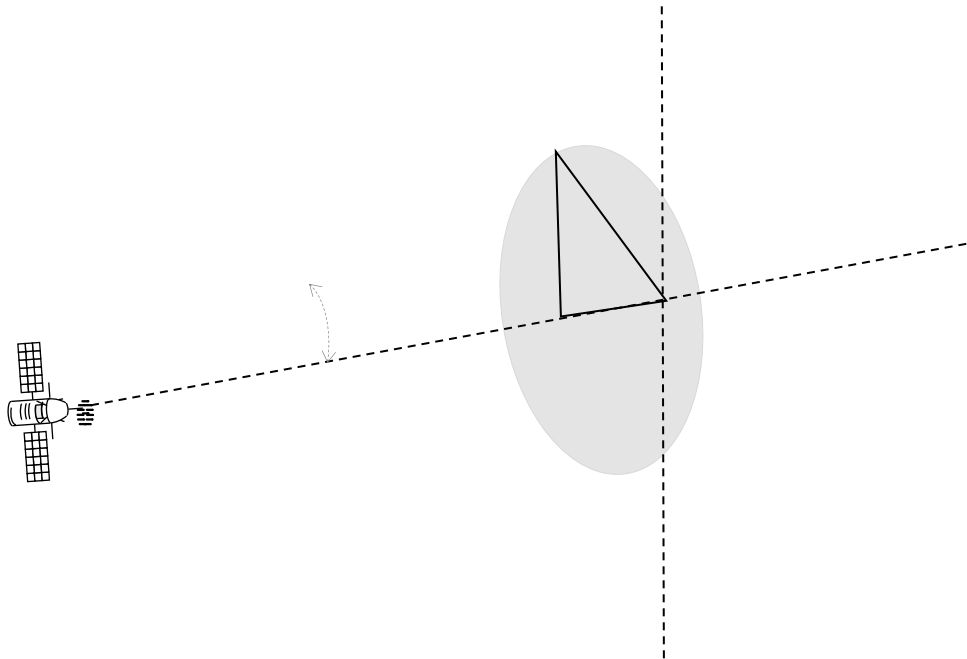


Figura 6. Sistema de radiación tipo Isoflux (Ibarra et al., 2015)

En esta tesis de investigación se propone determinar una radiación que permita iluminar de forma uniforme la Tierra desde un margen visible del satélite. La radiación que emite el satélite presenta limitaciones debido a la curvatura de la Tierra (Reyna et al., 2012). Para contrarrestar los efectos causados por la distancia entre el satélite y la Tierra y condiciones atmosféricas, mencionados anteriormente, se requiere emplear un sistema de radiación tipo Isoflux en el enlace de bajada. Este sistema le permite al satélite cubrir la superficie de la tierra dentro de su margen de visión en el polo ecuatorial, como se muestra en la figura 6. Con esto se logra una cobertura de la Tierra de forma uniforme, evitando las pérdidas de potencia en los puntos lejanos del nadir (Gavish y Kalvenes, 1997).

Para determinar la proporción en la que debe aumentar θ y obtener los parámetros del sistema de radiación Isoflux se aplica la ecuación 1, obtenida a partir de la figura 6. De acuerdo con la información de WGS84 (World Geodetic System 84) (Ibarra et al., 2015), el radio polar de la Tierra es $b=6.356.752,3142$ metros, el radio ecuatorial de la Tierra es $a=6.378.137$ metros, $h=36000$ km para GEO y 20000 km para MEO (Ibarra et al., 2015), como se observa en la Figura 6. Es decir, la radiación Isoflux se puede calcular como una función de la distancia relativa del satélite a cualquier punto de la superficie de la Tierra iluminada $R_s(\theta)$ en el área de cobertura del plano de elevación, es decir:

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

donde $R_s(\theta)$ indica la distancia del satélite a cualquier punto de la superficie de la Tierra, h representa la altura del satélite en km, y Re es la distancia del centro de la Tierra a cualquier punto de la superficie de la Tierra (Ibarra et al., 2015). El patrón de radiación o diagrama será como una elipse que tendrá una depresión (o “cuneta”) en el haz principal (Ibarra et al., 2015).

En el caso de los satélites GEO, la radiación tipo Isoflux requerida tendrá una depresión en el haz principal (centro) es decir: la potencia máxima en aproximadamente $\theta=-9^\circ$ y 9° y una atenuación en dirección del nadir ($\theta = 0^\circ$) de -1.31 dB (Reyna et al., 2012), como se muestra en la figura 7. Para el caso de los satélites MEO la potencia máxima estará aproximadamente en $\theta=-14^\circ$ y 14° , y se tendrá una depresión en el centro en cero grados con una potencia de -2.1 dB.

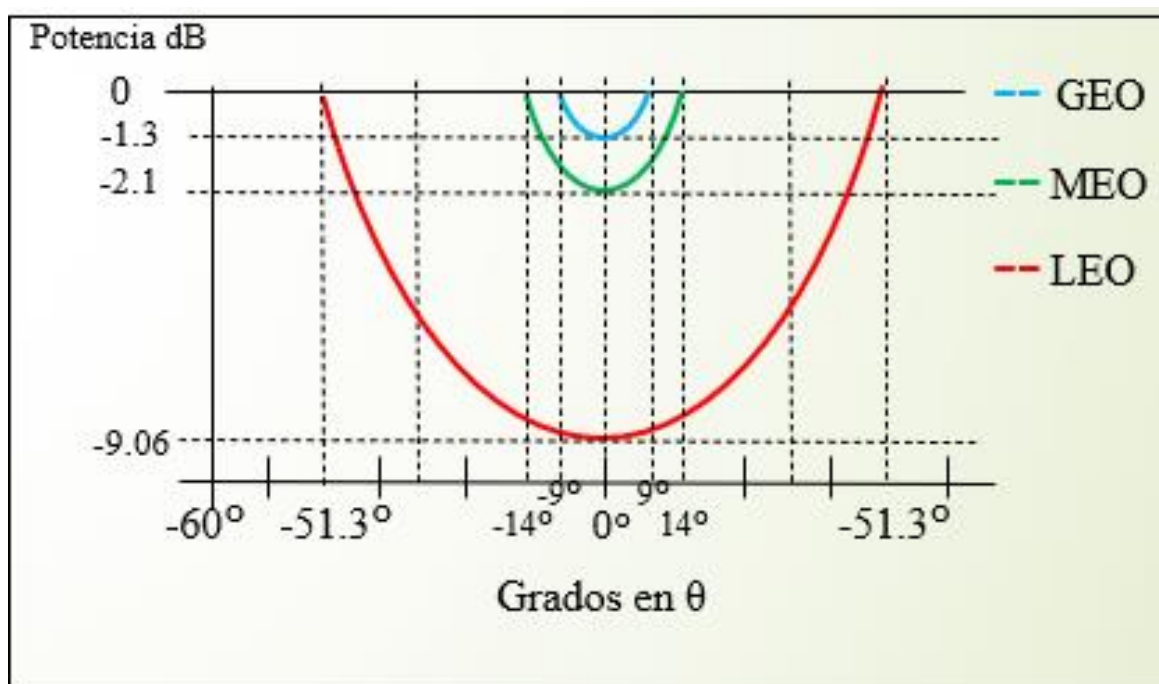


Figura 7. Diagrama de radiación Isoflux de las órbitas GEO, MEO y LEO

2.8 Conclusiones

Los satélites han tenido una gran influencia en la vida de cada uno de nosotros. Estos han causado un gran impacto en las actividades que ha desarrollado la humanidad. Muchas de las actividades de comunicación y entretenimiento tienen en base a los satélites, las señales de televisión por cable, radios celulares, GPS y muchas otras más son ejemplos de las aplicaciones que podemos tener con este tipo de tecnología basada en satélites. Hoy en día están emergiendo nuevas aplicaciones basadas en satélites y que nos ayudarán a mejorar notoriamente la calidad de vida del ser humano. Por lo tanto, estas nuevas aplicaciones demandan una mejora en los diferentes bloques de estos sistemas para cumplir los requerimientos. En nuestro caso, el sistema de radiación Isoflux podría ayudar a mejorar el diseño de los sistemas de radiación satelitales al tener una radiación que ilumine de manera uniforme la superficie del globo terráqueo, sin tener los efectos de pérdidas por la distancia o la altura del satélite y las mismas condiciones atmosféricas. En este capítulo se analizó el marco teórico de los satélites, sus diferentes tipos de órbitas y la radiación Isoflux requerida en este tipo de orbitas satelitales. En el siguiente capítulo se establecerá un marco teórico para abordar el tema de arreglos de antenas que nos servirán de herramienta para generar la radiación Isoflux deseada.

Capítulo 3. Arreglos de antena

3.1 Introducción

Las antenas colectan del espacio la energía de las señales para propósitos de recepción, y la distribuyen para propósitos de transmisión. En aplicaciones donde se requiere localizar a los usuarios que transmiten, como en el caso de los sistemas de antenas inteligentes, la forma en que se colecta del espacio la energía de las señales tiene un gran impacto en las prestaciones del sistema de comunicaciones. Una agrupación o arreglo es un sistema de antena compuesto por un número de radiadores idénticos ordenados regularmente y alimentados para obtener un diagrama de radiación predefinido. Un arreglo de antenas es la interfaz directa entre el entorno espacial de las señales electromagnéticas y el procesamiento de las mismas. Cada arreglo de antenas está conformado por un número finito de elementos, colocados de acuerdo a una forma geométrica, espaciados entre sí cierta distancia, medida en base a la longitud de onda (λ) de las señales electromagnéticas de interés. Los elementos del arreglo de antena son considerados en recepción como sensores y en transmisión como radiadores. Ambos fungen como transductores, por lo que convierten las señales electromagnéticas que inciden en ellos en corrientes eléctricas y viceversa.

3.2 Justificación del uso de arreglos de antenas.

El uso de antenas de un solo elemento no satisface siempre requerimientos específicos, ya que por una parte se cuenta tan solo con una perspectiva de recepción de señales, lo cual proporcionará una muestra escasa de las señales existentes en el espacio, y por otra, la radiación que se puede obtener es relativamente amplia, lo que resulta en una baja directividad. Todo arreglo de antenas tiene la misión de realizar un muestreo espacial del entorno que lo rodea, con el objetivo de conocerlo y definir su comportamiento en determinado instante de tiempo, mediante el procesamiento de la información proporcionada por dicho muestreo espacial.

Con los arreglos se tiene la ventaja de que se puede controlar la amplitud de las corrientes y la fase de cada elemento, como por ejemplo en los arreglos de fase, modificando la forma del diagrama de radiación. Además, se puede conseguir que los parámetros de antena dependan de la señal recibida a través de circuitos asociados a los elementos radiantes. Además, podemos dirigir la señal de un lugar a otro sin

necesidad de estar reorientando continuamente la antena o incluso formar radiaciones de alguna forma específica, porque es algo que se puede hacer electrónicamente: manipular las características de la radiación.

3.3 Diferentes Estructuras de Arreglos de Antenas

Hay diferentes tipos de arreglos de antenas. Los arreglos lineales tienen los elementos dispuestos sobre una línea recta. Los arreglos planos son agrupaciones bidimensionales cuyos elementos están sobre un plano. La configuración geométrica en la que se disponen los elementos individuales para formar el arreglo de antenas puede ser de diversos tipos. Dependiendo de la geometría, se tendrán ciertas características de cobertura angular y se tendrá una resolución ya sea unidimensional, bidimensional o tridimensional. (Monzingo et al., 2011)

En la figura 7, se muestran cuatro ejemplos de distintas configuraciones geométricas para los arreglos de antenas. En el primer ejemplo de la fig. 8(a), se muestra un conjunto de elementos dispuestos sobre una línea recta, y separados una distancia d entre ellos. A este tipo de configuración se le conoce como arreglo lineal. El arreglo lineal es una configuración unidimensional con el cual se puede direccionar el lóbulo principal dentro de un sector angular en el plano horizontal, esto es, tan solo se pueden usar ángulos azimutales. En el segundo ejemplo 8(b), se muestra la vista superior de un arreglo circular. Como puede observarse, los elementos se encuentran dispuestos sobre una circunferencia de radio R con un espaciamiento uniforme entre ellos de $l = 2\pi/N$, donde N representa el número de elementos que forman el arreglo. El arreglo circular es una estructura unidimensional con la que se puede direccionar el lóbulo principal en todos los ángulos azimutales. En el tercer ejemplo 8(c), se muestra otra estructura dimensional conocida como arreglo elíptico. En este caso los elementos se encuentran equi-espaciados entre sí. Con el arreglo elíptico también se pueden formar lóbulos principales en cualquier dirección angular azimutal, sin embargo, los lóbulos serán más directivos que aquellos formados por un arreglo lineal o un circular. En el cuarto y último ejemplo 8(d), se muestra la vista frontal de una estructura bidimensional conocida como arreglo de rejilla. Los elementos se encuentran equi-espaciados tanto horizontal como verticalmente por una distancia d . Este tipo de arreglo puede formar un lóbulo principal a un cierto ángulo sólido, esto es, a un cierto ángulo de elevación.

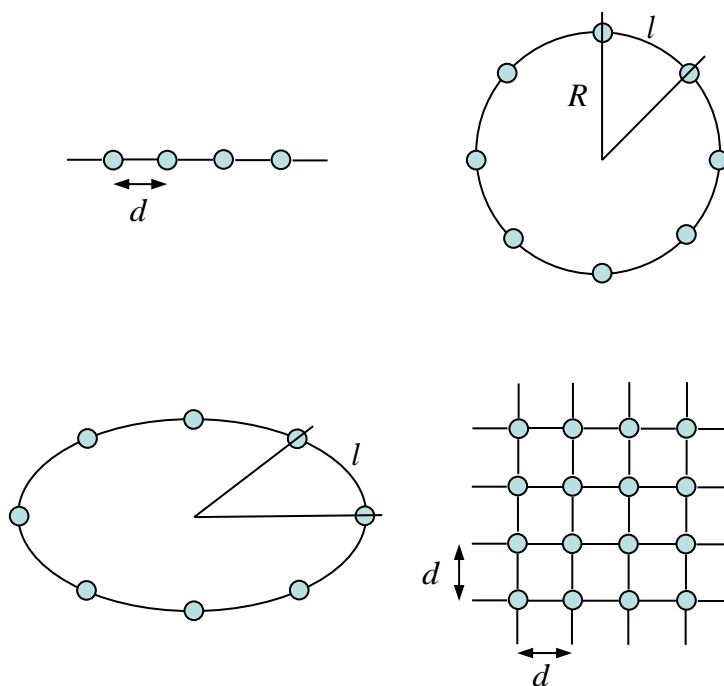


Figura 8. Distintas configuraciones geométricas para los arreglos de antenas: (a) arreglo lineal unidimensional; (b) arreglo circular unidimensional; (c) arreglo elíptico unidimensional; (d) arreglo de rejilla bidimensional [Hayt, 1991].

Esta tesis se enfocará en el estudio de las agrupaciones lineales. A continuación, se presentan sus elementos y componentes más importantes.

3.4. Arreglos lineales de antenas

Un arreglo lineal uniforme (ULA, del inglés Uniform Linear Array) es aquel cuyos elementos están dispuestos sobre una línea recta espaciados una misma distancia d entre sí. En la figura 8 se muestra un arreglo lineal uniforme de N elementos.

Se considera que toda señal que recibe el arreglo de antenas es un frente de ondas. Esto a su vez implica que la fuente radiante es omnidireccional y se encuentra localizada en el campo lejano del arreglo de antenas [Hayt, 1991].

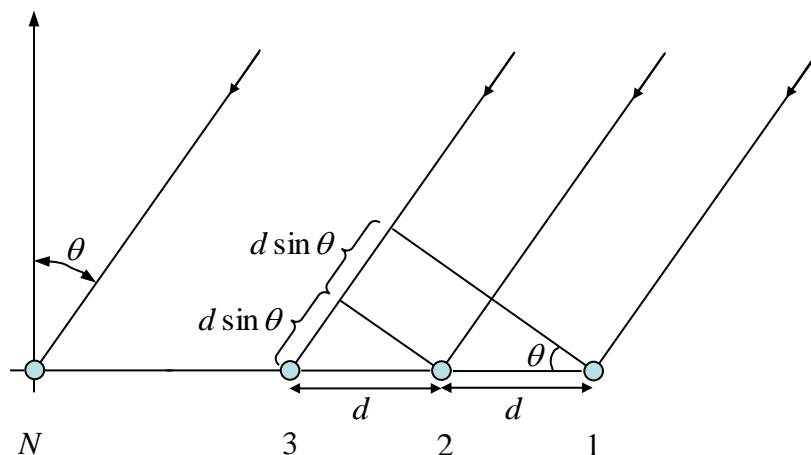


Figura 9. Arreglo lineal uniformemente espaciado [Hayt, 1991].

En la figura 9, se puede observar un frente de ondas planas $x(t)$ llegando al arreglo de antenas con un ángulo θ respecto a la normal del arreglo. Esto implica que la señal no es recibida al mismo tiempo por todos los elementos del arreglo. De esta forma, tomando como referencia al elemento 1 del arreglo de antenas mostrado en la figura 8, se observa que el elemento 2 experimenta un retardo de tiempo dado por:

$$\tau = \frac{d \sin(\theta)}{c} . \quad (2)$$

donde d es la distancia entre elementos, θ es el ángulo de llegada del frente de ondas planas respecto a la normal del arreglo y c es la velocidad de las ondas correspondiente a la velocidad de la luz.

Esto significa que la señal recorre una distancia $d \sin(\theta)$ adicional antes de llegar al elemento 2. De la misma forma, el elemento 3 experimenta un retardo de tiempo, dado por la expresión (1), respecto al elemento 2 y dos veces ese mismo retardo de tiempo respecto al elemento 1. Por lo tanto, la señal tendrá que recorrer una distancia $2d \sin(\theta)$, respecto al elemento 1, para llegar al elemento 3, una distancia $3d \sin(\theta)$ para llegar al elemento 4 y así sucesivamente hasta recorrer una distancia $(N - 1)d \sin(\theta)$ para llegar al elemento N .

El retardo de tiempo experimentado por cada elemento implica un desfase entre las señales recibidas por cada uno de ellos. Se debe notar que las señales recibidas por los elementos del arreglo de la figura 9, es la misma señal $x(t)$ sólo que desfasada debido a la geometría del arreglo. El retardo de tiempo τ de la expresión (2), corresponde a un desfase de $\psi = 2\pi(d/\lambda)\sin(\theta)$ radianes, donde λ es la longitud de onda de la señal. A continuación, se puede ver la razón de esto:

La fase de cualquier señal se encuentra dada por ωt [Lathi, 1993], donde ω representa la frecuencia angular en radianes de la señal y t es el tiempo específico donde se mide la fase de la señal. Si se desea obtener la fase (en este caso una diferencia en fase) después de un tiempo τ , se tiene que $t = \tau$ y ya que $\omega = 2\pi f$, se obtiene la siguiente expresión para la determinación de la fase:

$$\omega t = 2\pi f \tau \quad (3)$$

donde f representa la frecuencia de la señal y se encuentra dada por $f = c/\lambda$ donde c es la velocidad de la señal que corresponde a la velocidad de la luz, y λ representa la longitud de onda de la señal. Por tanto, sustituyendo el valor de f en la expresión anterior se tiene que:

$$\frac{2\pi c \tau}{\lambda} = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta) = \psi \quad (4)$$

donde $c\tau = d\sin(\theta)$ como puede derivarse a partir de la expresión (2). De esta forma, se relaciona el tiempo de retardo τ con el desfase ψ .

Por lo tanto, el desfase existente en cada uno de los elementos del arreglo, respecto al elemento de referencia, está definido por:

$$(n-1)\psi = (n-1)2\pi(d/\lambda)\sin(\theta) \quad (5)$$

donde $n = 1, 2, 3, \dots, N$ representa el número de elemento en cuestión. De esta forma, se puede ver que el desfase para el elemento 1 es de cero, lo que indica que es el elemento de referencia a partir del cual se mide el desfase de los elementos restantes.

3.5. Parámetros de radiación

Una agrupación lineal de antenas tiene un patrón de radiación que se caracteriza por sus parámetros, los cuales a su vez se pueden emplear para determinar y conocer el patrón de radiación deseado. Dichos parámetros serán descritos en los siguientes párrafos.

El campo total radiado por el arreglo de antenas está dado por la suma de los campos radiados por cada uno de los elementos individuales. De esta forma, si se desean patrones de radiación directivos, es necesario que los campos radiados por los elementos del arreglo interfieran constructivamente en las direcciones deseadas y, por otro lado, interfieran destructivamente en el resto del entorno espacial. Sin embargo, esto es un comportamiento ideal que en la práctica sólo se logra en forma aproximada.

En un arreglo conformado por elementos idénticos, existen cinco factores que pueden usarse para controlar la forma del patrón de radiación del arreglo de antenas [Balanis, 1982]:

- la configuración geométrica del arreglo de antenas (lineal, circular, rectangular, elíptico, esférico, híbridos, etc.)
- el espaciamiento entre elementos
- la amplitud de excitación de los elementos individuales del arreglo
- la fase de excitación de los elementos individuales del arreglo
- el patrón de radiación en particular de cada uno de los elementos individuales del arreglo.

3.5.1 Diagrama de Radiación generado por un arreglo lineal

El hecho de considerar los elementos de antena o sensores como antenas omnidireccionales (que pueden radiar y recibir energía uniformemente en cualquier dirección) es por simplicidad de modelado, ya que no existen en la práctica. En realidad, todos los elementos del arreglo tienen patrones de dirección no

uniformes, ya que están formados por pequeños dipolos cuyos patrones de dirección/radiación se asemejan a las radiaciones omnidireccionales. Además, el tipo de material del sensor también influye en su patrón de dirección. Por lo tanto, todo lo anterior en conjunto puede ser estratégicamente manipulado para diseñar el intervalo de visión de cualquier sensor del arreglo de antenas. A continuación, se describirá el patrón de radiación de un arreglo lineal.

El patrón de radiación de una agrupación lineal se muestra en la figura 10. En este caso, el patrón de radiación corresponde a un arreglo lineal que está formado por 8 elementos espaciados entre sí, a una distancia $d = 0.5\lambda$.

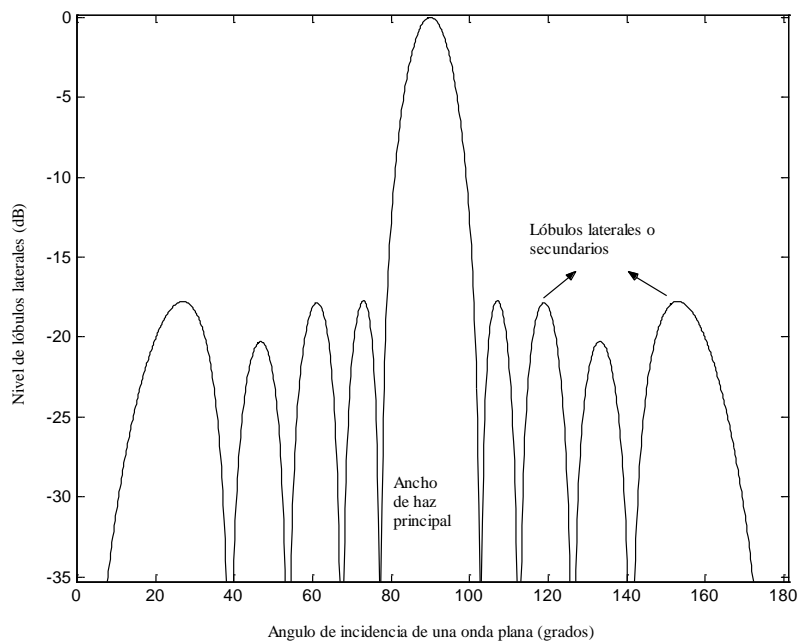


Figura 10. Patrón de radiación de un arreglo lineal con 8 elementos, $N=8$ y una distancia $d = 0.5\lambda$

En la figura 10 se puede apreciar que el lóbulo principal se encuentra a 90 grados, también se muestran el ancho del haz principal y los lóbulos laterales o secundarios.

Como ya se ha mencionado, la contribución de cada uno de los elementos, define la respuesta de radiación del arreglo. De esta forma, la respuesta total del arreglo de antenas se obtiene al considerar la suma fasorial de las contribuciones de señal de cada uno de los elementos [Monzingo y Miller, 1980]:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N x(t) e^{j(n-1)\psi} . \quad (6)$$

La expresión anterior define la respuesta total del arreglo de antenas como el producto del campo proporcionado por un solo elemento de referencia, por un factor [Balanis, 1982]. A dicho factor se le conoce como **factor de arreglo**.

En la expresión (6), el factor de arreglo está definido por $\sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi}$, por lo que dicha expresión se puede reescribir como:

$$y(t) = x(t) FA \quad (7)$$

donde: $FA = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)\psi}$ y $x(t)$ representa la contribución de un solo elemento, el elemento de referencia.

En la figura 11 se muestra un esquema de la contribución de cada uno de los elementos para formar la respuesta total del arreglo $y(t)$. El factor de arreglo por sí mismo, representa el patrón direccional del arreglo de antenas [Monzingo y Miller, 1980]. Esto significa que representa la sensibilidad relativa de respuesta del arreglo a una señal específica proveniente de diversas direcciones. Por lo tanto, usando tan solo el factor de arreglo se puede obtener el patrón de respuesta del arreglo de antenas en el intervalo de $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$, que es el intervalo de operación ideal de un arreglo lineal.

Para efectos de mostrar gráficamente el patrón de respuesta del arreglo como una relación de dirección-magnitud, se toma el valor absoluto del factor de arreglo, ya que éste representa una expresión compleja derivada de la suma fasorial de cada uno de los elementos del arreglo de antenas.

A continuación, se presenta una breve definición de los parámetros básicos de los arreglos de antenas.

El **diagrama o patrón de radiación** es un diagrama polar o gráfica que representa las intensidades de los campos o la potencia de radiación en varias posiciones angulares en relación con la antena.

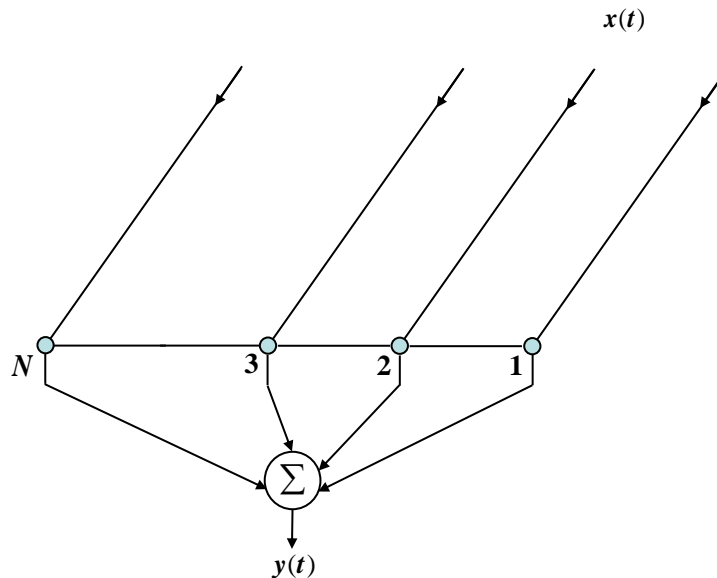


Figura 11. Contribución de los elementos individuales a la respuesta total del arreglo de antenas [Hayt, 1991].

3.5.2 Campo Cercano y Lejano

Cuando una antena irradia, parte de la potencia irradiada se guarda temporalmente en el campo cercano regresando posteriormente a la antena, y el resto alcanza el campo lejano donde continúa irradiándose sin regresar a la antena [Tomasi, 1996]. Al campo cercano también se le conoce como *campo de inducción* debido a que la potencia irradiada en esa región se mantiene ahí temporalmente, regresando después a la antena, lo que asemeja el comportamiento de un inductor al guardar y soltar energía. Al campo lejano se le denomina *campo de radiación* debido a que la potencia irradiada que alcanza esta región, continúa irradiándose. Los patrones de radiación de la antena se dan con referencia al campo lejano.

El campo lejano se define como la región donde la distribución angular del campo electromagnético es independiente de la distancia de la antena. Esta región se encuentra a distancias mayores que $2D^2 / \lambda$, donde λ es la longitud de onda (en metros) y D es el diámetro de la antena expresado en longitudes de onda.

3.5.3 Factor de Arreglo

El factor de arreglo representa el patrón de radiación de campo lejano de un arreglo cuyos elementos irradian de forma isotrópica, esto es, irradian por igual en todas direcciones.

3.5.4 Lóbulo Principal

El lóbulo principal de un patrón de radiación de una antena, es el lóbulo en la dirección donde se concentra la máxima potencia de radiación. El lóbulo principal recibe la mayor parte de la energía. Cabe destacar que puede existir más de un lóbulo principal.

3.5.5 Lóbulos Laterales

También llamados lóbulos secundarios o menores, son los lóbulos creados en direcciones diferentes a la dirección del lóbulo principal. Normalmente, los lóbulos laterales representan una recepción indeseada.

3.5.6 Ancho de Haz

El ancho de haz de la antena representa la separación angular entre los puntos de potencia media (-3 dB) en el lóbulo principal del patrón de radiación. El punto de potencia media se encuentra 3 dB abajo del punto máximo del lóbulo principal. Al ancho de haz de la antena, también se le conoce como ancho de haz de potencia media (HPBW del inglés half-power beamwidth).

El ancho de haz representa una forma de medir la directividad de un arreglo de antenas. La directividad es inversamente proporcional al ancho de haz. Esto es, entre más estrecho sea el ancho de haz, se tendrá una mayor directividad. Por tanto, el ancho de haz hace referencia al grado de directividad que presenta el lóbulo principal del patrón direccional del arreglo de antenas.

Existen básicamente tres formas de medir el ancho de haz presente en el patrón direccional de un arreglo de antenas. Puede ser midiendo la separación angular entre los puntos de potencia media del lóbulo principal, midiendo la separación angular entre los nulos de primer orden del patrón direccional (ancho

de haz entre los primeros nulos, FNBW del inglés First Null Beam Width) o bien, midiendo la separación angular existente entre los puntos donde aparecen los lóbulos laterales de primer orden del patrón direccional.

3.5.7 Eficiencia.

La eficiencia de un arreglo de antenas se emplea para cuantificar las pérdidas en las terminales de entrada y dentro de la estructura de la antena, dichas pérdidas pueden ser por reflexión de corriente, impedancias inductivas y capacitivas dentro del sistema de antenas, etc.

3.5.8 Ganancia y Directividad

La directividad se puede definir como la relación entre la intensidad de radiación en una dirección del máximo de radiación y la intensidad de radiación que radiaría una antena de referencia en la misma dirección, en este caso se toma como referencia una antena isotrópica. Ahora bien, la ganancia es igual a la eficiencia del arreglo de antenas multiplicada por la directividad.

3.5.9 Lóbulos de Rejilla (Grating Lobes)

Así se les denomina a los lóbulos principales adicionales que aparecen cuando en un arreglo de antenas el espaciamiento entre elementos es muy grande.

3.6. Conclusiones

En este capítulo se han estudiado los parámetros más importantes que caracterizan el patrón de radiación generado por un arreglo lineal de antenas. Como se ha observado, estos parámetros son de mucha importancia para el análisis del patrón o diagrama de radiación.

El estudio de los parámetros de diseño más importantes de los arreglos lineales nos permite identificar las variables de diseño que nos permita generar la radiación deseada. En nuestro objetivo o caso de diseño

las especificaciones de radiación vendrán dadas por el tipo de órbita en la que nos encontremos o el tipo de radiación Isoflux que se requiera. En nuestro estudio hemos podido identificar que las variables sensibles o con las que se puede trabajar para generar la radiación Isoflux son las excitaciones de amplitud y las posiciones entre elementos de antena. En los siguientes capítulos se abordará la metodología para el diseño o aplicación de arreglos lineales en la generación de radiación tipo Isoflux en diferentes órbitas satelitales.

Capítulo 4. Metodología de diseño de sistemas de radiación tipo

Isoflux

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta la metodología de diseño para sistemas de radiación tipo Isoflux basados en arreglos lineales. En este caso, la metodología de diseño está basada en un método de optimización evolutiva conocida como: **Algoritmos Genéticos**. Por lo tanto, en este capítulo se ilustrarán los pasos a seguir en este método de optimización de algoritmos genéticos y su aplicación en la generación de radiación tipo Isoflux para distintos escenarios orbitales en satélites.

Los primeros ejemplos de lo que hoy podríamos llamar algoritmos genéticos aparecieron a finales de los 50 y principios de los 60, programados en computadoras por biólogos evolutivos que buscaban explícitamente realizar modelos de aspectos de la evolución natural. A ninguno de ellos se le ocurrió que esta estrategia podría aplicarse de manera más general a los problemas artificiales, pero esa aproximación no tardaría en llegar. La computación evolutiva estaba definitivamente en el ambiente desde los primeros días de la computadora electrónica (Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a).

En 1962, investigadores como G.E.P. Box, G.J. Friedman, W.W. Bledsoe y H.J. Bremermann habían desarrollado independientemente algoritmos inspirados en la evolución para optimización de funciones y aprendizaje automático, pero sus trabajos generaron poca reacción. En 1965 surgió un desarrollo más exitoso, cuando Ingo Rechenberg, entonces de la Universidad Técnica de Berlín, introdujo una técnica que llamó estrategia evolutiva, aunque se parecía más a los algoritmos escaladores nombrados anteriormente que a los algoritmos genéticos. En esta técnica no había población ni cruzamiento; un padre mutaba para producir un descendiente, y se conservaba el mejor de los dos, convirtiéndose en el padre de la siguiente ronda de mutación. Versiones posteriores introdujeron la idea de la población (Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a).

El siguiente desarrollo importante en el campo vino en 1966, cuando L.J. Fogel, A.J. Owens y M.J. Walsh introdujeron una técnica que llamaron programación evolutiva. En este método, las soluciones candidatas para los problemas se representaban como máquinas de estado finito sencillas; al igual que en la estrategia evolutiva de Rechenberg, su algoritmo funcionaba mutando aleatoriamente una de estas máquinas simuladas y conservando la mejor de las dos. Sin embargo, lo que todavía faltaba en estas dos

metodologías era reconocer la importancia del cruzamiento (Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a).

En una fecha tan temprana como 1962, el trabajo de John Holland (Fig. 12) sobre sistemas adaptativos estableció las bases para desarrollos posteriores; y lo que es más importante, Holland fue también el primero en proponer explícitamente el cruzamiento y otros operadores de recombinación. Sin embargo, el trabajo fundamental en el campo de los algoritmos genéticos apareció en 1975, con la publicación del libro "Adaptación en Sistemas Naturales y Artificiales" (Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a).



Figura 12. John Holland el primero en proponer explícitamente el cruzamiento y otros operadores de recombinación (Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a).

Basado en investigaciones y artículos del propio Holland y de colegas de la Universidad de Michigan, este libro fue el primero en presentar sistemática y rigurosamente el concepto de sistemas digitales adaptativos utilizando mutación, selección y cruzamiento, simulando el proceso de la evolución biológica como estrategia para resolver problemas. El libro también intentó colocar a los algoritmos genéticos sobre una base teórica firme introduciendo el concepto de esquema. Ese mismo año, De Jong estableció el potencial de los algoritmos genéticos demostrando que podían desenvolverse bien en una gran variedad de funciones de prueba, incluyendo espacios de búsqueda discontinuos y multimodales. Al principio, estas aplicaciones eran principalmente teóricas, aunque al seguir proliferando la investigación, los algoritmos genéticos migraron hacia el sector comercial, al cobrar importancia con el crecimiento exponencial de la potencia de computación y el desarrollo de Internet. La computación evolutiva actual es un campo floreciente, y los algoritmos genéticos están resolviendo problemas de interés cotidiano en áreas de estudio tan diversas como la predicción en la bolsa y la planificación de la cartera de valores, ingeniería

aeroespacial, diseño de microchips, bioquímica y biología molecular, y diseño de horarios en aeropuertos y líneas de montaje (Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a).

La potencia de la evolución ha tocado virtualmente cualquier campo que uno pueda nombrar, modelando invisiblemente el mundo que nos rodea de incontables maneras, y siguen descubriéndose nuevos usos mientras la investigación sigue su curso. En todo esto se halla nada más que la simple y poderosa idea de Charles Darwin: que el azar en la variación, junto con la ley de selección, es una técnica de resolución de problemas de inmenso poder y de aplicación casi ilimitada. Aunque a continuación veremos a los algoritmos genéticos como representantes de estas ideas, hay otros muchos ejemplos en los que se pueden utilizar las ideas de selección por supervivencia para conseguir optimizaciones de problemas de diseño. Basándose en la idea de que los más aptos sobreviven mejor a las situaciones del entorno, es posible crear simulaciones en las que los individuos están obligados a sobrevivir en un ambiente hostil, y solo aquellos con las condiciones más adecuadas para ese entorno serán capaces de durar el tiempo suficiente para reproducirse y dejar descendencia en la que sus caracteres positivos den más opciones a los nuevos individuos que, junto con la mutación, puede producir una adaptación paulatina al medio. Tras este proceso durante generaciones, los individuos reflejarán en sus características una solución cuasi-óptima al problema de la supervivencia en el entorno (Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a).

4.2. Algoritmo Genético

Un algoritmo genético (AG) es una técnica de resolución de problemas que imita a la evolución biológica como estrategia para resolver problemas, englobándose dentro de lo que se denomina como *técnicas basadas en poblaciones*. Dado un problema específico a resolver, la entrada del algoritmo genético es un conjunto de soluciones potenciales a ese problema, codificadas de alguna manera, y una métrica llamada función de aptitud, o fitness, que permite evaluar cuantitativamente a cada solución candidata. Estas candidatas pueden ser soluciones que ya se sabe que funcionan, con el objetivo de que el algoritmo genético las mejore, pero se suelen generar aleatoriamente, como se muestra en la Fig. 13 (Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a), (Pereira, 2012). A partir de ahí, el algoritmo genético evalúa cada candidato de acuerdo con la función de aptitud. Por supuesto, se debe tener en cuenta que estas primeras soluciones candidatas generadas aleatoriamente, tendrán una eficiencia mínima con respecto a la resolución del problema, y la mayoría no funcionarán en absoluto. Sin embargo, por puro azar, unas

pocas pueden ser prometedoras, pudiendo mostrar algunas características que muestren, aunque sólo sea de una forma débil e imperfecta, cierta capacidad de solución del problema (Pereira, 2012). En la Figura 14 se ilustran los pasos a manera de código para un algoritmo básico.

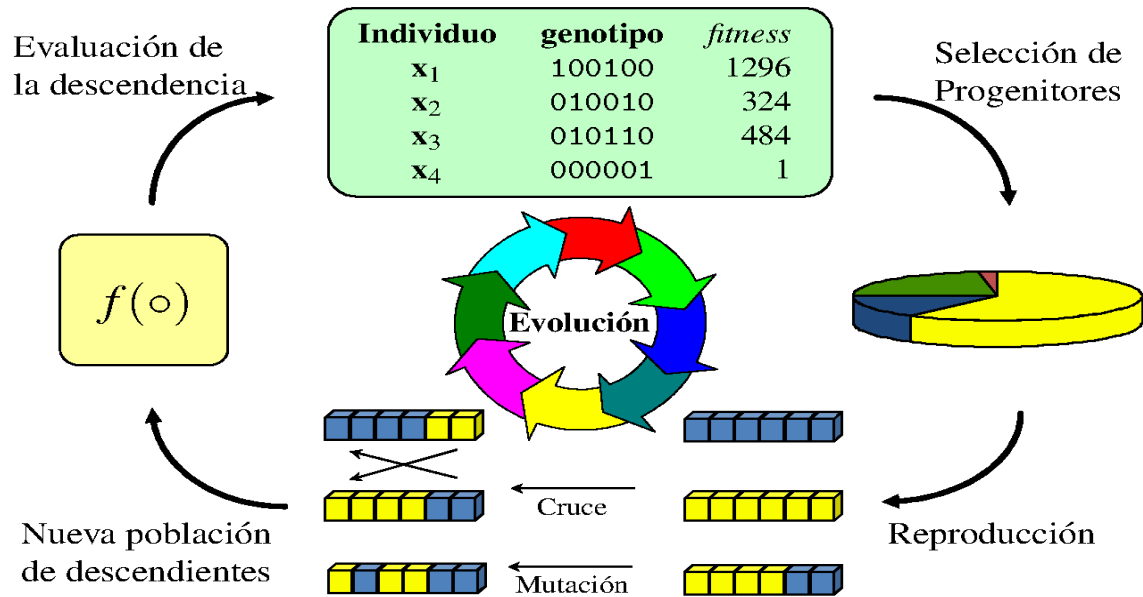


Figura 13. El proceso se repite las iteraciones que haga falta, hasta que obtengamos soluciones suficientemente.

AG:

```

Crea población inicial
Evalúa los cromosomas de la población inicial
Repite hasta que se cumpla la condición de parada
  Selección de los cromosomas más aptos en la nueva población
  Cruzamiento de los cromosomas de la población
  Mutación de los cromosomas de la población
  Evaluación de los cromosomas de la población
Devuele la mejor solución (la más apta) en la población

```

Figura 14. El pseudocódigo asociado a este proceso.

Estas soluciones candidatas prometedoras se conservan y se les permite reproducirse. Se realizan múltiples copias de ellas, pero estas copias no son perfectas, sino que se les introducen algunos cambios

aleatorios durante el proceso de copia, similar a las mutaciones que pueden sufrir los descendientes de una población. Esta descendencia prosigue luego con la siguiente generación, formando un nuevo conjunto de soluciones candidatas, y son de nuevo sometidas a una ronda de evaluación de aptitud. Las soluciones candidatas que han empeorado o no han mejorado con los cambios en su código son eliminadas de nuevo; pero, de nuevo, por puro azar, las variaciones aleatorias introducidas en la población pueden haber mejorado a algunos individuos, convirtiéndolos en mejores soluciones del problema, más completas o más eficientes. El proceso se repite las iteraciones que haga falta, hasta que se obtengan soluciones suficientemente buenas para los propósitos deseados (Pereira, 2012) (Gen, 1859).

Los algoritmos genéticos han demostrado ser una estrategia muy poderosa y exitosa para resolver problemas, demostrando el poder de los principios evolutivos. Se han utilizado algoritmos genéticos para desarrollar soluciones a problemas frecuentemente más difíciles que los abordados por los diseñadores humanos con soluciones a menudo más eficientes, más elegantes o más complejas que las que produciría un humano (Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a), (Pereira, 2012)

4.3 Métodos de representación

Se necesita un método para codificar las soluciones potenciales del problema antes de que un algoritmo genético pueda ponerse a trabajar en un problema, de forma que el propio algoritmo pueda procesarlas aplicando las operaciones que le permiten evolucionar. Un enfoque común es codificar las soluciones como cadenas binarias: secuencias de 1's y 0's, donde el dígito de cada posición representa el valor de algún aspecto de la solución (Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a), (Pereira, 2012).

Otro método similar consiste en codificar las soluciones como cadenas de enteros o números decimales, donde cada posición representa algún aspecto particular de la solución. Este método permite una mayor precisión y complejidad que el método comparativamente restringido de utilizar sólo números binarios, y a menudo está intuitivamente más cerca del espacio de soluciones del problema. Steffen Schulze-Kremer utilizó esta técnica cuando escribió un algoritmo genético para predecir la estructura tridimensional de una proteína, basándose en la secuencia de aminoácidos que la componen (Pereira, 2012).

El objetivo de cualquier método es facilitar la definición de operadores que causen los cambios aleatorios en las soluciones candidatas seleccionadas: cambiar un 00 por un 11 o viceversa, sumar o restar al valor de un número una cantidad elegida al azar, o cambiar una letra por otra (Pereira, 2012).

Otra estrategia, denominada programación genética, representa a los programas como estructuras de datos ramificadas llamadas árboles. En este método, los cambios aleatorios pueden generarse cambiando el operador, alterando el valor de un cierto nodo del árbol, o sustituyendo un subárbol por otro (Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a).

4.4. Evaluación y selección.

Durante la evaluación, se decodifica el gen, convirtiéndose en una serie de parámetros de un problema, se encuentra la solución del problema a partir de esos parámetros, y se le da una puntuación a esa solución en función de lo cerca que esté de la mejor solución. A esta puntuación se le llama *fitness* (Gen, 1859; Pereira, 2012; Reyna et al., 2012).

4.4.1. Evaluación

El fitness determina siempre los cromosomas que se van a reproducir, y aquéllos que se van a eliminar, pero hay varias formas de seleccionar la población de la siguiente generación [(Pr et al., 2004)]:

- Usar el orden, o rango, y hacer depender la probabilidad de permanencia o evaluación de la posición en el orden.
- Aplicar una operación al fitness para escalarlo; como por ejemplo la escalada sigma. En este esquema el fitness se escala.
- En algunos casos, el fitness no es una sola cantidad, sino diversos números, que tienen diferente consideración. Basta con que tal fitness forme un orden parcial, es decir, que se puedan comparar dos individuos y decir cuál de ellos es mejor, lo cual suele suceder cuando se necesitan optimizar varios objetivos.

Una vez evaluado el fitness, se tiene que crear la nueva población teniendo en cuenta que los buenos rasgos de los mejores se transmitan a esta. Para ello, se seleccionará a una serie de individuos encargados de tan ardua tarea (Pereira, 2012).

4.4.2. Selección

- *Selección elitista*: se garantiza la selección de los miembros más aptos de cada generación. La mayoría de los AGs no utilizan elitismo puro, sino una forma modificada por la que el mejor individuo, o algunos de los mejores, son copiados hacia la siguiente generación en caso de que no surja nada mejor.
- *Selección proporcional a la aptitud*: los individuos más aptos tienen más probabilidad de ser seleccionados, pero no la certeza.
- *Selección por rueda de ruleta*: una forma de selección proporcional a la aptitud en la que la probabilidad de que un individuo sea seleccionado es proporcional a la diferencia entre su aptitud y la de sus competidores.
- *Selección escalada*: al incrementarse la aptitud media de la población, la fuerza de la presión selectiva también aumenta y la función de aptitud se hace más discriminadora. Este método puede ser útil para seleccionar más tarde, cuando todos los individuos tengan una aptitud relativamente alta y sólo les distinguen pequeñas diferencias en la aptitud.
- *Selección por torneo*: se eligen subgrupos de individuos de la población, y los miembros de cada subgrupo compiten entre ellos, eligiendo sólo a un individuo por subgrupo para la reproducción.
- *Selección por rango*: a cada individuo de la población se le asigna un rango numérico basado en su aptitud, y la selección se basa en este ranking, en lugar de las diferencias absolutas en aptitud. La ventaja de este método es que puede evitar que individuos muy aptos ganen dominancia al principio a expensas de los menos aptos, lo que reduciría la diversidad genética de la población y podría obstaculizar la búsqueda de una solución aceptable (Gen, 1859; Pereira, 2012; Reyna et al., 2012).
- *Selección generacional*: la descendencia de los individuos seleccionados en cada generación se convierte en toda la siguiente generación. No se conservan individuos entre las generaciones.

- *Selección jerárquica*: los individuos atraviesan múltiples rondas de selección en cada generación. Las evaluaciones de los primeros niveles son más rápidas y menos discriminatorias, mientras que los que sobreviven hasta niveles más altos son evaluados más rigurosamente. La ventaja de este método es que reduce el tiempo total de cálculo al utilizar una evaluación más rápida y menos selectiva para eliminar a la mayoría de los individuos que se muestran poco o nada prometedores, y sometiendo a una evaluación de aptitud más rigurosa y computacionalmente más costosa sólo a los que sobreviven a esta prueba inicial (Gen, 1859; Pereira, 2012; Reyna et al., 2012).

4.5. Métodos de cambio

Una vez que la selección ha elegido a los individuos aptos, éstos se alteran aleatoriamente con la esperanza de mejorar su aptitud para la siguiente generación. Existen dos estrategias básicas para realizar esta tarea [(Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-b)]:

La primera y más sencilla es la que se conoce como *mutación*. Al igual que una mutación cambia un gen por otro en los seres vivos, en un algoritmo genético una mutación también causa pequeñas alteraciones en puntos concretos de la codificación del individuo como se muestra en la figura 15, (Pereira, 2012).

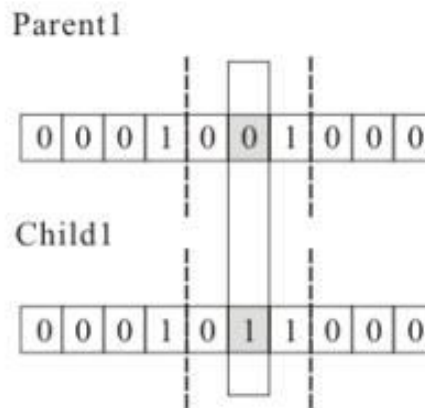


Figura 15. Una mutación en un algoritmo genético también causa pequeñas alteraciones en puntos concretos de la codificación del individuo.

4.6 Cruzamiento.

Consiste en seleccionar a dos individuos para que intercambien segmentos de su código genético (Fig. 16), produciendo una "descendencia" artificial cuyos individuos son combinaciones de sus padres. Este proceso pretende simular el proceso análogo de la recombinación que se da en los cromosomas durante la reproducción sexual.

Las formas comunes de cruzamiento incluyen al cruzamiento de un punto, en el que se establece un punto de intercambio en un lugar aleatorio del genoma de los dos individuos, y uno de los individuos contribuye todo su código anterior a ese punto y el otro individuo contribuye todo su código a partir de ese punto para producir una descendencia. En el cruzamiento de dos puntos se intercambian los genes que aparecen en el intervalo de genes delimitados por dos puntos. En el cruzamiento uniforme el valor de una posición dada en el genoma de la descendencia corresponde al valor en esa posición del genoma de uno de los padres o al valor en esa posición del genoma del otro padre, elegido con un 50% de probabilidad (Gen, 1859; Pereira, 2012; Reyna et al., 2012).

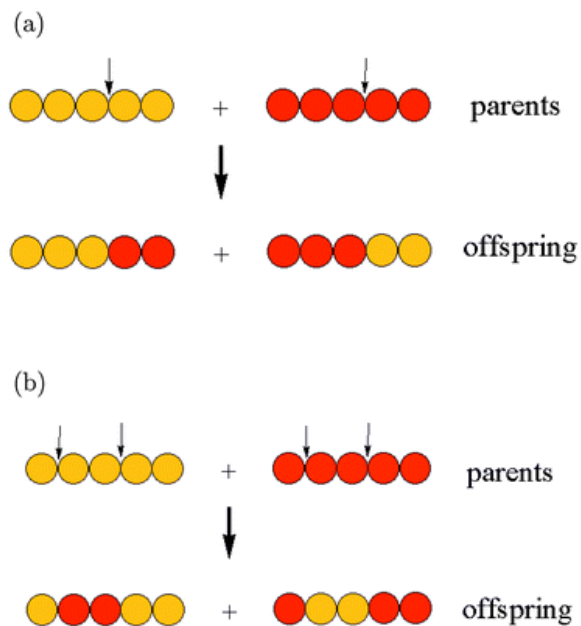


Figura 16. El cruzamiento consiste en seleccionar a dos individuos para que intercambien segmentos de su código genético, produciendo una "descendencia" artificial cuyos individuos son combinaciones de sus padres [(Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a)].

4.6.1 Desventajas y limitaciones.

A pesar de las bondades apuntadas anteriormente para los algoritmos genéticos, también debemos mencionar algunas de las limitaciones que presentan:

- Como ocurre en muchos problemas de optimización, cuando se tiene una alta complejidad, la función de evaluación puede resultar demasiado costosa en términos de tiempo y recursos.
- Hay casos en los que, dependiendo de los parámetros que se utilicen para la evaluación, el algoritmo puede no converger a una solución óptima, o bien terminar en una convergencia prematura con resultados no satisfactorios, ya sea devolviendo un óptimo local o incluso un punto arbitrario.
- No poseen una buena escalabilidad con la complejidad. En sistemas en los que intervienen muchas variables, componentes o elementos, el espacio de búsqueda asociado puede crecer de manera exponencial debido, entre otras cosas, a las relaciones no lineales que puedan surgir entre los subconjuntos de variables.
- La mejor solución lo es solo en comparación a otras soluciones, por lo que no se tiene demasiado claro un criterio de cuándo detenerse ya que no se cuenta con una solución específica.
- No es recomendable utilizarlos para problemas que buscan respuesta a problemas con soluciones simples como Sí/No o problemas de decisión, ya que el algoritmo difícilmente convergerá y el resultado será casi aleatorio.
- El diseño de la función de aptitud (fitness) y la selección de los criterios de mutación entre otros, necesitan de cierta pericia y conocimiento previo del problema para obtener buenos resultados (Algoritmos Genéticos - Fernando Sancho Caparrini, s/f-a). (Pereira, 2012).

4.7. Diseño de arreglos de antena para sistemas de radiación tipo Isoflux.

En las secciones anteriores se abordó el tema de radiación tipo Isoflux el cual proporciona un diagrama de radiación con máximo de radiación en cierto ángulo de llegada con respecto del nadir (Reyna et al., 2012).

Esta tecnología pudiera ser empleada para mejorar el desempeño de un sistema de comunicaciones inalámbricas. En el área del diseño de arreglos de antenas, hay una numerosa cantidad de técnicas de

diseño, tales como las técnicas de ajuste de posiciones de los elementos radiantes y las técnicas de distribución de excitaciones de amplitud de los elementos; las cuales son funcionales y ofrecen resultados para una radiación con cobertura limitada en su direccionamiento del haz principal. Sin embargo, los sistemas de comunicación inalámbrica en la actualidad requieren que su radiación sea dirigitada dentro de un rango amplio de cobertura con parámetros, tales como: directividad, nivel de lóbulos laterales y el ancho de haz se encuentren en valores óptimos o adecuados (Stutzman, W. L., & Thiele, s/f).

El diseño de un arreglo lineal de antenas mediante un algoritmo genético que optimice las excitaciones de amplitud y fase de los elementos radiantes es de gran interés para nuevas aplicaciones (Stutzman, W. L., & Thiele, s/f).

4.8. Planteamiento del problema.

En el caso de diseño de arreglo de antenas sobre el cual se enfoca la investigación de esta tesis, se plantea generar un sistema de radiación tipo Isoflux que proporcione una iluminación de la superficie de la tierra dentro de su margen de visión en el polo ecuatorial, tal como se muestra en la Figura 17.

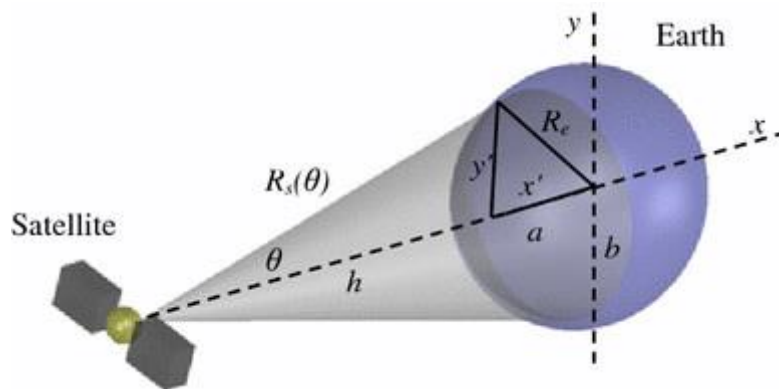


Figura 17. Representación de un sistema Isoflux [(Isoflux pattern representation | Download Scientific Diagram, s/f)].

El diseño estará basado principalmente en arreglos de antena no uniformes o aperiódicos con la finalidad de reducir el número de excitaciones de antena, reducir el nivel de lóbulos laterales y optimizar el hardware del sistema de antena en un satélite (Reyna et al., 2012).

Además, el diseño está enfocado en optimizar recursos en el cual se usan técnicas de optimización, utilizará diversas variables que controlen la no uniformidad de los elementos de antena en arreglo lineal, la geometría en la que estará enfocado nuestro diseño.

En este caso, se considera un arreglo lineal de entre 10 a 14 antenas, pero generamos 2 casos para el mismo propósito y trabajamos sobre las órbitas GEO y MEO, donde la separación del primer caso entre los elementos radiantes es de 0.5λ a lo largo del eje y para el segundo caso la separación varía desde 0.5λ a 1.0λ . En la Figura 18 se muestra un esquema del arreglo lineal a utilizar.

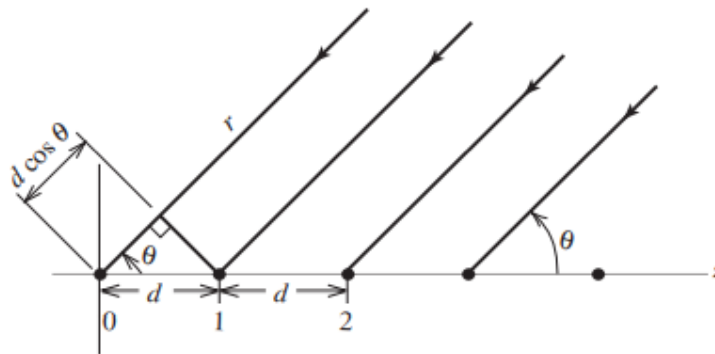


Figura 18. Esquema de un arreglo lineal cuyos parámetros dependerán del número de elementos de antena y separaciones entre elementos para las órbitas GEO y MEO [(Stutzman, W. L., & Thiele, s/f)].

Como mencionamos en el capítulo 3 respecto a los arreglos lineales, las antenas están situadas sobre una misma línea. El factor de la agrupación se puede obtener como la suma de las corrientes multiplicadas por sus términos de retardo. Para una agrupación de N antenas equiespaciadas, con la primera de ellas situada en el origen de coordenadas se tiene el vector de radiación (Stutzman, W. L., & Thiele, s/f).

La característica principal de las agrupaciones de antenas es que su diagrama de radiación es modificable, pudiendo adaptarlo a diferentes aplicaciones o necesidades. Esto se consigue controlando de manera individual la amplitud y fase de la señal que alimenta a cada uno de los elementos de la agrupación tal y como se muestra a continuación en la Figura 19.

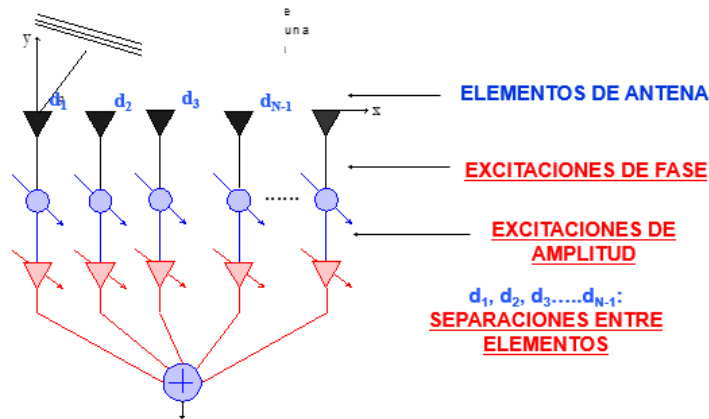


Figura 19. Parámetro de diseño de una geometría lineal para generar el patrón de radiación deseado.

4.8.1. Función Objetivo

Una vez que la configuración del sistema de alimentación para un arreglo lineal de antenas ha sido propuesta, el siguiente paso es optimizar sus variables de entrada al sistema para obtener resultados, así como reducir los niveles de los lóbulos laterales y preservar valores aceptables de directividad, con el objetivo de asegurar que el patrón de radiación resultante sea el mejor posible en términos de los parámetros mencionados anteriormente.

Considerando que los elementos radiantes del arreglo lineal son considerados como fuentes isotrópicas y están uniformemente espaciados, el factor de arreglo se da por la expresión (8):

$$AF(\theta, I, dn) = \sum_{n=1}^N I_n (jkd_n \cos\theta) \quad (8)$$

donde I_n es la excitación de amplitud n -ésimo elemento de antena, θ es el ángulo de incidencia de una onda plana en el plano de elevación; $k = 2\pi/\lambda$ es el número de onda, λ representa la longitud de onda y d_n representa la posición del n -ésimo elemento en el arreglo de antenas.

En este caso de diseño las variables a optimizar y se tomarán como la población inicial son las excitaciones de amplitud y posiciones de los elementos, las cuales serán codificadas y representadas como vectores dentro del algoritmo. El algoritmo genético evalúa a estos vectores y obtiene el factor de arreglo de cada individuo mediante un conjunto de direcciones en un corte del plano de elevación con cierto ángulo θ .

Posteriormente a la obtención del factor de arreglo, los individuos se evalúan con la función objetivo del algoritmo, tal como muestra la siguiente expresión:

$$F.O = [SLL + Mask_Error] \quad (9)$$

La función objetivo o función de aptitud considera el nivel de lóbulos laterales generados por el factor de arreglo y el error que se tiene entre la máscara Isoflux deseada (ya sea para satélites GEO o MEO) y la máscara generada por el factor de arreglo de cada individuo o vector de la población.

4.9 Conclusiones

En este capítulo se abordó la técnica de optimización de algoritmos genéticos y la técnica de selección a emplear por el algoritmo a codificar, enfocados al sistema Isoflux basado en la tecnología de diseño de arreglo de antenas.

Se explicó la importancia de utilizar algoritmos genéticos como herramienta de diseño del arreglo de antenas Isoflux, los cuales son una excelente opción para obtener resultados óptimos en nuestro problema. Además, se presentó a detalle el algoritmo genético que se utiliza específicamente para la configuración propuesta, teniendo como objetivo generar resultados eficientes en términos de características del patrón de radiación.

En el capítulo 5 se presentarán los resultados del algoritmo y sus diferentes casos enfocados a las órbitas GEO y MEO utilizando variables de diseño de amplitud y distancia entre los elementos de un arreglo lineal de antena.

Capítulo 5. Resultados de simulación.

5.1. Introducción

Este capítulo está dedicado a presentar los resultados del diseño para conformar el patrón Isoflux para arreglos de antenas lineales enfocados para órbitas GEO y MEO, cuyo diseño fue presentado en el capítulo anterior.

En este caso, la idea es estudiar el comportamiento de la radiación producida por el diseño propuesto en particular, y así, de esta manera apreciar el beneficio de emplear la optimización evolutiva para generar un patrón de radiación Isoflux mediante un arreglo lineal de antenas.

5.2. Desarrollo del proceso de simulación.

Para el proceso de simulación se implementó un programa en Matlab para generar y estudiar el comportamiento del patrón Isoflux del arreglo lineal de antenas haciendo uso de la optimización evolutiva. En este programa se diseñó un algoritmo genético codificado en dicha plataforma Matlab, donde se detalló en su programación la configuración del sistema evolutivo. Además, se estableció el arreglo lineal compuesto entre 12 y 14 elementos antenas para generar el patrón de radiación mediante la optimización de sus valores de excitación de amplitud y separaciones entre elementos. Por lo tanto, a continuación, se mencionan las consideraciones y los diferentes escenarios de simulación que se plantearon.

5.3. Consideraciones de simulación

En el algoritmo genético codificado se considera como el número de generaciones a $G=2000$ y el tamaño de la población $P=200$. También tendremos presente una probabilidad cruzamiento de 1.0 y una probabilidad de mutación de 0.1.

En cuestiones del diseño del arreglo, utilizamos el arreglo lineal entre 12 y 14 elementos de antena, dado que este número de elementos nos generó los mejores resultados. Además, se tendrán 2 casos de simulación, el primero donde los elementos de antena tienen una misma separación de $\lambda/2$ y el segundo

las posiciones de los elementos podrán estar con diferentes separaciones entre ellos. Como se presenta en las siguientes secciones.

5.4. Escenarios de simulación

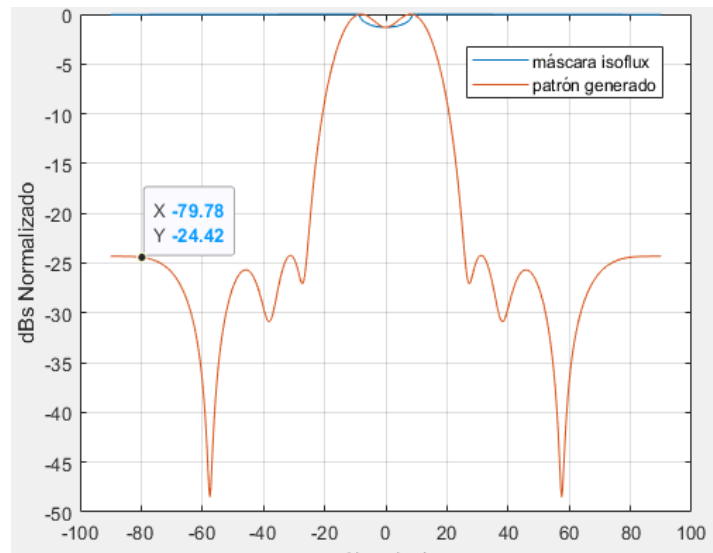
Para cada caso de simulación, dada la altura de la órbita de los sistemas GEO y MEO, la forma de la máscara de radiación Isoflux va a ser diferente. En nuestro caso, intentaremos que el algoritmo genético nos proporcione un diseño de arreglo lineal que nos genere la radiación Isoflux deseada con un nivel bajo de lóbulos laterales (Side Lobe Level, SLL). Esto implicaría los resultados con los diferentes valores de corriente (amplitud) y posiciones de antena que sometamos a cada elemento.

5.4.1. Sistema de radiación Isoflux para satélites tipo GEO

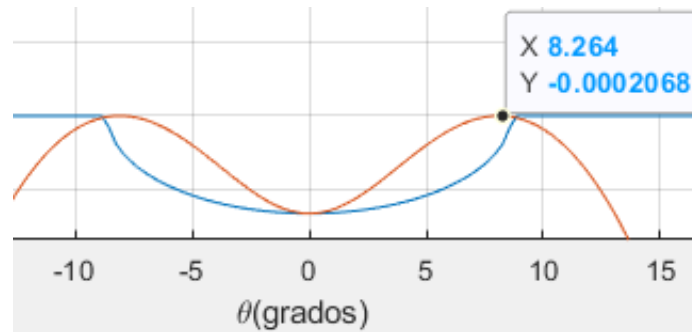
Primer caso:

Los siguientes resultados fueron obtenidos sólo optimizando amplitudes, manteniendo separaciones entre elementos de manera uniforme $d = \lambda/2$. La Figura 20 muestra el factor de arreglo generado por un arreglo lineal de 12 elementos y separación uniforme. Como se muestra en esta figura, el diagrama de radiación generado presenta valores muy cercanos a los puntos de la máscara donde se busca minimizar el error. Los puntos de la máscara Isoflux que se consideran en el algoritmo genético son los puntos de los extremos y el del centro. Es un diagrama de radiación que presenta un nivel de lóbulos laterales bajo de aproximadamente -24.42 dB. Además, se puede apreciar que se consigue la apertura del haz requerida de alrededor de $\pm 8^\circ$ para este tipo de sistemas satelitales.

Como se vio en el capítulo anterior, el algoritmo genético contiene componentes aleatorios, por lo que en cada corrida puede arrojar resultados diferentes y, por lo tanto, se muestran los casos que presentaron los mejores resultados. La Figura 21 muestra otro resultado de factor de arreglo para un arreglo lineal de 12 elementos y separación uniforme.



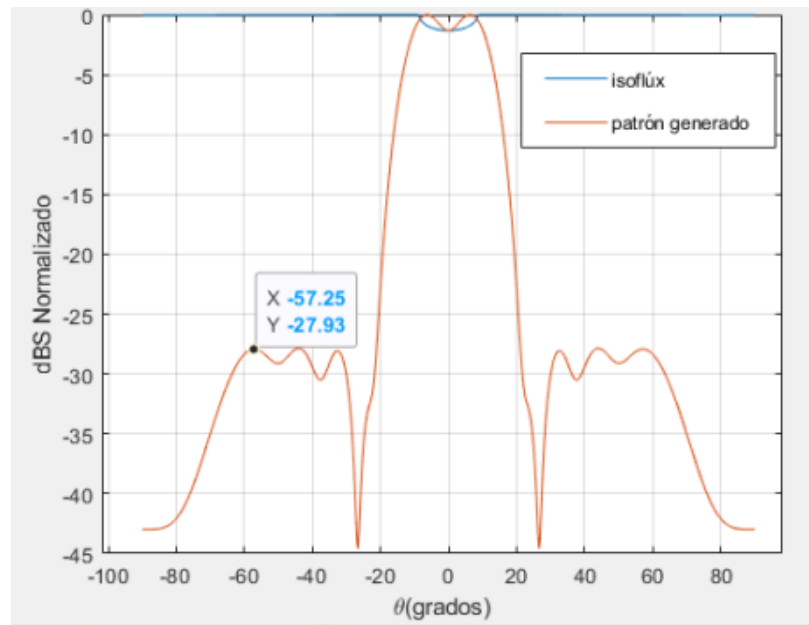
a)



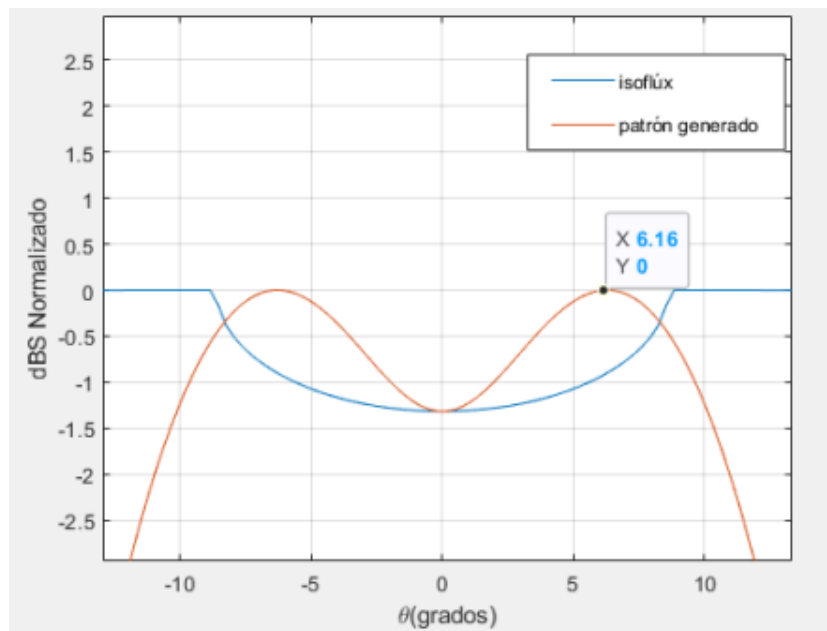
b)

Figura 20. a) Patrón de radiación generado a partir de 12 elementos de antena y un nivel de SLL de -24.4 dB; b) Vista en detalle de la radiación obtenida.

En este caso, el diagrama de radiación presenta valores no tan cercanos a la máscara, como el caso anterior, por lo que presenta un nivel de lóbulos laterales más bajo de aproximadamente -28 dB. Se puede visualizar que existe un compromiso entre el error de la máscara y el nivel de lóbulos laterales que se puede obtener. En este caso, la apertura del haz se encuentra alrededor de $\pm 6^\circ$ para este tipo de sistemas satelitales.



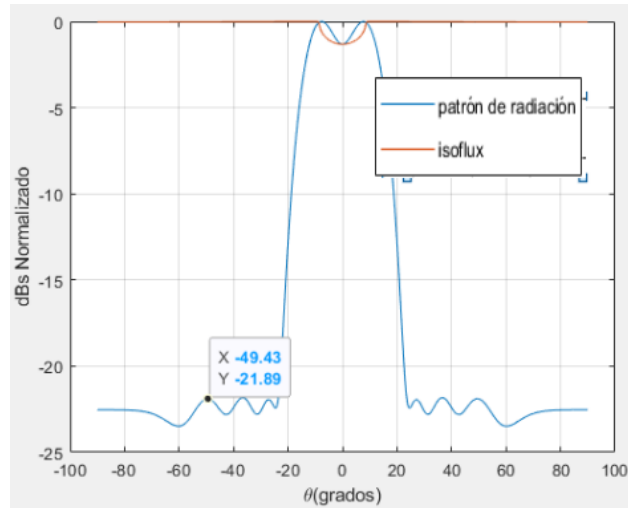
a)



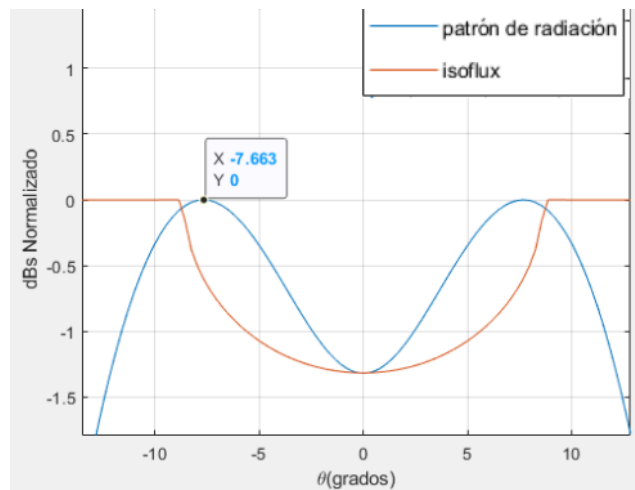
b)

Figura 21. a) Patrón de radiación generado a partir de 12 elementos de antena, un nivel de SLL de -28 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 6 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.

En la Figura 22 se ilustra otro resultado de factor de arreglo para el arreglo lineal de 12 elementos y separación uniforme. En este caso, se muestra un compromiso de nivel de lóbulos laterales de -21.89 dB y una apertura del haz que se encuentra alrededor de $\pm 7.6^\circ$. Se muestra un error muy pequeño entre la radiación Isoflux de la máscara y el diagrama de radiación generado.



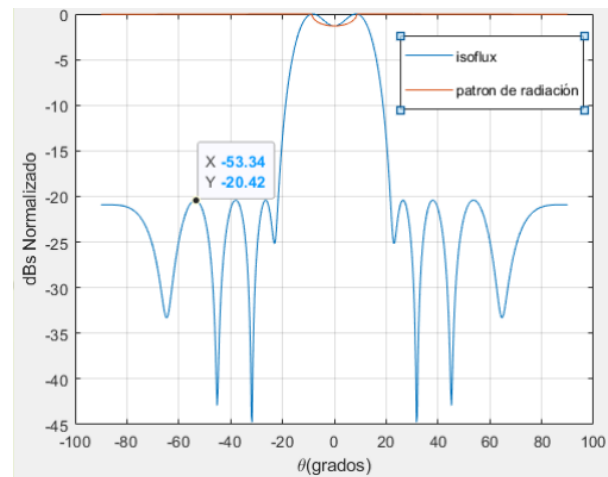
a)



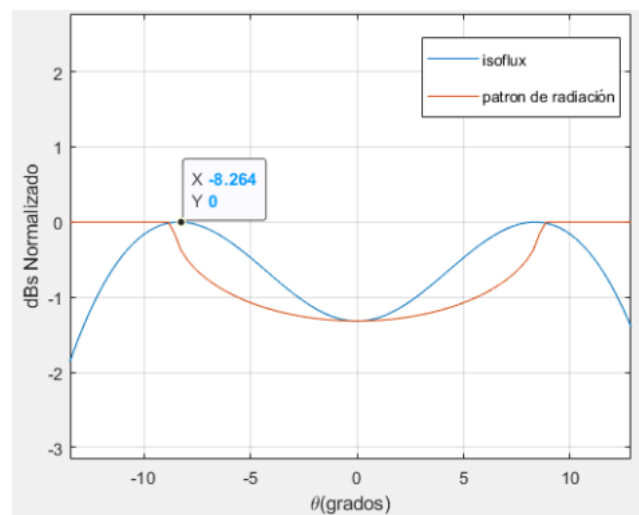
b)

Figura 22. a) Patrón de radiación generado a partir de 12 elementos de antena, un nivel de SLL de -21.8 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 7.6 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.

En la Figura 23 se muestra el resultado con mejor comportamiento de error entre la máscara Isoflux y el factor de arreglo para este caso de arreglo lineal de 12 elementos y separación uniforme. En este caso, se muestra un compromiso de nivel de lóbulos laterales de -20.42 dB y una apertura del haz que se encuentra en $\pm 8^\circ$. Este caso muestra un error más pequeño con respecto a los casos anteriores, para la radiación Isoflux de la máscara y el diagrama de radiación generado.



a)



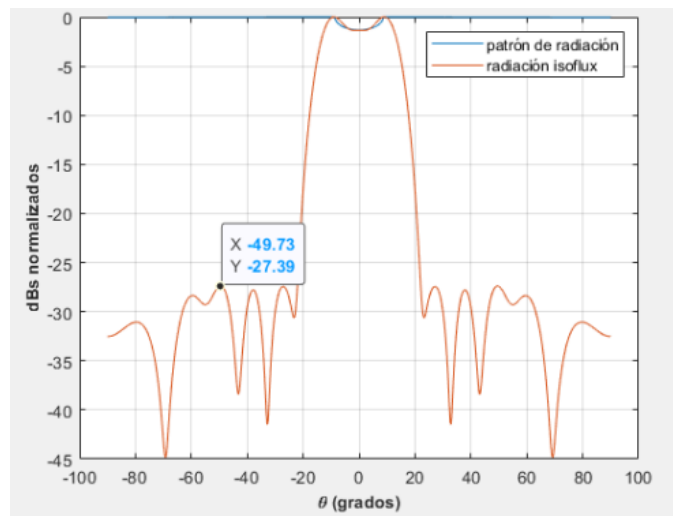
b)

Figura 23. a) Patrón de radiación generado a partir de 12 elementos de antena, un nivel de SLL de -20.42 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 8 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.

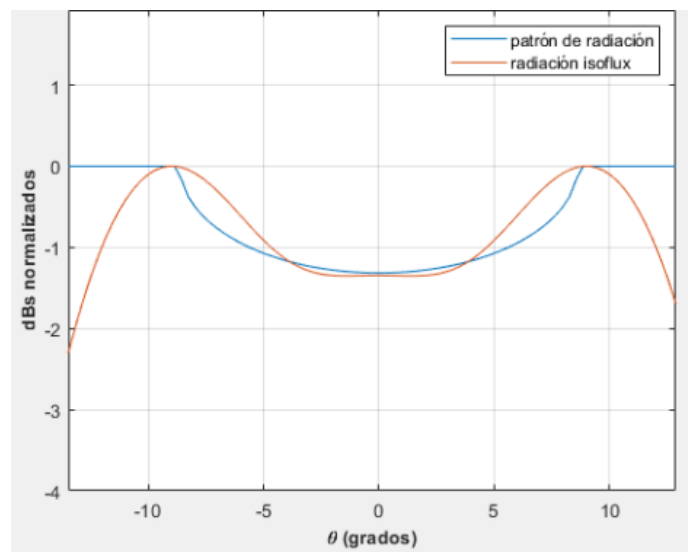
Segundo caso:

Los siguientes resultados fueron obtenidos optimizando de manera simultánea amplitudes y separaciones entre elementos de antena. En este caso, se considera un rango de separaciones entre 0.5λ y 1.0λ .

La Figura 24 muestra el factor de arreglo generado por un arreglo lineal de 12 elementos y separación no uniforme. Como se muestra en esta figura, el diagrama de radiación generado presenta valores muy cercanos a los puntos de la máscara donde se busca minimizar el error. Los puntos de la máscara Isoflux que se consideran en el algoritmo genético son los puntos de los extremos y el del centro. Es un diagrama de radiación que presenta un nivel de lóbulos laterales bajo de aproximadamente -27.39 dB. Además, se puede apreciar que se consigue la apertura del haz requerida de alrededor de $\pm 8^\circ$ para este tipo de sistemas satelitales. Este resultado presenta un buen compromiso entre el valor obtenido de SLL y el error de la máscara de radiación Isoflux.



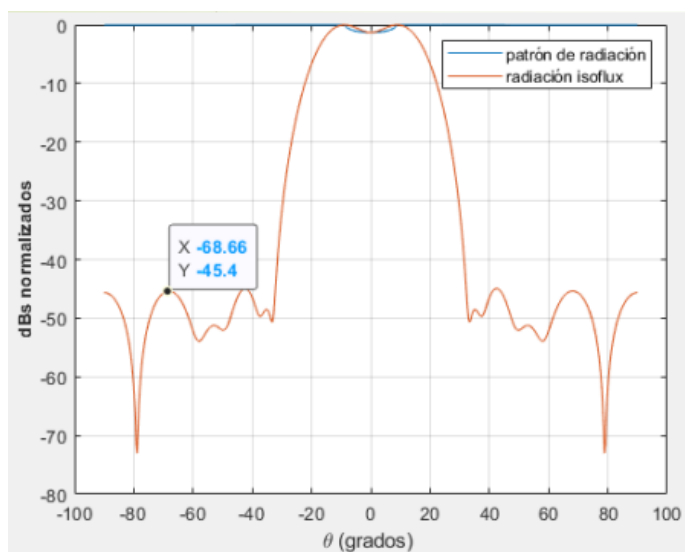
a)



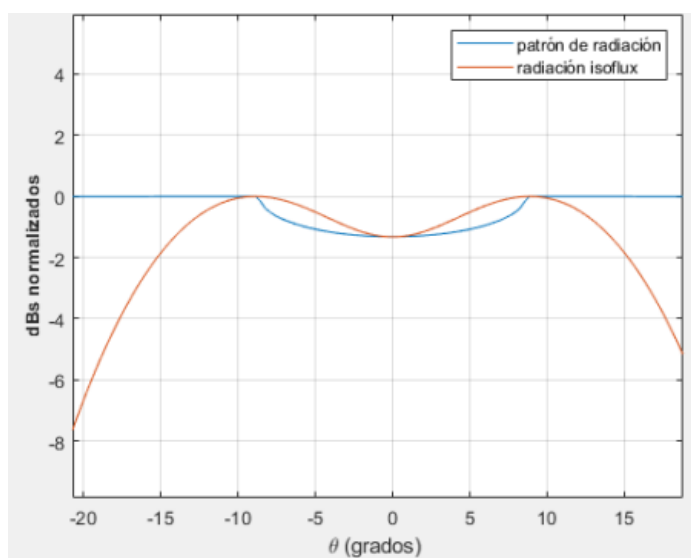
b)

Figura 24. a) Patrón de radiación generado a partir de 12 elementos de antena, un nivel de SLL de -27 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 8 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.

La Figura 25 muestra otro resultado de factor de arreglo para un arreglo lineal de 10 elementos y separación no uniforme. Dado que al optimizar simultáneamente amplitudes y separaciones entre elementos se tienen más grados de libertad en el proceso de optimización, se tienen mejores resultados para este caso con respecto al caso de optimizar solamente las excitaciones de amplitud. El diagrama de radiación presenta valores con un nivel de lóbulos laterales muy bajo de aproximadamente -45.4 dB. Es interesante visualizar que para este valor de SLL muy bajo, la apertura del haz se encuentra alrededor de $\pm 8^\circ$ para sistemas satelitales GEO.



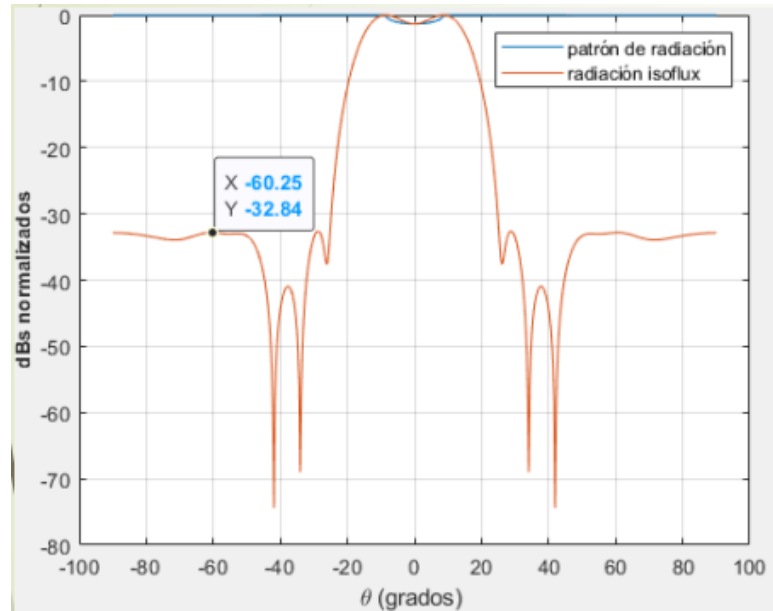
a)



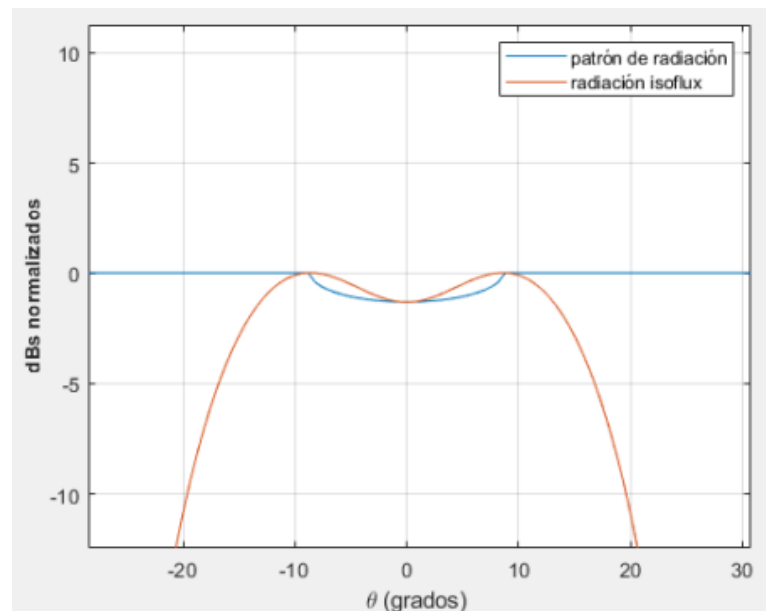
b)

Figura 25. a) Patrón de radiación generado a partir de 10 elementos de antena, un nivel de SLL de -45.4 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 8 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.

La Figura 26 muestra el último resultado de factor de arreglo para satélites GEO usando un arreglo lineal de 10 elementos y separación no uniforme. El diagrama de radiación para este caso presenta valores con un nivel de lóbulos laterales de -32.84 dB. Este valor de SLL se mantiene para la apertura del haz en $\pm 8^\circ$ con un error muy pequeño para la máscara de radiación Isoflux y el factor de arreglo obtenido.



a)



b)

Figura 26. a) Patrón de radiación generado a partir de 10 elementos de antena, un nivel de SLL de -33 dB y una apertura de haz de aproximadamente de $\pm 8^\circ$, b) vista en detalle de la radiación obtenida.

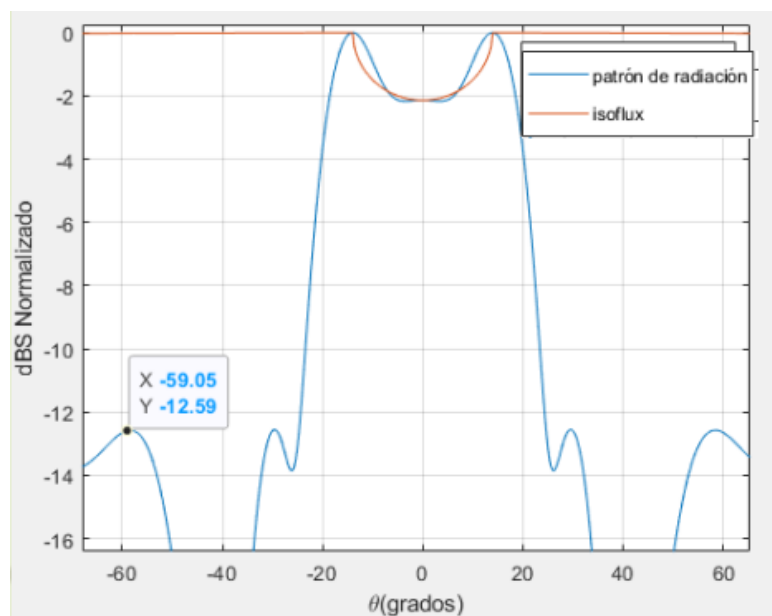
5.4.2. Sistema de radiación Isoflux para satélites tipo MEO

Primer caso:

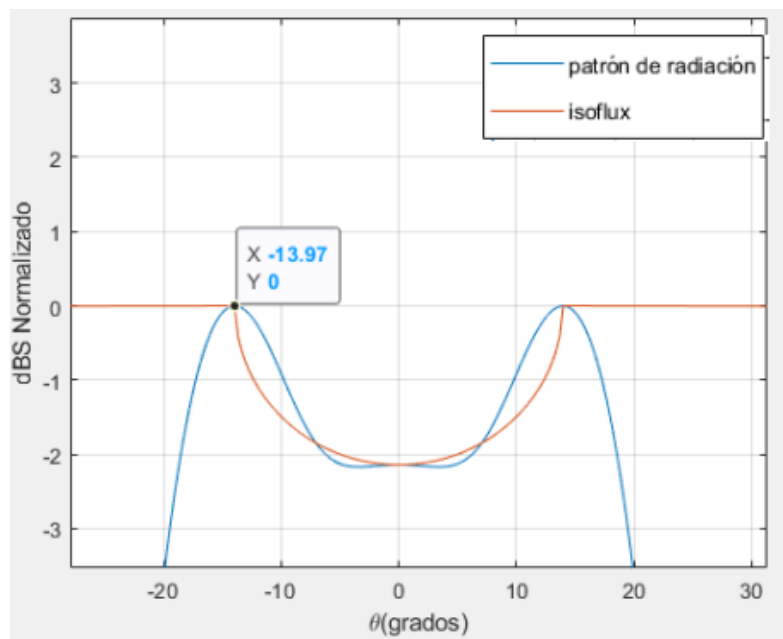
Los siguientes resultados de simulación para satélites MEO fueron obtenidos optimizando sólo amplitudes, manteniendo separaciones entre elementos de manera uniforme $d = \lambda/2$. Vale la pena mencionar que, como se estableció en capítulos anteriores, la máscara de radiación Isoflux deseada para satélites MEO es más amplia (aproximadamente $\pm 13^\circ$).

La Figura 27 muestra el factor de arreglo generado por un arreglo lineal de 12 elementos y separación uniforme. Como se ilustra en la figura, el diagrama de radiación generado presenta valores muy cercanos a los puntos de la máscara Isoflux MEO. De igual manera que el caso anterior, los puntos de la máscara Isoflux que se consideran en el algoritmo genético son los puntos de los extremos y el del centro. Es un diagrama de radiación que presenta un nivel de lóbulos laterales bajo de aproximadamente -12.6 dB. Además, se puede apreciar que se consigue la apertura del haz requerida de alrededor de $\pm 14^\circ$ para este tipo de sistemas satelitales. Se pudiera afirmar que los resultados para este caso de satélites MEO pudieran no ser tan buenos, como los resultados de satélites MEO, ya que el rango de ángulos a cubrir en la máscara es mayor, o bien la apertura del ancho de haz a generar, es más amplio.

La Figura 28 muestra otro resultado para este caso de satélites MEO, en éste se puede visualizar que se pudiera generar un SLL relativamente muy bajo de aproximadamente -30.77 dB. Aunque se cumpla con la máscara de radiación en la parte de arriba con un ancho de haz de aproximadamente $\pm 13^\circ$. El detalle que se tiene es que presenta mucha apertura del haz de radiación en la parte de abajo, por lo que este aspecto se tendría que tomar en cuenta en un escenario real ya implementado a nivel de sistema o prototipo.

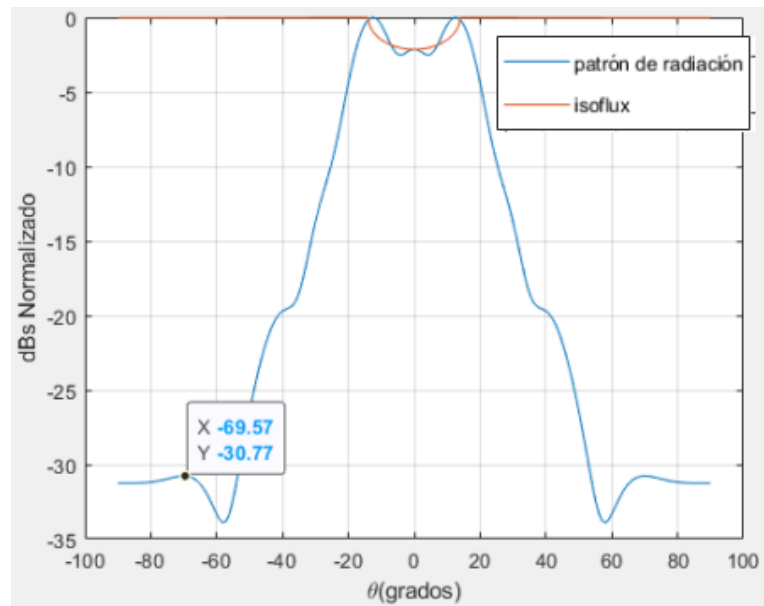


a)

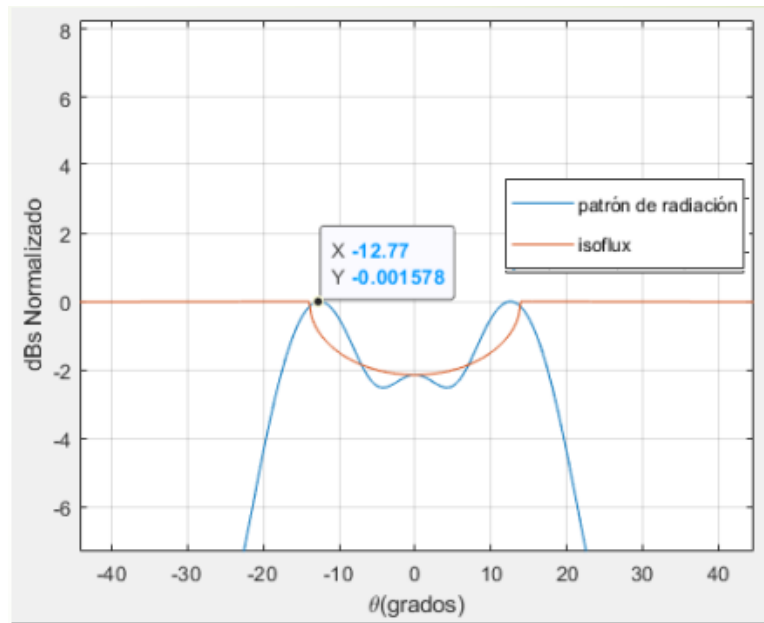


b)

Figura 27. a) Patrón de radiación generado a partir de 12 elementos de antena, un nivel de SLL de -12.6 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 14 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.



a)

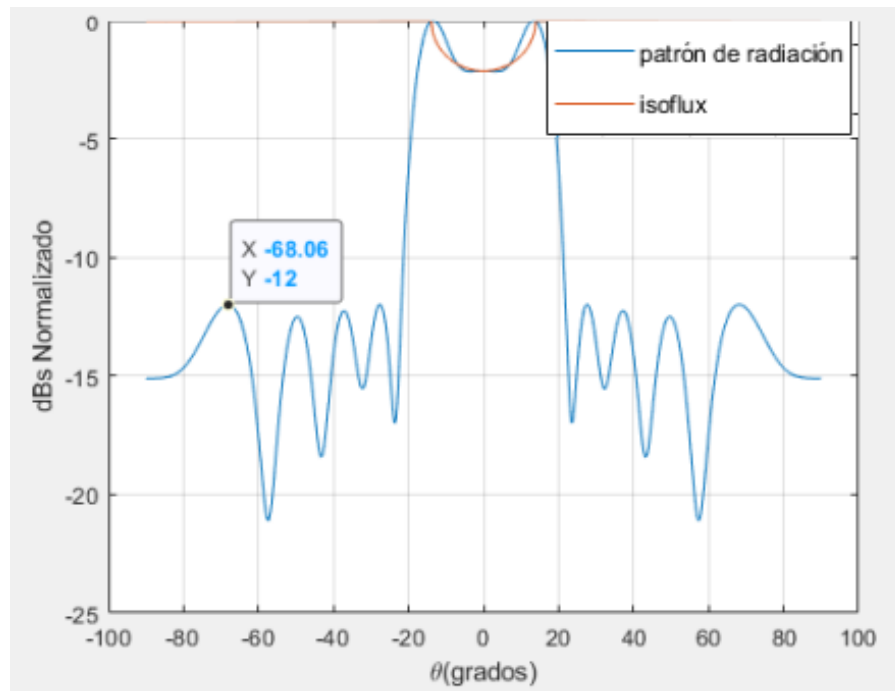


b)

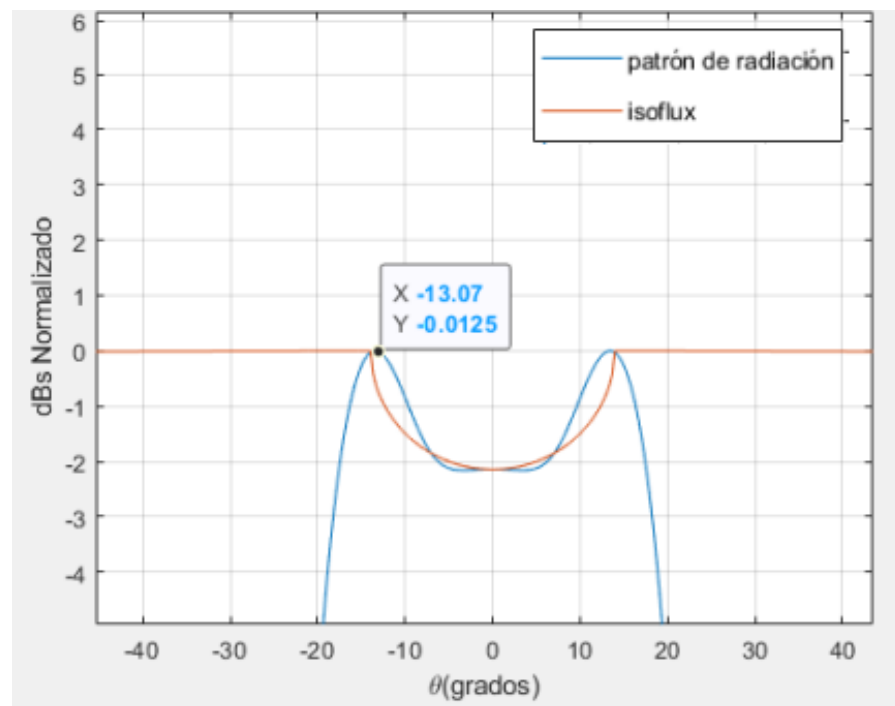
Figura 28. a) Patrón de radiación generado a partir de 12 elementos de antena, un nivel de SLL de -30.77 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 13 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.

La Figura 29 muestra otro factor de arreglo obtenido por un arreglo lineal de 14 elementos y separación uniforme. Como se muestra en la figura, este diagrama de radiación generado presenta valores muy cercanos a los puntos de la máscara Isoflux MEO ($\pm 13^\circ$). En este caso, no se presenta la situación del

resultado anterior de una apertura muy ancha en la parte de abajo del patrón. Es un diagrama de radiación que presenta un nivel de lóbulos laterales bajo de aproximadamente -12 dB.



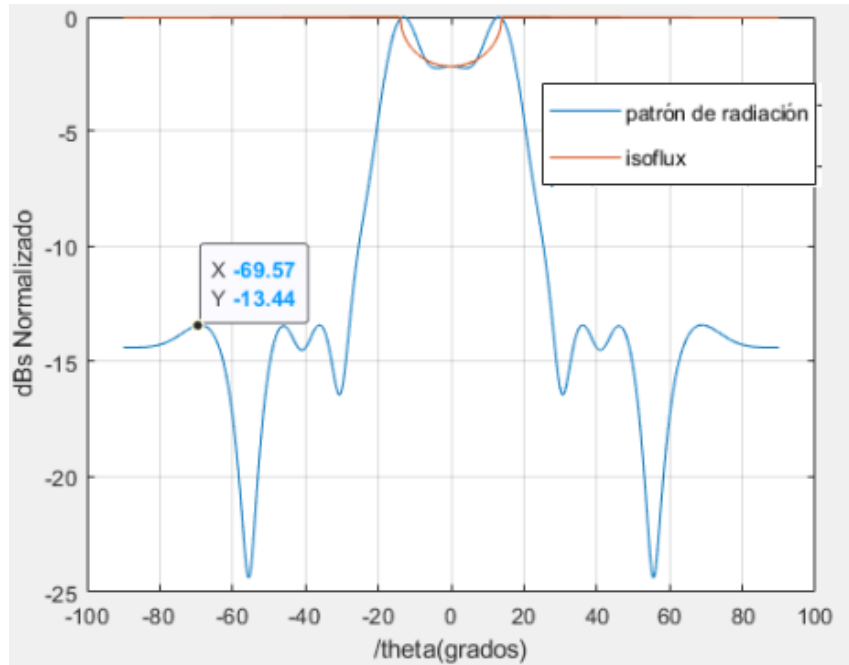
a)



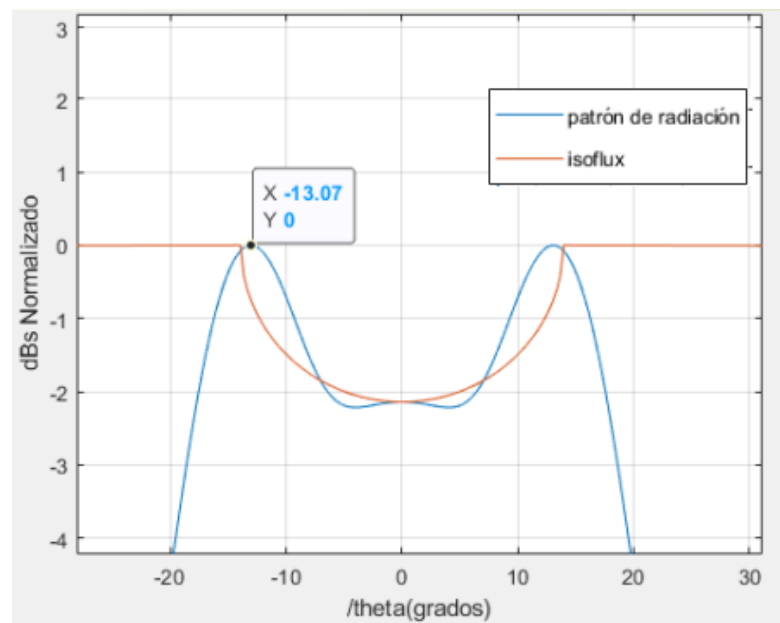
b)

Figura 29. Figura 29. a) Patrón de radiación generado a partir de 14 elementos de antena, un nivel de SLL de -14 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 13 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.

La Figura 30 muestra el último resultado obtenido que consideramos interesante para este caso MEO, para un factor de arreglo de un arreglo lineal de 14 elementos y separación uniforme. Este diagrama de radiación generado presenta valores de la máscara Isoflux MEO en $\pm 13^\circ$ con un nivel de lóbulos laterales bajo de aproximadamente -13.44 dB.



a)

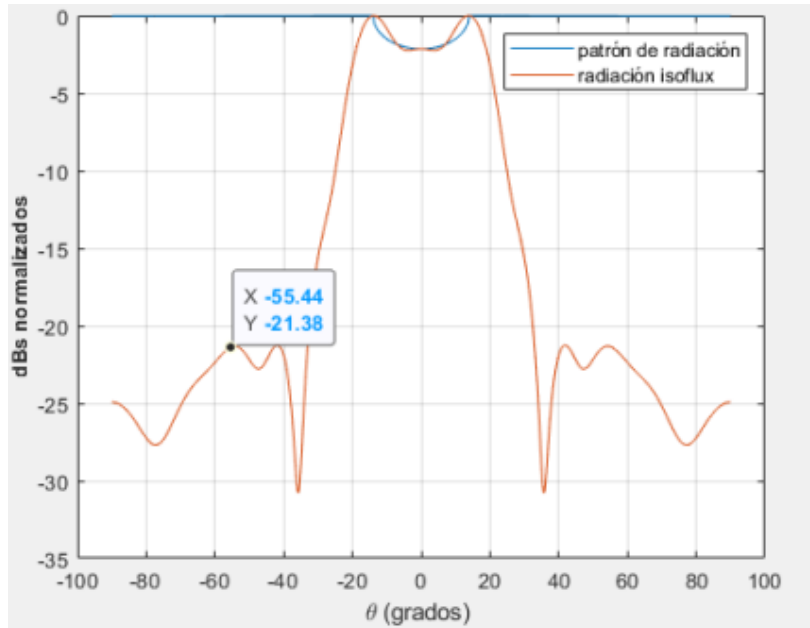


b)

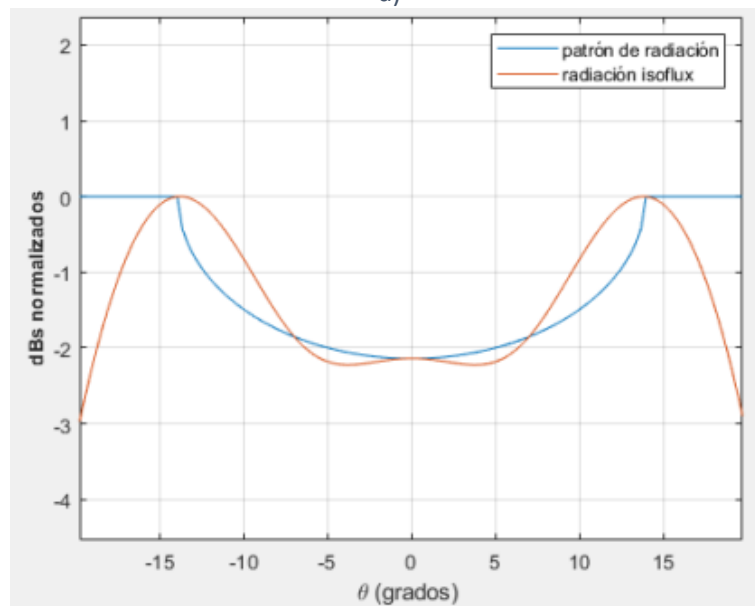
Figura 30. Figura 30. a) Patrón de radiación generado a partir de 14 elementos de antena, un nivel de SLL de -13.44 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 13 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.

Segundo caso:

Tal como se hizo con el caso GEO, los siguientes resultados para el caso de satélites MEO fueron obtenidos optimizando de manera simultánea amplitudes y separaciones entre elementos de antena. También, se considera un rango de separaciones entre 0.5λ y 1.0λ . La Figura 31 muestra el factor de arreglo generado por un arreglo lineal de 10 elementos y separación no uniforme. Como se muestra en la figura, el comportamiento del patrón de radiación ilustra valores muy cercanos a los puntos de la máscara, en los puntos de los extremos y el del centro.



a)

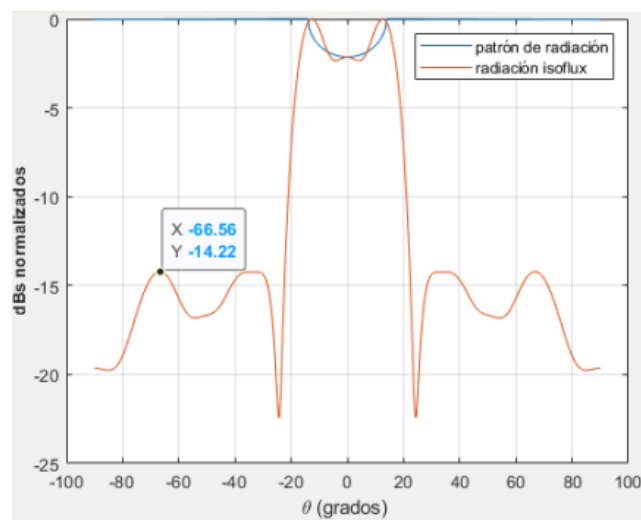


b)

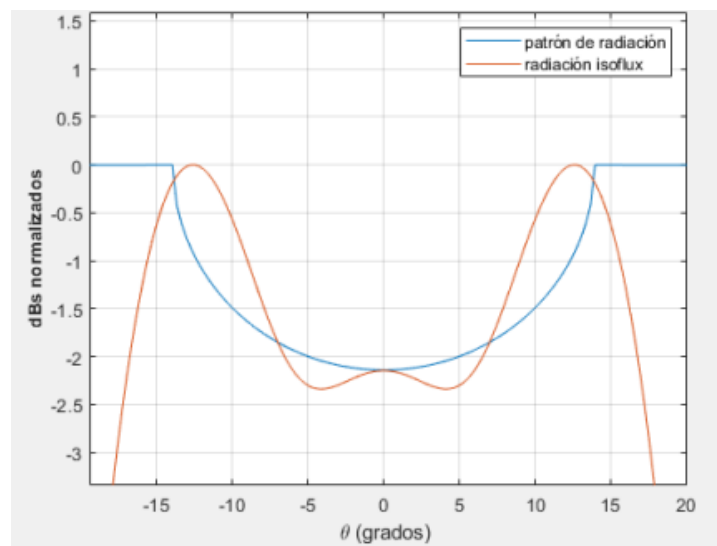
Figura 31. a) Patrón de radiación generado a partir de 10 elementos de antena, un nivel de SLL de -21.38 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 14 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.

Este es un patrón de radiación que presenta un nivel de lóbulos laterales bajo, de aproximadamente -21.38 dB en la apertura o ventana del haz requerido para satélites MEO en $\pm 14^\circ$. Dado que se tiene más grados de libertad, o más variables de decisión en el diseño, se obtienen mejores resultados que el caso anterior, cuando solamente se optimizan amplitudes.

La Figura 32 muestra otro factor de arreglo para satélites MEO optimizando amplitudes y separaciones entre elementos de antena. Este diagrama de radiación generado presenta un SLL de -14.22 dB en la máscara Isoflux MEO de $\pm 13^\circ$. En este caso, no se extiende tanto el haz en la de parte de abajo del patrón. Es un resultado que muestra un buen compromiso de diseño entre el error de la máscara Isoflux y el valor de SLL obtenido.



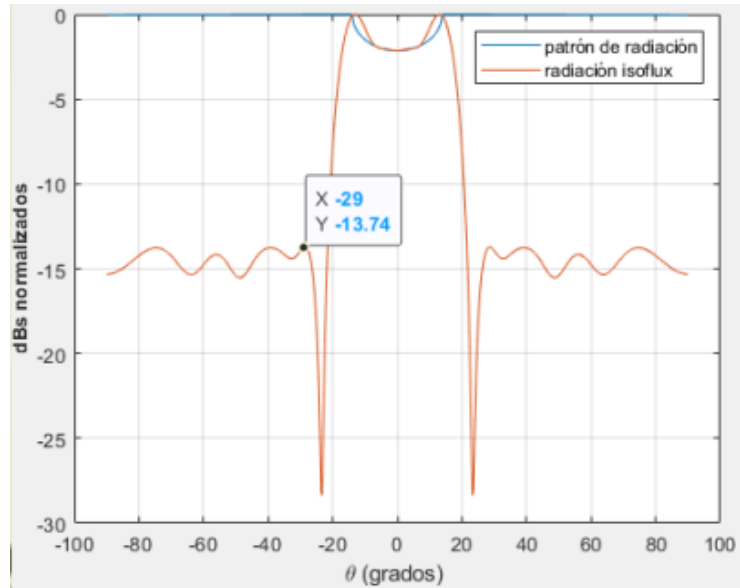
a)



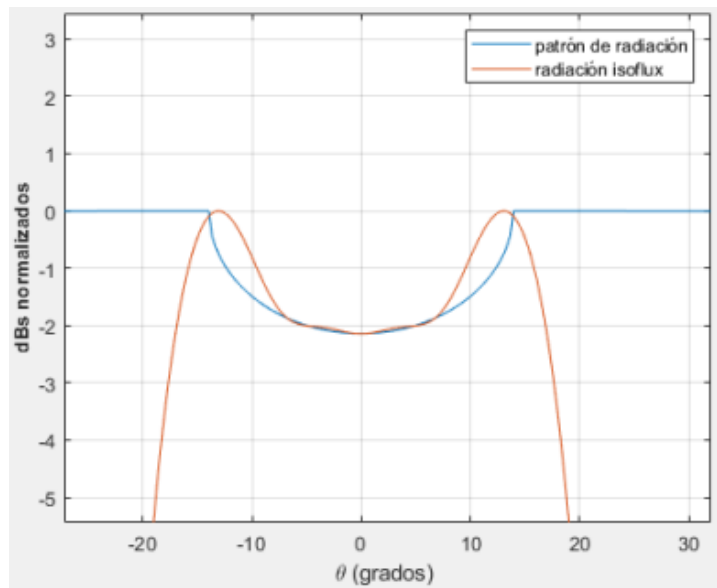
b)

Figura 32. a) Patrón de radiación generado a partir de 10 elementos de antena, un nivel de SLL de -14.22 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 13 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.

El siguiente resultado se ilustra en la Figura 33, donde se muestra otro factor de arreglo para satélites MEO optimizando amplitudes y separaciones entre elementos de antena. En este caso, el diagrama de radiación presenta un SLL de -13.74 dB en la máscara Isoflux MEO de $\pm 13^\circ$. También como en el resultado anterior, no se extiende tanto el haz en la parte de abajo del patrón.



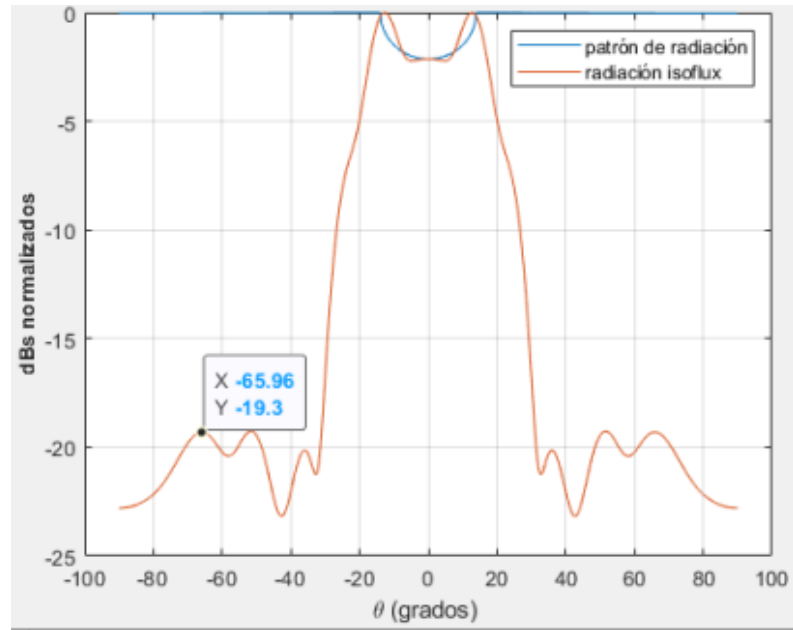
a)



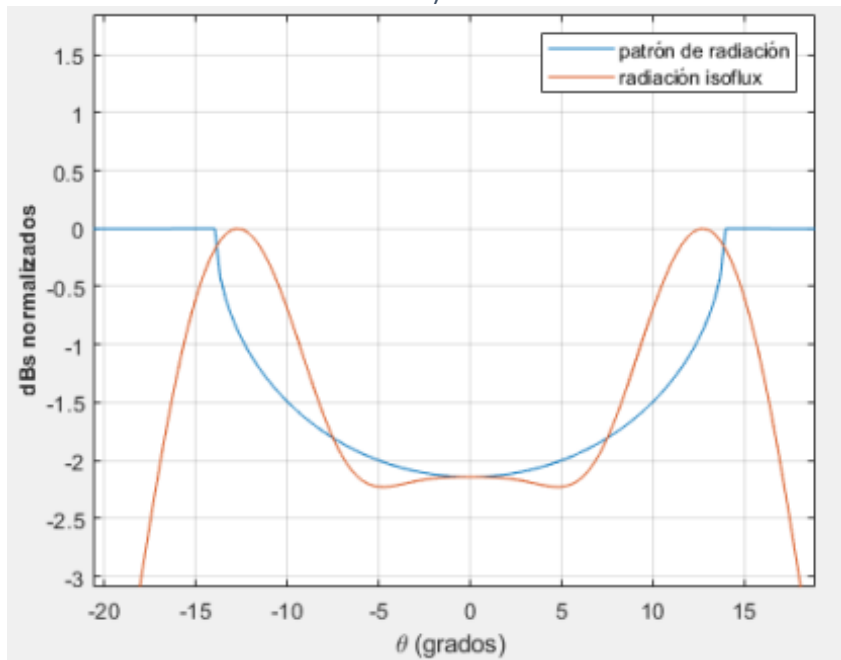
b)

Figura 33. a) Patrón de radiación generado a partir de 10 elementos de antena, un nivel de SLL de -13.74 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 13 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.

En el siguiente resultado que se muestra en la Figura 34, se puede apreciar que el comportamiento del factor de arreglo presenta una anchura grande en la parte de abajo, a diferencia de los casos anteriores. En este caso, el diagrama de radiación presenta un SLL de -19.3 dB en la máscara Isoflux MEO de $\pm 14^\circ$.



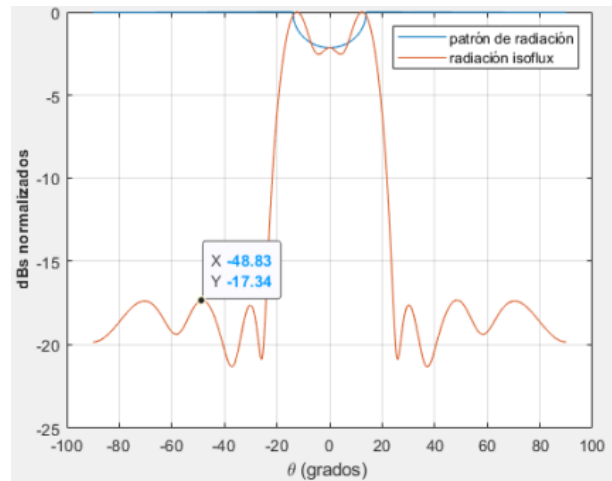
a)



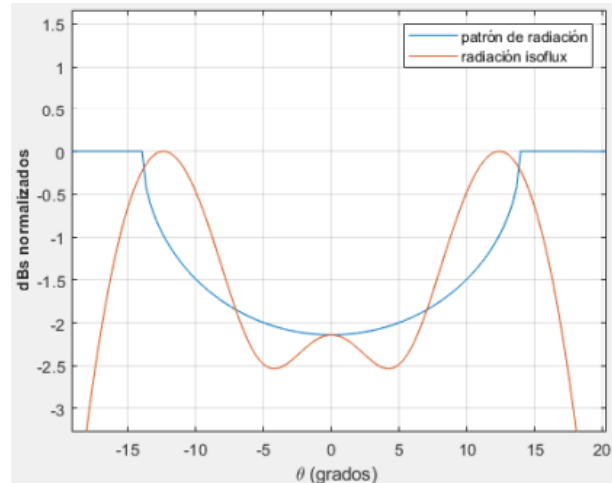
b)

Figura 34. a) Patrón de radiación generado a partir de 10 elementos de antena, un nivel de SLL de -19.3 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 14 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.

Finalmente, la Figura 35 muestra otro factor de arreglo para satélites MEO optimizando amplitudes y separaciones entre elementos de antena. Para este diagrama de radiación generado por el algoritmo genético se tiene un SLL de -17.34 dB en la máscara Isoflux MEO de $\pm 13^\circ$. Se tiene un buen compromiso de diseño entre el error de la máscara de Isoflux y el valor de SLL obtenido.



a)



b)

Figura 35. a) Patrón de radiación generado a partir de 10 elementos de antena, un nivel de SLL de -17.34 dB y una apertura de haz de aproximadamente de ± 13 grados, b) vista en detalle de la radiación obtenida.

5.5. Conclusiones

Como se pudo apreciar en los resultados que presentamos a lo largo de este capítulo, los algoritmos genéticos se pueden considerar como una herramienta de diseño adecuada para analizar y estudiar estructuras de arreglos de antena que requieran generar una radiación Isoflux, tanto en las órbitas satelitales del tipo GEO y en las órbitas MEO.

En esta tesis se analizó y se estudió la aplicación de esta herramienta de optimización para generar radiación Isoflux en dos tipos de órbitas satelitales: GEO y MEO. Para esto se planteó como variables de decisión o de diseño las amplitudes (con separación uniforme), y también optimizar simultáneamente amplitudes y separaciones entre elementos de antena.

En todos los casos se generaron, desde nuestra perspectiva, resultados buenos y aceptables en cuanto a los objetivos de diseño que se plantearon como el SLL, que debe generarse manteniendo un error mínimo en los puntos de la máscara Isoflux de las órbitas GEO y MEO.

También, se puede concluir que el caso de satélites GEO presentó mejores resultados que el caso MEO. Esto se debe, a que cuando utilizas un arreglo de antenas es más fácil generar un haz de radiación estrecho, o es más fácil cumplir valores de ángulo de la máscara en una ventana menos amplia, como es el caso de las órbitas satelitales tipo GEO.

También se puede concluir que el caso de optimización con amplitudes no uniformes y separación no uniforme obtuvo mejores resultados en valor del SLL y el error de la máscara Isoflux, con respecto al caso de optimizar solamente excitaciones de amplitud. Esto era un resultado esperado dado que se tienen más variables de decisión y por lo tanto nos permite tener más grados de libertad generando resultados con mejor calidad en el SLL.

Tablas 3-4 muestran valores numéricos del valor de SLL generado para cada uno de los casos, ancho de haz radiación Isoflux, número de elementos de antena y valores de amplitudes y separaciones entre elementos de antena obtenidos. Estas tablas resumen de manera general los resultados obtenidos, con mejores resultados cuando tenemos optimización en las amplitudes y en las separaciones de manera simultánea.

Tabla 3 Valores utilizados en el algoritmo.

Caso de diseño (GEO)	Amplitudes y/o separaciones	SLL (dB)	Ancho de haz de radiación Isoflux	Número de elementos
Excitación no uniforme ($d=\lambda/2$)	0.9933, 1.6884, 0.0652, -4.2976, -8.4078, -9.9995, -8.8344, -4.652, -0.0023, 2.5567, 1.4207, -0.0989	-24.42	$\pm 8.26^\circ$	12
	0.4620, 2.7382, 0.4734, -2.0265, -6.2315, -8.886, -9.1775, -6.8412, -3.1357, -0.4463, 1.4048, 2.3347	-27.93	$\pm 6^\circ$	12
	2.5746, 5.2239, 7.5687, 9.5225, 8.7934, 3.8841, -1.9686, -3.869, -2.3121, -0.0877, 0.1685, -4.7271	-21.89	-7.66°	12
	-1.3186, -3.7253, -6.7, -8.6261, -8.8291, -7.1338, -3.8284, -0.7088, 2.1736, 1.9509, 2.0557, 1.5286	-20.42	$\pm 8.2^\circ$	12
Excitación no uniforme y separación no uniforme	-3.8684, -4.1626, -0.7559, 2.1055, 5.773, 9.1441, 9.7157, 9.222, 4.908, 3.7096, 0.1447, 1.6315/ 0.5735, 0.5196, 0.6657, 0.5326, 0.5146, 0.5065, 0.5261, 0.6061, 0.5591, 0.6436, 1.4929	-27.39	$\pm 8.0^\circ$	12
	-3.8684, -4.1626, -0.7559, 2.1055, 5.773, 9.1441, 9.7157, 9.222, 4.908, 3.7096/ 0.5735, 0.5196, 0.6657, 0.5326, 0.5146, 0.5065, 0.5261, 0.6061, 0.5591	-45.4	$\pm 8.0^\circ$	10
	0.1447, 1.6315, 3.9331, 1.8391, -2.1979, -7.1513, -9.9903, -9.6555, -5.9972, -2.922/ 0.8509, 1.258, 0.5732, 0.5189, 0.5223, 0.6031, 0.5363, 0.6081, 0.5782	-32.84	$\pm 8.0^\circ$	10

Tabla 4. valores utilizados en el algoritmo.

Caso de diseño (MEO)	Amplitudes y/o separaciones	SLL (dB)	Ancho de haz de radiación Isoflux	Número de elementos
Excitación no uniforme ($d=\lambda/2$)	-1.8137, -2.3319, 0.3591, 4.5362, 9.2027, 9.9914, 8.4309, 2.7189, -4.101, -2.8091, -2.0708, 4.693	-12.6	$\pm 13.97^\circ$	12
	-8.9986, 0.056, 2.9999, 4.2348, -2.4978, -5.9808, -9.8602, -9.9922, -9.144, -0.5121, 1.0163, 2.3146, 3.8125, -1.6207	-12	-13.07°	14
	3.9121, -3.746, -5.68, -1.3734, 5.4978, -5.9808, -9.8602, -9.9922, -9.144, -0.5121, 1.0163, 2.3146, 3.8125, -1.6207	-13.44	$\pm 13.07^\circ$	14
Excitación no uniforme y separación no uniforme	-4.504, -9.2146, -9.4869, -8.2113, -1.4, 3.8496, 6.7117, -0.6279, -2.508, -1.6509/ 0.6233, 0.5312, 0.5034, 0.6296, 0.5742, 0.6057, 0.55, 0.6066, 0.5485	-21.38	$\pm 14.0^\circ$	10
	0.7654, 1.735, -3.1686, -4.3097, 7.261, 9.692, 6.4374, 1.6551, 0.415, 0.4446/ 0.5549, 1.1759, 0.626, 1.139, 0.5447, 0.54, 0.5487, 1.2007, 0.5657	-14.22	$\pm 13.0^\circ$	10
	2.5801, 7.104, 9.5037, 9.6672, 4.5065, -6.5, -6.1684, 4.9773, 1.6722, -1.7321/ 0.6701, 0.6916, 0.7241, 0.6011, 0.7911, 0.612, 1.2039, 0.5264, 1.0581	-13.74	$\pm 13.0^\circ$	10
	-0.6482, -0.0041, 4.1945, 1.7767, -6.3797, -4.0147, 9.5094, 9.0605, 9.1945, 3.8186/ 0.7216, 0.7446, 0.6486, 0.5863, 0.7355, 1.3274, 0.5589, 0.5275, 0.7024	-19.3	$\pm 14.0^\circ$	10
	-1.5701, -1.192, 5.0646, 9.8938, 8.9366, 2.6531, -2.8614, -1.2399, 1.6841, -0.0214/ 0.5324, 0.7031, 0.5383, 0.5343, 0.5264, 0.8214, 0.644, 1.3862, 1.4431	-17.34	$\pm 13.0^\circ$	10

Capítulo 6. Conclusiones.

6.1. Conclusiones

La presente tesis abordó una necesidad actual en las nuevas tecnologías dentro del área de las comunicaciones inalámbricas, específicamente, este trabajo de investigación se enfocó dentro del área de antenas, para desarrollar aportaciones nuevas que cumplan con los requerimientos y exigencias del mundo tecnológico del presente. Se llevó a su realización el estudio para el diseño de un sistema de radiación tipo Isoflux enfocado en una geometría lineal de antenas utilizando herramientas de optimización basadas en algoritmos genéticos. Esto con el fin de lograr mejorar la eficiencia en un área de cobertura en órbitas satelitales que ofrece un sistema de comunicación inalámbrico controlado por un arreglo de antenas. El estudio se enfocó en el diseño de arreglos lineales de antenas y la optimización evolutiva mediante algoritmos genéticos, de manera que genere un patrón de radiación Isoflux para las órbitas satelitales GEO y MEO. También obtener características óptimas en relación al nivel de lóbulos laterales y el error de la máscara de radiación Isoflux para los diferentes diagramas de radiación controlados únicamente por sus excitaciones de amplitud y las separaciones entre elementos de antena. En este trabajo de investigación podemos destacar las siguientes conclusiones como las más importantes:

- Se demostró que un arreglo lineal de antenas puede generar radiación Isoflux para órbitas satelitales GEO y MEO. Esto utilizando un número diferente de elementos de antena en el arreglo. Los casos que presentaron resultados con buena calidad en términos del SLL y el error de la máscara fueron para un rango de número de elementos entre 10 y 14.
- En esta tesis se analizó y se estudió la aplicación de esta herramienta de optimización para generar radiación Isoflux en 2 tipos de órbitas satelitales (GEO y MEO). Para esto se planteó como variables de decisión o de diseño las amplitudes (con separación uniforme), y también optimizar simultáneamente amplitudes y separaciones entre elementos de antena. En todos los casos, desde nuestra perspectiva, el algoritmo genético generó resultados buenos y aceptables en cuanto a los objetivos de diseño que se plantearon como el SLL, que debe generarse manteniendo un error mínimo en los puntos de la máscara Isoflux de las órbitas GEO y MEO.
- El caso de satélites GEO presentó mejores resultados que el caso MEO. Esto se debe, a que cuando utilizas un arreglo de antenas es más fácil generar un haz de radiación estrecho, o es más fácil cumplir valores de ángulo de la máscara en una ventana menos amplia, como es el caso de las órbitas satelitales tipo GEO.

se generaron, desde nuestra perspectiva, resultados buenos y aceptables en cuanto a los objetivos de diseño que se plantearon como el SLL, que debe generarse manteniendo un error mínimo en los puntos de la máscara Isoflux de las órbitas GEO y MEO.

- El caso de optimización con amplitudes no uniformes y separación no uniforme obtuvo mejores resultados en valor del SLL y el error de la máscara Isoflux, con respecto al caso de optimizar solamente excitaciones de amplitud. Esto era un resultado esperado dado que se tienen más variables de decisión y por lo tanto nos permite tener más grados de libertad generando resultados con mejor calidad en el SLL.

6.2 Aportaciones

Además de las conclusiones descritas arriba, este trabajo también sirvió para aprender nuevos conceptos. Dentro de las aportaciones más importantes de nuestro trabajo de investigación se pueden destacar las siguientes:

- Se evaluaron diferentes casos de diseño para la utilización de un agrupamiento lineal de antenas a bordo de satélites artificiales girando en las órbitas MEO y GEO.
- Se generó radiación Isoflux dentro de los ángulos de apertura requeridos del satélite, considerando distintas alturas orbitales para los escenarios de simulación.
- Se emplearon técnicas heurísticas en agrupamientos de antenas para la optimización de los elementos de antena, excitaciones de amplitud y un nivel óptimo de SLL en satélites de órbita MEO y GEO.

6.3 Recomendaciones y trabajos a futuro.

Como recomendaciones para futuras líneas de investigación basadas en la problemática que abordó este trabajo de investigación, se pueden mencionar los siguientes puntos:

- Investigar el uso de antenas inteligentes en sistemas satelitales para generar otras opciones viables mediante otro tipo de geometrías logrando alcanzar mejores soluciones tomando como base el análisis realizado en esta tesis sobre un arreglo lineal.
- Optimización de arreglos de antenas mediante diferentes métodos de optimización evolutiva u multiobjetivo.
- Diseño de arreglos con excitaciones de amplitud y fase, para mejorar aún más el sistema de radiación tipo Isoflux en distintos diseños e implementarlas en orbitas LEO, MEO, GEO.
- Diseño de arreglos de antenas con radiación Isoflux para satélites en órbitas elípticas terrestres, donde la altura del satélite (y sus correspondientes patrones de radiación) vayan cambiando en tiempo real durante las distintas alturas orbitales entre el apogeo y perigeo.
- Diseño de arreglos de antenas con radiación Isoflux para satélites a distintas órbitas en futuras misiones extraterrestres, como la Luna y Marte, y posteriores misiones interplanetarias en un futuro más lejano.

Literatura citada

- Advantages of Satellite communication, disadvantages of Satellite communication. s/f. Consultado el 4 de agosto de 2021, de <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-satellite-communication.html>.
- Applications of satellites. Physics and Radio-Electronics. s/f. Consultado el 4 de agosto de 2021, de <https://www.physics-and-radio-electronics.com/satellite-communication/applicationsofsatellites.html>.
- Balanis, C. A. 1982. Antenna Theory: Analysis and Design. John Wiley and Sons. (2nd ed). USA. 816 pp.
- Caparrini, F. s/f Algoritmos Genéticos. Consultado el 12 de octubre de 2021, de <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=65>.
- European Space Agency (ESA). 2020. Types of orbits. s/f. Consultado el 4 de agosto de 2021, de https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits.
- Gavish, B. y Kalvenes, J. 1997. The impact of intersatellite communication links on LEOS performance. Telecommunication Systems, Springer Netherlands, 8(2–4), pp. 159–190. doi:10.1023/a:1019109420506.
- Gavish, B. 1997. LEO/MEO systems - Global mobile communication systems. Telecommunication Systems, Springer Netherlands, 8(2–4), pp. 99–141. doi:10.1023/a:1019105319597.
- Guney, K. y Onay, M. 2011. Optimal synthesis of linear antenna arrays using a harmony search algorithm. Expert Systems with Applications: An International Journal, Pergamon Press, Inc. PUB1185 Elmsford, NY, USA, 38(12), pp. 15455–15462. doi:10.1016/J.ESWA.2011.06.015
- Hayt, W. H. 1991. Teoría Electromagnética. McGraw-Hill. (5ª ed). México. 525 pp.
- Howell, E. 2015. What Is a Geosynchronous Orbit? Space.com. Consultado el 4 de agosto de 2021, de <https://www.space.com/29222-geosynchronous-orbit.html>
- Ibarra, M., Panduro, M. A., Andrade, Á. G. y Reyna, A. 2015. Design of sparse concentric rings array for LEO satellites. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 29(15), pp. 1983–2001. doi:10.1080/09205071.2015.1072479
- Koleck, T. 2003. Active antenna coverage synthesis for GEO satellite using genetic algorithm. Antennas and Propagation Society International Symposium, 1, 142–144.
- Lathi, B. P. 1993. Modern Digital and Analog Communication Systems Modern Digital and Analog Communication Systems. Oxford University Pres.

- Rios Nava, L:M. 2020. La evolución del Derecho Espacial y sus repercusiones en el Derecho Internacional. pp. 1–24. Consultado el 15 septiembre de 2021 de: <http://coordinacioneditorialfacultadderecho.com/assets/la-evoluci%C3%B3n-del-derecho-espacial-y-sus-repercusiones-en-el-derecho-internacional.pdf>
- Luque Ordóñez, J. 2013. Comunicaciones por satélite. Revista Digital de ACTA, 19p., Consultado el 29 de mayo de 2021 de: https://www.acta.es/medios/articulos/comunicacion_e_informacion/016001.pdf
- McMahon, G., Sugden, G., & Septiawan, R. (2003). Class dependent traffic allocation in a LEO satellite network. *Telecommunication Systems*, 22, 241–266.
- Maldonado, A. R., Panduro, M. A., Del Rio Bocio, C. y Mendez, A. L. 2013. Design of concentric ring antenna array for a reconfigurable isoflux pattern. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 27(12), pp. 1483–1495. doi:10.1080/09205071.2013.816877
- Miles, H. 1995. Artificial Satellites. *The Observational Amateur Astronomer*. pp. 253–269. doi:10.1007/978-1-4471-0389-9_17
- Monzingo, R. A., Haupt, R. L. y Miller, T. W. 2011. Introduction to adaptive arrays. *Introduction to Adaptive Arrays*, (2nd ed).. doi:10.1049/SBEW046E
- Morabito, A. F., Lagana, A. R., y Isernia, T. (2010). On the optimal synthesis of ring symmetric shaped patterns by means of uniformly spaced planar arrays. *Progress In Electromagnetics Research B*, 20, 33–48
- Moujahid, A., Inza, I. y Larrañaga, P. 2008. Algoritmos Genéticos. Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, Universidad del País Vasco Tema Genéticos. pp. 1–34. Consultado el 18 agosto de 2021 de: <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/temageneticos.pdf>
- Pereira, F. J. B. 2012. Algoritmos genéticos. *Manual de computação evolutiva e metaheurística*, pp. 25–47. doi:10.14195/978-989-26-0583-8_1
- Pro, L; Mamani, Z; Calmet, R; y Del Pino, L. 2004. Algoritmos genéticos, sus propuestas de aplicación: aprendizaje corporativo. *Rev. investig. sist. inform. Facultad de Ingeniería de Sistemas e Informática Universidad Nacional Mayor de San Marcos RISI* 1(1), 59-67 (2004). *Darwin*, 1(1), pp. 59–67. ISSN: 1815-0268 (impreso).
- Reyna, A., Panduro, M. A. y Del Rio-Bocio, C. 2012a. Design of aperiodic planar arrays for isoflux radiation in GEO satellites by applying evolutionary optimization. *Expert Systems with Applications*, 39(8), pp. 6872–6878. doi:10.1016/j.eswa.2012.01.009
- Reyna, A., Panduro, M.A., del Rio-Bocio, C. y Méndez, Design of different planar geometries of antenna arrays for isoflux radiation in GEO satellites, *Telecommun Syst* (2017) 65:269–279. DOI 10.1007/s11235-016-0227-6.

- Russo, P., D'Ippolito, A., Ferrarotti, A. y Ruggieri, M. 1997. A C/I advantageous satellite system configuration for land mobile applications. *Telecommunication Systems*, Springer Netherlands, 8(2-4), pp. 319-340. doi:10.1023/a:1019125924140
- Sáenz, R., (s/f). *Comunicaciones Satelitales. Teoría de las Comunicaciones*. Departamento de Ciencia y Tecnología Universidad Nacional de Quilmes. Buenos Aires, Argentina
- Stutzman, W. L., y Thiele, G. A. 1998. *Antenna theory and design* (2nd ed.). New York: Wiley
- Tomasi, W. 1996. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Prentice Hall. México. 858 pp.