

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

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

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

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



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

**Diseño de redes de conformación de haz para arreglos
circulares de antena basadas en estructuras periódicas de
radiación coherente**

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

Presenta:

Itzel Mota Castañeda

Ensenada, Baja California, México
2023

Tesis defendida por
Itzel Mota Castañeda

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza
Director de tesis

Dr. Jorge Enrique Preciado Velasco

Dr. Roberto Conte Galván

Dr. Eduardo Murillo Bracamontes



Dra. María del Carmen Maya Sánchez
Coordinadora del Posgrado en Electrónica y Telecomunicaciones

Dra. Ana Denise Re Araujo
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Itzel Mota Castañeda** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones.

Diseño de redes de conformación de haz para arreglos circulares de antena basadas en estructuras periódicas de radiación coherente

Resumen aprobado por:

Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza
Director de tesis

La tesis se enfoca en abordar los desafíos en sistemas de comunicación inalámbrica, con el objetivo principal de diseñar redes de conformación de haz eficiente para un arreglo circular de antenas. Esta red debe reducir la dependencia de cambiadores de fase o dispositivos activos y cumplir con patrones de radiación específicos. Para lograr esto, se propone una solución que combina una red de excitación cofasal y una red CORPS cilíndrica. La red de alimentación cofasal, optimizada mediante algoritmos genéticos, demuestra la capacidad de generar un haz de radiación que puede ser escaneado en todo el plano azimutal. Esto se logra aprovechando las propiedades de rotación y simetría del arreglo circular. Además, se alcanza un rendimiento destacado en la supresión de lóbulos laterales, con una reducción significativa de -16 dB en comparación con el caso sin optimizar. Esta mejora en la calidad del haz de radiación es crucial para la transmisión confiable de señales en sistemas de comunicación. La red CORPS cilíndrica presentada en la investigación simplifica la red de alimentación en un 50%. Permite generar una cantidad distribuida de haces en todo el plano azimutal, y la dirección de escaneo de cada haz se ajusta según el número de puertos de entrada. Cada puerto de entrada controla un haz de radiación, lo que simplifica la complejidad del sistema y permite un mayor control sobre los lóbulos laterales. A medida que se aumenta el número de elementos y puertos de entrada en el arreglo, se mejora aún más el rendimiento en la supresión de lóbulos laterales. Esto ofrece la flexibilidad de ajustar el nivel de lóbulos laterales según los requisitos específicos de diseño. La investigación ha demostrado que la combinación de una red de alimentación cofasal optimizada y una red CORPS cilíndrica ofrecen una solución efectiva para la conformación de haz en arreglos circulares de antenas. Esta solución reduce significativamente la dependencia de dispositivos activos, mejora la calidad de la señal y simplifica la operación del sistema. Estos resultados abren oportunidades para futuras investigaciones y prometen mejoras en la industria de las comunicaciones inalámbricas.

Palabras clave: Arreglo circular de antenas, algoritmos genéticos, Red CORPS cilíndrica.

Abstract of the thesis presented by **Itzel Mota Castañeda** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Telecommunications.

Design of beamforming networks for circular antenna arrays based on periodic coherent radiation structures

Abstract approved by:

Dr. Marco Antonio Panduro Mendoza
Thesis Director

This work is focused on the challenges in wireless communication systems, with the main objective of designing efficient beamforming networks for a circular antenna array. This network must reduce the reliance on phase shifters or active devices and meet specific radiation patterns. To achieve this, we propose two possible solutions: a cophasal excitation network and a cylindrical CORPS network. The cophasal feed network, optimized by genetic algorithms, generates a radiation beam that can be scanned in the whole azimuth plane. It is possible by taking advantage of the rotation and symmetry properties of the circular array. Furthermore, we achieve an outstanding performance in sidelobe suppression, with a significant reduction of -16 dB compared to the unoptimized case. This improvement in the quality of the radiation beam is crucial for the reliable transmission of signals in communication systems. The cylindrical CORPS network (presented in this research) simplifies the power network by 50%. It allows the entire azimuth plane to generate a distributed number of beams and adjust the scanning direction of each beam in according to the number of input ports. Each input port controls one radiation beam, simplifying the complexity of the system and allowing greater control over the side lobes. As the number of elements and input ports increases, sidelobe suppression performance is further improved. This proposal offers the flexibility to adjust the level of side lobes based on specific design requirements. Research has shown that the optimization of a cophasal feeder network and a cylindrical CORPS network offers an effective solution for beamforming in circular antenna arrays. This solution significantly reduces dependency on active devices, improves signal quality, and simplifies system operation. These results open up opportunities for future research and promise improvements in the wireless communications industry.

Keywords: Circular array of antennas, Genetic algorithms, Cylindrical CORPS network.

Dedicatoria

Esta tesis se la dedico a mi pequeño tesoro, Aimar Alain, cuya sonrisa ha sido mi inspiración. A mi familia, cuyo apoyo constante y amor han sido la base de cada logro. Con cariño y gratitud,
Itzel.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT, con número de becario 1004982) por el apoyo económico brindado durante estos dos años, y al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por permitirme realizar mi maestría y a mis profesores, estoy profundamente agradecida por su generosidad al compartir su experiencia y conocimiento.

A mis padres, aunque mi querido padre ya no está físicamente con nosotros, sé que sigue presente en mi corazón y que estaría inmensamente orgulloso de mis logros. Él fue y sigue siendo mi fuente de inspiración y motivación para estudiar y esforzarme al máximo en cada paso de este camino. Cada logro que alcanzo, lo hago en honor a su memoria. A mi querida madre, quiero agradecerte por estar siempre a mi lado, por tu amor incondicional y por apoyarme en cada decisión que he tomado. Tu dedicación y sacrificio han hecho posible que llegara hasta este punto en mi educación, y estoy profundamente agradecida por todo lo que has hecho por mí.

A mi esposo Joan David, que ha sido mi constante apoyo y compañero incansable a lo largo de mi maestría. Desde el inicio del programa de maestría, estuviste ahí, alentándome en cada paso del proceso. Agradezco tu paciencia para explicar conceptos complejos y tu disposición con tus conocimientos y experiencia para ayudarme en mi investigación, han sido de gran apoyo para mi desempeño. Quiero expresarte mi más sincero sentimiento por ser una parte esencial de mi vida y por compartir este logro conmigo. Este trabajo no solo representa mi esfuerzo individual, sino también el resultado de nuestros sueños compartidos y metas en común. Espero que este sea uno de los muchos logros que alcanzaremos juntos, te amo mucho.

A mi director, Dr. Marco A. Panduro Mendoza, su compromiso incansable y su disposición constante a lo largo de este arduo proceso de investigación ha sido fundamental. Esta tesis no habría sido posible sin su guía y su generosa dedicación. Su orientación, experiencia y sabiduría han sido una fuente inagotable de inspiración y aprendizaje en las distintas etapas de mi estancia en la Maestría. En momentos de duda, siempre estuvo dispuesto a brindarme su apoyo y aclarar mis inquietudes, lo cual valoro enormemente.

A mis sinodales, por sus valiosos consejos, recomendaciones y aportes a lo largo de este proceso de aprendizaje.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas	x
Glosario de términos	xi
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Análisis del estado del arte	4
1.4 Justificación	5
1.5 Hipótesis.....	6
1.6 Objetivos	7
1.6.1 Objetivo general.....	7
1.6.2 Objetivos específicos.....	7
1.7 Organización de la tesis.....	8
Capítulo 2. Arreglo de antenas	9
2.1 Introducción	9
2.2 Arreglo de antenas	10
2.3 Arreglo lineal	13
2.4 Arreglo circular	14
2.5 Diagrama de radiación	17
2.6 Retos de los arreglos de antenas	17

2.7	Conclusiones.....	18
Capítulo 3. Redes de conformación de haz.....		20
3.1	Introducción	20
3.2	Redes de conformación de haz basada en Butler	21
3.3	Redes de conformación de haz basada en sub-arreglos.....	22
3.4	Redes de conformación de haz basada en CORPS.....	24
3.5	Conclusiones.....	27
Capítulo 4. Metodología.....		29
4.1	Introducción	29
4.2	Diseño de arreglo circular utilizando una red de excitación cofasal.....	29
4.2.1	Planteamiento del problema de diseño.....	32
4.2.2	Algoritmo de optimización.....	34
4.3	Diseño de arreglo circular utilizando una red CORPS cilíndrica.....	34
4.4	Conclusiones.....	38
Capítulo 5. Resultados de simulación.....		40
5.1	Introducción	40
5.2	Resultados del caso de la red de excitación cofasal	40
5.3	Resultados del caso de utilizar una red CORPS cilíndrica.....	44
5.4	Conclusiones.....	47
Capítulo 6. Conclusiones		49
6.1	Conclusiones generales.....	49
6.2	Contribuciones realizadas.....	50
6.3	Trabajos a futuro.....	50
Literatura citada		52

Lista de figuras

Figura	Página
1. Esquema básico de un arreglo de antenas(Balanis, 1997).....	10
2. Distintas representaciones del diagrama de radiación (Cardama et al., 1998).....	12
3. Representación del ancho de haz.	12
4. Representación de un arreglo lineal.	13
5. Geometría de un arreglo circular (Balanis, 1997).	15
6. Matriz Butler 4x4 (Poisel, 2012).....	22
7. Representación de un esquema de sub-arreglos (Avser et al., 2016).	23
8. Representación de un esquema de sub-arreglo mostrando el dispositivo divisor de potencia (Nemit & Park, 1972).....	23
9. Nodos de división (S) y nodos de recombinación (R).....	25
10. Red CORPS en un arreglo lineal (M. Panduro & Del Río, 2008).	26
11. Red CORPS de 1x4 con 3 capas (Fonseca, 2012).....	27
12. Esquema de un arreglo circular con 12 elementos.....	30
13. Comportamiento de la excitación cofasal de un arreglo circular de 12 elementos.	30
14. Diseño de un arreglo circular utilizando excitación cofasal.....	32
15. Estructura cilíndrica donde se establece una red CORPS.	35
16. Distribución de amplitud generada por la red CORPS cilíndrica (Fonseca, 2012).	36
17. Valores de amplitud generadas por la red CORPS cilíndrica (Fonseca, 2012).	36
18. Diseño de arreglo circular usando una red CORPS cilíndrica 7x14.	37
19. Comportamiento del factor de arreglo obtenido usando la red de excitación cofasal optimizada con algoritmos genéticos y su comparación con el caso sin optimizar.	41
20. Comportamiento del factor de arreglo utilizando propiedades de rotación de la excitación cofasal de la estructura de arreglo circular.....	43
21. Diagrama a bloques o esquemático del resultado arrojado por el algoritmo genético.	43

22. Patrón de radiación generado por el sistema de red CORPS cilíndrica (Fig. 18) utilizando 14 elementos de antena y 7 puertos de entrada..... 45
23. Patrón de radiación generado por el sistema de red CORPS cilíndrica utilizando 20 elementos de antena y 10 puertos de entrada..... 46

Lista de tablas

Tabla

Página

1. Valores de fase para direcciones de escaneo del haz principal (en grados)..... 31

Glosario de términos

#

5G *5th Generation* 5ta Generación

A

AF *Factor de Arreglo*

C

CORPS *Coherently Radiating Periodic Structures* Red de núcleo

D

dB Decibelio

M

MatLab Laboratory Matrix

S

SLL *Side Lobe Level* Nivel de lóbulo lateral

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

En el campo de las comunicaciones inalámbricas modernas, la demanda de capacidad y eficiencia en la transmisión de señales es cada vez mayor. Los sistemas de antenas desempeñan un papel fundamental en el rendimiento global de estos sistemas, ya que permiten la transmisión y recepción de señales electromagnéticas.

Los requerimientos actuales de los sistemas de las generaciones que van a venir requieren que los sistemas de radiación se adapten a las demandas. Es decir, se necesitan diseños de sistemas de antenas basadas en nuevas configuraciones o estructuras que permitan satisfacer las próximas generaciones.

Los sistemas basados en arreglos de antenas pueden resultar muy complejos dependiendo en la estructura y el número de elementos a utilizar. Además, la complejidad en el diseño de un sistema de arreglo de antenas depende directamente de la red de alimentación o conformación de haz establecida.

La mayoría de los sistemas basados en arreglos de antenas utilizan dispositivos activos por cada elemento de antena. En estos casos, el número de cambiadores de fase variables (dispositivos activos) impacta fuertemente en la complejidad y el desarrollo del sistema. Por lo tanto, es altamente deseable establecer redes de conformación de haz que utilicen un número menor de cambiadores de fase variables como dispositivos activos para reducir la complejidad del sistema.

De hecho, se puede mencionar que es un problema abierto en el estado del arte establecer la mejor configuración de diseño para una estructura de arreglo de antenas para una aplicación en específico.

Los arreglos circulares de antenas se han convertido en una elección popular debido a su capacidad para proporcionar cobertura omnidireccional y mejorar la calidad de la señal en diversas aplicaciones como comunicaciones móviles, radares y sistemas de satélites.

Un desafío clave en el diseño de arreglos circulares de antenas radica en la conformación del haz de radiación. La conformación del haz se refiere al proceso de controlar la dirección y forma del patrón de

radiación de la antena, con el objetivo de lograr un rendimiento óptimo en términos de cobertura y capacidad de comunicación. Para abordar este desafío, se han desarrollado diversas técnicas, entre ellas, las redes de conformación de haz, que permiten manipular las señales de entrada y salida del arreglo de antenas para lograr un enfoque direccional en una determinada dirección o sector.

En el diseño de arreglos de antenas se utilizan muchas técnicas para reducir la complejidad del sistema disminuyendo el número de cambiadores de fase variables empleados, tales como: la técnica de sub-arreglos (Avser et al., 2016a, 2018), las redes tipo Butler (Butler, 1961) y CORPS (Juárez et al., 2021; M. A. Panduro & del Rio-Bocio, 2009) (estructuras periódicas de radiación coherente). En la técnica de sub-arreglos se utiliza un cambiador de fase para un grupo de varios elementos de antena, a diferencia de una red tradicional en la cual se utiliza un cambiador de fase para cada elemento de antena. En una red de conformación de haz tipo Butler se puede tener la capacidad de generar haces múltiples en un mismo sistema de arreglo de antenas, la cual utiliza acopladores direccionales y cambiadores de fase fijos. El caso de CORPS se define por la iteración alternativa de nodos de división (S) y nodos de recombinación (R). El nodo de división está compuesto por un puerto de entrada y dos de salida, recibe energía y la redistribuye equitativamente entre sus salidas. Los nodos de división también son responsables de la interconexión entre las diferentes capas de la red. Los nodos de recombinación, compuestos por dos puertos de entrada y una salida hacen posible recombinar la energía ingresada a través de sus puertos de entrada. El proceso de recombinación es, de hecho, una suma vectorial del campo a lo largo de un nodo de recombinación (M. A. Panduro & del Rio-Bocio, 2009).

Aunque estas técnicas han sido aplicadas con éxito en el diseño de arreglos de antenas para disminuir la complejidad del sistema, se requiere más estudio para generar nuevas configuraciones de diseño con diferentes estructuras de arreglos de antenas para simplificar la red de alimentación reduciendo el número de dispositivos activos o cambiadores de fase variables con un rango amplio de escaneo del haz principal y nivel bajo de lóbulos laterales.

Además del diseño y la implementación de las redes de conformación de haz, se llevará a cabo un análisis exhaustivo del rendimiento de los arreglos circulares de antenas diseñados.

En conclusión, esta investigación se centrará en el diseño y análisis de redes de conformación de haz para arreglos circulares de antenas basadas en estructuras periódicas de radiación coherente. Se espera que los resultados obtenidos contribuyan al avance de las tecnologías de antenas y brinden soluciones efectivas para aplicaciones futuras en comunicaciones inalámbricas. El presente estudio se basará en una

combinación de análisis teórico, simulación por computadora para validar la eficacia y el rendimiento de las redes de conformación de haz propuestas.

1.2 Planteamiento del problema

Desde hace muchos años, se ha impulsado a gran escala el surgimiento de nuevas tecnologías para los sistemas de comunicaciones inalámbricas, lo que ha llevado a buscar estrategias que puedan satisfacer las nuevas demandas.

Para introducir las nuevas generaciones, es necesario desarrollar sistemas capaces de operar con la escasez del espectro radioeléctrico disponible para las comunicaciones inalámbricas. Es en el desarrollo de estas tecnologías, en donde los sistemas basados en arreglos de antenas toman gran importancia, ya que son el elemento primordial para la emisión y recepción de la información.

Por lo que es necesario establecer redes de conformación de haz que permitan reducir la complejidad y generar un diagrama de radiación con las características deseadas: un rango amplio de escaneo del haz principal con un nivel bajo de lóbulos laterales.

En el estado del arte se han desarrollado técnicas basadas en CORPS para disminuir la complejidad del sistema, pero se han aplicado solamente a arreglos de antenas con geometría lineal (Juárez et al., 2021, 2022). Dado que se ha demostrado que el uso de CORPS permite reducir significativamente el número de cambiadores de fase en arreglos lineales de antenas, se podrían considerar otras estructuras de arreglos de antenas como las circulares para generar diferentes configuraciones de diseño.

Estas técnicas o configuraciones de diseño de sistemas basados en arreglos de antena serían de gran utilidad para los sistemas de comunicaciones de nueva generación. Es debido a esta necesidad y a la importancia de sistemas que en este trabajo de tesis se aborda el diseño de arreglos circulares de antenas, que utilicen estructuras periódicas de radiación coherente.

El problema o reto de diseño consiste en establecer una red de conformación de haz para alimentar a un arreglo de antenas con una geometría circular. Esta red de conformación de haz debe considerar la excitación de fase requerida a nivel de los elementos de antena, para generar un diagrama de radiación con un rango amplio de escaneo del haz principal.

Además, esta red se debe adaptar de manera conveniente para que los valores de amplitud entregados en los elementos de antena permitan generar valores de nivel bajo de lóbulos laterales. Esta nueva configuración de diseño debe reducir el número de cambiadores de fase empleados para geometrías de arreglos de antenas circulares. Esto se puede lograr con la utilización de CORPS, con el hecho de tener menos complejidad se tienen sistemas más baratos y su aplicación es más simple en las redes de comunicaciones de nueva generación.

1.3 Análisis del estado del arte

El diseño de redes de conformación de haz para arreglos circulares de antena basados en estructuras periódicas de radiación coherente se encuentra en constante evolución y ha sido objeto de numerosas investigaciones en el campo de las comunicaciones inalámbricas. A continuación, se presenta un análisis del estado del arte sobre las principales investigaciones y avances relacionados con este tema.

Investigaciones sobre arreglos circulares de antena en el trabajo de (Nechaev et al., 2011), se propone un enfoque basado en un algoritmo de formación de haces de un conjunto de antenas circulares con ceros extendidos basado en el uso de la función de correlación del conjunto de antenas, que debe proporcionar una distribución de energía de la señal angular uniforme o gaussiana continua a lo largo de la dirección dada.

En el estudio de (H.-T. Zhang et al., 2018), se presenta un arreglo circular de antena con elementos activos controlados electrónicamente, lo que permite la conformación de haz adaptable. Además, se observa un mejor rendimiento en términos de cobertura y calidad de señal.

Redes de conformación de haz en arreglos de antenas en el trabajo de (Al-Sadoon et al., 2022), estudios e investigaciones recientes se han centrado en nuevas soluciones en diferentes elementos y etapas para las crecientes demandas de energía y velocidad de datos para la quinta generación y más allá (5G). Basado en un enfoque de formación de haz digital nuevo y eficiente para redes de comunicación inalámbrica 5G.

En el estudio de (Khan et al., 2022), se investiga el uso de técnicas de aprendizaje profundo para el diseño de redes de conformación de haz en arreglos de antenas. Los resultados demuestran una mayor adaptabilidad y una mejor capacidad de cancelación de interferencias, en comparación con los métodos tradicionales.

Estructuras periódicas de radiación coherente en el trabajo (Betancourt & Del Rio, 2007), propusieron una metodología para diseñar redes de conformación de haces para alimentar arreglos de antenas centrando el interés en la capacidad de escaneo del haz principal y reducción de la complejidad de los sistemas comunes (M. Panduro & Del Río, 2008) presentaron el diseño de redes de conformación de haz con capacidad de escaneo de haces múltiples basadas en CORPS. Este diseño considera la optimización de las entradas complejas de la red de alimentación mediante el uso de un algoritmo de Evolución Diferencial. Los resultados revelan que el diseño de esta red permite generar haces múltiples escaneables con una simplificación significativa de la red de alimentación. (Juárez et al., 2021) propusieron una técnica de diseño innovadora para alimentar arreglos de antenas utilizando la tecnología CORPS para reducir el número de desfasadores en aplicaciones de escaneo limitado con bajo nivel de lóbulos laterales. La configuración propuesta se implementa aprovechando la propiedad de interpolación lineal de fase de una red CORPS de una capa. Esta configuración se crea mediante la interconexión de redes o bloques CORPS de 2×3 de manera estratégica para proporcionar una reducción en la cantidad de desfasadores y mantener la capacidad de escaneo.

En el estudio de (Sanchez et al., 2022), se presenta la aplicación de CORPS (estructuras periódicas coherentemente radiantes) para alimentación de CRA (matriz de anillos concéntricos) con un número reducido de desfasadores. El diseño propuesto para la estructura de anillos concéntricos proporciona una mejor capacidad de exploración con respecto a otras configuraciones existentes. Esta técnica de diseño utiliza redes CORPS de 2×3 ó 4×7 dependiendo de la configuración o el número de elementos de antena en el sistema de matriz en fase.

1.4 Justificación

La creciente demanda de comunicaciones inalámbricas de alta calidad y mayor capacidad ha impulsado la necesidad de desarrollar tecnologías de antenas más eficientes y efectivas. Los arreglos circulares de antena, debido a su capacidad para proporcionar cobertura omnidireccional y soportar múltiples usuarios, han sido ampliamente utilizados en diversas aplicaciones, como sistemas de comunicaciones móviles, redes de sensores inalámbricos y sistemas de satélites.

Sin embargo, los arreglos circulares de antena también presentan desafíos importantes, como la interferencia mutua entre elementos adyacentes y los lóbulos laterales no deseados en el patrón de

radiación. Estos desafíos pueden afectar negativamente tanto la calidad de la señal, la capacidad del sistema como la eficiencia espectral.

En este contexto, el diseño de redes de conformación de haz basadas en estructuras periódicas de radiación coherente se presenta como una solución prometedora para mejorar el rendimiento de los arreglos circulares de antena. Estas estructuras permiten un control más preciso del patrón de radiación, lo que resulta en una mayor directividad hacia la dirección deseada y una mejor supresión de los lóbulos laterales y la interferencia.

La justificación de esta tesis radica en la necesidad de abordar los desafíos mencionados, explorar técnicas y enfoques para mejorar el rendimiento de los arreglos circulares de antena en términos de cobertura, capacidad y calidad de la señal. Al diseñar redes de conformación de haz basadas en estructuras periódicas de radiación coherente, se espera lograr una mayor eficiencia espectral al enfocar la energía de transmisión y recepción hacia los usuarios objetivo y reducir la interferencia entre elementos del arreglo.

Además, esta tesis contribuirá al estado del arte en el campo de las antenas y las comunicaciones inalámbricas al desarrollar nuevas metodologías y algoritmos para el diseño de redes de conformación de haz. Estos avances podrían tener aplicaciones prácticas en el diseño y despliegue de sistemas de comunicación eficientes y confiables en diversas áreas, como las telecomunicaciones, la tecnología satelital y las redes de sensores inalámbricos.

En resumen, el diseño de redes de conformación de haz para arreglos circulares de antena basados en estructuras periódicas de radiación coherente es un tema de investigación relevante, y necesario, para mejorar el rendimiento de los sistemas de comunicación inalámbrica. Esta tesis busca abordar los desafíos existentes, explorar soluciones y contribuir al avance de la tecnología de antenas, brindando beneficios significativos en términos de cobertura, capacidad y calidad de la señal.

1.5 Hipótesis

"El diseño de redes de conformación de haz para arreglos circulares de antenas basada en estructuras periódicas de radiación coherente mejorará significativamente el rendimiento de los sistemas de comunicación inalámbrica en términos de cobertura, capacidad y calidad de la señal."

Esta hipótesis se basa en la premisa de que, al aprovechar las propiedades de las estructuras periódicas de radiación coherente, es posible lograr una conformación de haz más precisa y eficiente en arreglos circulares de antenas. Se espera que esto conduzca a una mejora sustancial en la cobertura de la señal, al permitir un enfoque direccional en la dirección deseada. Además, se anticipa que el uso de estas redes de conformación de haz aumentará la capacidad de los sistemas de comunicación inalámbrica al mitigar la interferencia. También se espera que la calidad de la señal se vea beneficiada, reduciendo los lóbulos laterales no deseados y mejorando la recepción de la señal en diferentes condiciones de propagación.

Esta hipótesis puede ser validada a través de un enfoque de diseño, simulación, donde se comparen los resultados de un arreglo circular de antenas basado en estructuras periódicas de radiación coherente. Al demostrar mejoras significativas en términos de cobertura, capacidad y calidad de la señal, se respaldaría la hipótesis planteada y se destacaría el potencial de las redes de conformación de haz en arreglos circulares de antenas.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Diseñar una red de conformación de haz utilizando CORPS para un arreglo circular de antenas que permita reducir el número de cambiadores de fase o dispositivos activos y cumplir con una radiación específica.

1.6.2 Objetivos específicos

- ✓ Desarrollar sistemas de radiación basados en arreglos circulares utilizando CORPS para reducir la complejidad del sistema manteniendo en niveles deseados las prestaciones de radiación del sistema.

- ✓ Implementar una técnica de excitación de amplitud que se adapte de manera conveniente a la estructura de diseño basada en CORPS para arreglos circulares.

- ✓ Evaluar las prestaciones del sistema en términos del número de cambiadores de fase o dispositivos activos usados y las características de radiación generadas.

1.7 Organización de la tesis

El presente trabajo de tesis se encuentra organizado de la siguiente manera. El capítulo 2 está dedicado a brindar una introducción a los arreglos de antenas. Se describirá en detalle qué es un arreglo de antenas y se destacarán las características y propiedades de los arreglos lineales y circulares. Se explicará el concepto de diagrama de radiación y se discutirán los retos asociados con los arreglos de antenas.

El capítulo 3 profundiza en el tema de las redes de conformación de haz. Se presentan diferentes técnicas y enfoques utilizados en el diseño de estas redes, incluyendo las basadas en el concepto de Butler, las basadas en sub-arreglos y las basadas en CORPS. Se analizan sus ventajas, limitaciones y aplicaciones.

En el capítulo 4 se describe la metodología utilizada en la investigación. Se presentará un modelo de diseño propuesto y se detallará la configuración de la red CORPS, incluyendo dos métodos específicos de implementación. Se brindarán explicaciones sobre las etapas y procesos involucrados en la metodología.

En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos a partir de la investigación. Se discuten los resultados relacionados con el Factor de Arreglo (AF) y el patrón de radiación de los arreglos circulares de antena diseñados. Además, se muestran los resultados de la simulación de la red CORPS y se evalúa su impacto en la alimentación de un arreglo circular. Se extraen conclusiones significativas de los resultados obtenidos.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones generales derivadas de la investigación realizada. Se resumen los hallazgos clave y se evalúa en qué medida se cumplieron los objetivos establecidos. Se destacan las contribuciones realizadas por la tesis y se proponen posibles trabajos a futuro que puedan surgir a partir de esta investigación.

Capítulo 2. Arreglo de antenas

2.1 Introducción

En el campo de las comunicaciones inalámbricas, los arreglos de antenas juegan un papel fundamental al permitir una transmisión y recepción de señales más eficiente y confiable. Estos sistemas consisten en la agrupación de múltiples elementos de antena que trabajan en conjunto para formar un patrón de radiación deseado. Los arreglos de antenas ofrecen ventajas significativas, como un mayor alcance, una mejor calidad de la señal y la capacidad de adaptarse a diferentes escenarios de comunicación.

Este capítulo de esta tesis de investigación se enfoca en brindar un marco teórico de los arreglos de antenas, comenzando con una introducción general en la Sección 2.2. En esta sección se presentará una descripción detallada de los conceptos básicos y los principios fundamentales que rigen el funcionamiento de los arreglos de antenas. Se discutirán temas como la directividad, la ganancia, el ancho de haz y el diagrama de radiación, destacando su importancia en el rendimiento global del sistema de comunicaciones.

La Sección 2.3 se centrará específicamente en los arreglos lineales de antenas, que son una configuración común utilizada en numerosas aplicaciones. Se analizarán las propiedades y características de estos arreglos, así como los métodos utilizados para optimizar su rendimiento, como el ajuste de fase y la adaptación de impedancia. Además, se discutirán las ventajas y limitaciones asociadas con los arreglos lineales.

Posteriormente, en la Sección 2.4 se abordarán los arreglos circulares de antenas, que presentan una configuración circular de elementos de antena. Estos arreglos circulares ofrecen beneficios únicos, como una mayor directividad y capacidad de formación de haces en diferentes direcciones. Se explorarán los métodos de diseño y las estrategias de conformación de haz utilizadas en los arreglos circulares, destacando su aplicabilidad en diversas áreas, como radares, comunicaciones satelitales y sistemas de posicionamiento global.

Además de analizar las características y propiedades de los arreglos de antenas, en la Sección 2.5 se discutirán los desafíos y las limitaciones asociadas con estos sistemas. Comprender estos desafíos es esencial para el diseño efectivo y la optimización de los arreglos de antenas.

En resumen, el Capítulo 2 proporcionará una base sólida de conocimiento sobre los arreglos de antenas, abordando tanto los aspectos teóricos como prácticos de estos sistemas. Esta comprensión establecerá las bases para el desarrollo de los siguientes capítulos, donde se explorará el diseño de redes de conformación de haz para arreglos circulares de antena basados en estructuras periódicas de radiación coherente.

2.2 Arreglo de antenas

De acuerdo con el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por sus siglas en inglés), un arreglo de antenas se define como un conjunto de dos o más antenas que trabajan juntas para lograr un rendimiento de radiación mejorado en comparación con una antena individual. Estos sistemas juegan un papel fundamental en las comunicaciones inalámbricas, ya que permiten mejorar la capacidad de transmisión y recepción de señales, así como adaptarse a diferentes escenarios y requisitos de comunicación. En esta sección, se proporcionará una introducción general a los arreglos de antenas, incluyendo sus conceptos básicos y principios fundamentales.

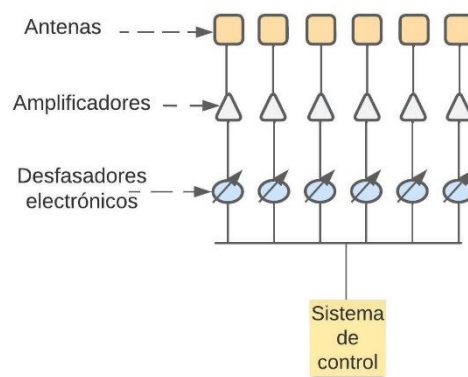


Figura 1 Esquema básico de un arreglo de antenas(Balanis, 1997).

En un arreglo de elementos idénticos, hay al menos 5 parámetros que se pueden usar para dar forma al

haz de radiación del arreglo (Balanis, 1997).

- Forma geométrica del arreglo (Lineal, circular, rectangular, esférico, etc.).
- Separación entre elementos.
- Excitación de amplitud de cada elemento de antena.
- Excitación de fase de cada elemento de antena.
- Patrón de radiación relativo de cada elemento de antena.

La directividad es una medida de la capacidad de un arreglo de antenas para concentrar la radiación en una dirección específica. Se define como la relación entre la radiación en una dirección particular y la radiación media de una antena isotrópica (Balanis, 2016). La ganancia, por otro lado, se refiere a la relación entre la radiación en una dirección dada y la radiación isotrópica máxima teórica (Pozar, 2011). Ambos conceptos son fundamentales para evaluar y comparar el rendimiento de los arreglos de antenas.

El diagrama de radiación representa gráficamente la forma en que una antena o un arreglo de antenas irradia energía en diferentes direcciones. Proporciona información sobre la distribución espacial de la potencia radiada y permite visualizar los lóbulos principales y secundarios. El control y optimización del diagrama de radiación es esencial para lograr un rendimiento deseado en los arreglos de antenas (Mailloux, 2018).

En la figura 2 se muestran ejemplos de representaciones de diagramas de radiación. En el inciso (a) el ángulo en el diagrama polar representa la dirección del espacio, mientras que el radio representa la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia radiada. En el inciso (b) en coordenadas cartesianas se representa el ángulo en las abscisas y el campo o la densidad de potencia en las ordenadas (Cardama et al., 1998).

El ancho de haz se refiere a la región angular sobre la cual la radiación de un arreglo de antenas es significativa. Puede ser estrecho, lo que indica una mayor concentración de energía en una dirección específica, o amplio, lo que permite una cobertura más amplia en diferentes direcciones. El ancho de haz

es un parámetro clave en el diseño de los arreglos de antenas, ya que determina la cobertura espacial y la capacidad de enfoque de la radiación (Balanis, 1997).

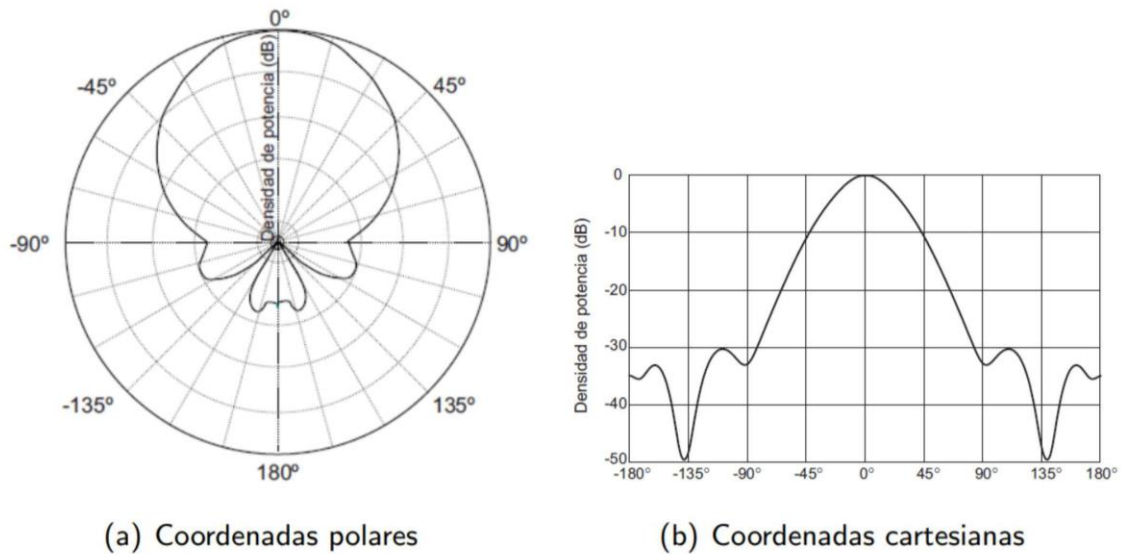


Figura 2 Distintas representaciones del diagrama de radiación (Cardama et al., 1998).

El ancho de haz es una figura de mérito muy importante y frecuentemente, se usa como un intercambio de compromisos entre éste y el nivel de lóbulos laterales; es decir, a medida que disminuye el ancho del haz, aumenta el nivel de lóbulos laterales y viceversa.

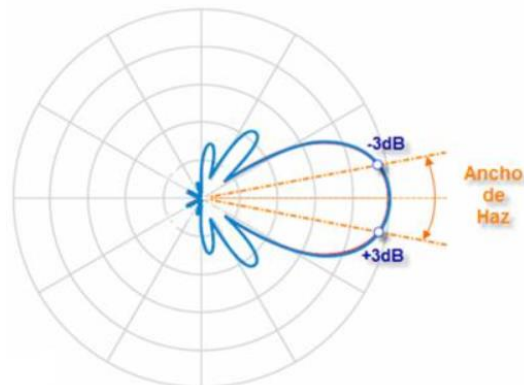


Figura 3 Representación del ancho de haz.

Aunque los arreglos de antenas ofrecen numerosas ventajas, también presentan desafíos y limitaciones.

Algunos de estos desafíos incluyen la interferencia entre elementos de antena cercanos, el acoplamiento electromagnético y la compensación de errores de fase y amplitud. Comprender estos retos es fundamental para el diseño efectivo y la optimización de los arreglos de antenas.

2.3 Arreglo lineal

Los arreglos lineales de antenas son una configuración común y ampliamente utilizada en una variedad de aplicaciones de comunicaciones inalámbricas. Estos sistemas consisten en una secuencia lineal de elementos de antena dispuestos en paralelo, lo que les permite trabajar de manera cooperativa para lograr un rendimiento optimizado.

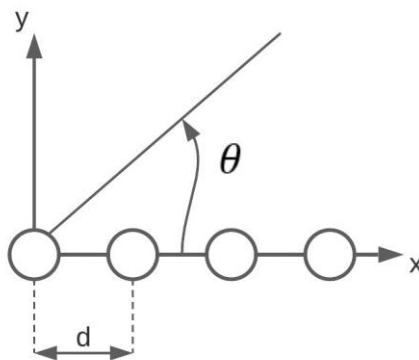


Figura 4 Representación de un arreglo lineal.

Si todos los elementos de antena tienen una separación igual entre ellos, entonces se habla de un arreglo lineal uniforme. Si en un arreglo lineal uniforme se considera a los elementos de antena como elementos isotrópicos, el factor de arreglo está dado por (Balanis, 1997):

$$AF = I_1 + I_2 e^{jkd \sin \theta} + I_3 e^{jk2d \sin \theta} + \dots + I_N e^{jk(N-1)d \sin \theta} = \sum_{n=1}^N I_n e^{jk(n-1)d \sin \theta} \quad (1)$$

donde I_n es el n -ésimo coeficiente de excitación, tanto de fase como de amplitud, j es la unidad imaginaria, $k = 2\pi/\lambda$ es el número de onda, d es la distancia de separación entre elementos de antena y θ es el ángulo en relación con el eje del arreglo.

La directividad en un arreglo lineal se puede mejorar al ajustar las amplitudes y fases de las señales de excitación de cada elemento de antena (Balanis, 2016). Además, la ganancia del arreglo lineal está directamente relacionada con su directividad y se define como la relación entre la intensidad radiada en una dirección específica y la intensidad radiada por una antena isotrópica.

El patrón de radiación de un arreglo lineal de antenas describe la forma en que la energía radiada se distribuye en diferentes direcciones. Dependiendo de las amplitudes y fases de las señales de excitación, se pueden lograr patrones de radiación con diferentes anchos de haz y directividades.

El ajuste de fase y la adaptación de impedancia son dos técnicas clave utilizadas para optimizar el rendimiento de los arreglos lineales de antenas. El ajuste de fase implica controlar las diferencias de fase entre las señales de excitación de cada elemento de antena, lo que permite direccionar el haz de radiación en una dirección específica. Por otro lado, la adaptación de impedancia busca minimizar las pérdidas de energía debido a las reflexiones y maximizar la transferencia de energía entre el transmisor y el arreglo de antenas (Mailloux, 2018).

Aunque los arreglos lineales de antenas ofrecen numerosas ventajas, como un mejor rendimiento en términos de directividad y ganancia, también presentan ciertas limitaciones. Algunas de estas limitaciones incluyen la restricción en la formación de haces en múltiples direcciones y la sensibilidad a la interferencia entre elementos de antena cercanos.

2.4 Arreglo circular

Los arreglos circulares de antenas son una configuración especializada que consiste en la disposición de elementos de antena en forma de anillo. Esta estructura circular permite una mayor flexibilidad en la dirección de radiación y una cobertura angular completa. En esta sección, se explorarán las propiedades, características y ventajas de los arreglos circulares de antenas, así como su aplicación en diversas áreas de comunicación.

Los elementos de antena en un arreglo circular se distribuyen de manera uniforme a lo largo de una circunferencia. Esta distribución simétrica permite una cobertura angular completa y una mayor flexibilidad en la dirección de radiación. En la figura 6 se puede observar la geometría de un arreglo circular, asumiendo N elementos isotrópicos y con distribución uniforme en el plano X-Y a lo largo de un anillo

circular de radio a . Es conveniente resaltar que, físicamente hablando, las corrientes de excitación de los elementos del arreglo son suministradas desde el centro de éste.

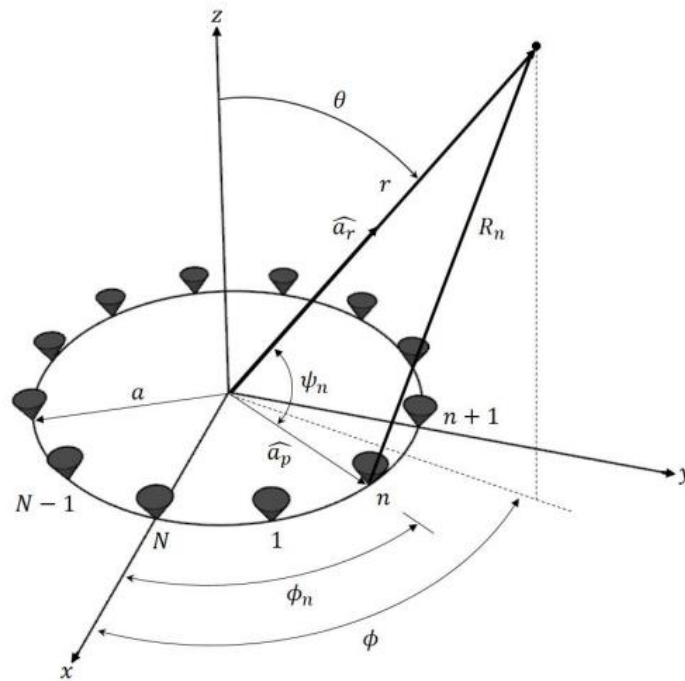


Figura 5 Geometría de un arreglo circular (Balanis, 1997).

El patrón de radiación de un arreglo circular de antenas presenta características distintivas en comparación con los arreglos lineales. Debido a la simetría circular, los arreglos circulares exhiben un patrón de radiación más isotrópico en todas las direcciones. Esto es particularmente útil cuando se requiere el diseño para una aplicación de este tipo, la cual el patrón de radiación rodee los 360 grados. Para un agrupamiento circular de distribución uniforme y excitación de fase progresiva, el factor de arreglo estará dado por (Balanis, 2016):

$$AF(\theta, \phi) = \sum_{N-1}^N I_n e^{kja[\sin(\theta) \cos(\phi - \phi_n) - \sin(\theta_0) \cos(\phi - \phi_n)]} \quad (2)$$

El control de fase es una técnica esencial en los arreglos circulares de antenas para lograr la formación de haces dirigidos en diferentes direcciones. Mediante el ajuste de las diferencias de fase entre las señales de excitación de cada elemento de antena, es posible direccionar y enfocar el haz de radiación. Este control en la fase se puede generar estableciendo una excitación de fase llamada cofasal (Balanis, 2016). Esta

excitación es la fase necesaria a través de los elementos de antena para dirigir el haz a una cierta dirección y se da por:

$$\alpha_n = -jka[\sin(\theta_0)\cos(\phi_0 - \phi_n)] \quad (3)$$

A continuación, se mencionan algunas de las principales aplicaciones en las cuales se pueden emplear los arreglos circulares de antena:

1. Comunicaciones inalámbricas: son ampliamente utilizados en sistemas de comunicaciones inalámbricas, como en redes celulares, donde se busca mejorar la cobertura y capacidad del sistema. Estos arreglos permiten una mejor distribución de la energía en diferentes direcciones y ofrecen una mayor flexibilidad en la formación de haces para optimizar la transmisión y recepción de señales.
2. Radares: son esenciales en sistemas de radar para la detección, seguimiento y localización de objetos. La disposición circular permite una cobertura omnidireccional y un seguimiento continuo de múltiples objetivos en diferentes ángulos. Estos arreglos también ofrecen una mayor resolución espacial y capacidad de discriminación.
3. Radiotelescopios: se utilizan en astronomía para la captación de señales provenientes del espacio exterior. Estos arreglos permiten realizar observaciones de radiofrecuencia de alta sensibilidad y proporcionan una cobertura angular amplia, lo que facilita la detección de fuentes celestiales y el estudio de fenómenos astrofísicos.
4. Sistemas de navegación por satélite: En sistemas de navegación por satélite, como el GPS, se emplean en receptores para recibir señales provenientes de múltiples satélites. Estos arreglos permiten una mejor capacidad de seguimiento de señales y una mayor resistencia frente a interferencias. Lo que resulta en una mayor precisión y confiabilidad en la determinación de la posición y el tiempo.
5. Sistemas de sonar: En aplicaciones acuáticas, como en sistemas de sonar utilizados en la exploración y detección submarina, los arreglos circulares de antenas se utilizan para la emisión y recepción de señales acústicas. Estos arreglos permiten un campo de visión de 360 grados y una mejor capacidad de detección y localización de objetos bajo el agua.

Estas son solo algunas de las aplicaciones fundamentales en las que se puede utilizar un arreglo circular de antenas. La versatilidad de estos arreglos los hace adecuados para una amplia gama de aplicaciones donde se requiere una cobertura angular completa, una mayor capacidad de formación de haces y una mejora en la sensibilidad y precisión de la detección (Balanis, 2016).

2.5 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación es una representación gráfica que describe la forma en que una antena irradia energía en el espacio. Proporciona información crucial sobre la directividad, la ganancia y los patrones de radiación de un arreglo de antenas (Cardama et al., 1998).

El diagrama de radiación muestra cómo varía la intensidad radiada en diferentes direcciones desde el arreglo de antenas. Es común representar el diagrama de radiación en forma de gráfico polar, donde el eje radial representa la intensidad radiada y el ángulo representa la dirección. Algunas de las características clave que se pueden analizar a partir del diagrama de radiación incluyen la directividad, el ancho de haz, los lóbulos principales y secundarios.

El estudio detallado del diagrama de radiación permite comprender y optimizar el rendimiento del arreglo de antenas. Se pueden utilizar técnicas como la formación de haces y el ajuste de fase para controlar y mejorar los patrones de radiación. Además, el diagrama de radiación proporciona información valiosa para determinar la cobertura espacial y la capacidad de enlace de un sistema de comunicación.

2.6 Retos de los arreglos de antenas

A pesar de las numerosas ventajas de los arreglos de antenas, su diseño y aplicación presentan una serie de retos técnicos que deben abordarse para lograr un rendimiento óptimo. En esta sección, se discutirán algunos de los principales retos asociados con los arreglos de antenas y las posibles soluciones propuestas.

Un desafío clave en el diseño de arreglos circulares de antenas radica en la conformación del haz de radiación. La conformación del haz se refiere al proceso de controlar la dirección y forma del patrón de radiación de la antena, con el objetivo de lograr un rendimiento óptimo en términos de cobertura y capacidad de comunicación.

Uno de los retos clave es la interferencia entre elementos de antena adyacentes. Cuando los elementos están colocados en proximidad, pueden producirse efectos no deseados como acoplamientos electromagnéticos, lo que puede degradar el rendimiento del arreglo. Se han propuesto técnicas de diseño como el enfoque de "elemento de antena aislado" y el uso de estructuras de alimentación adecuadas para mitigar este problema (Balanis, 2016).

Otro reto importante es la complejidad del control de fase y la formación de haces en arreglos de antenas. La elección de algoritmos adecuados y la implementación precisa de las redes de control de fase son cruciales para lograr una formación de haces eficiente y una cobertura espacial óptima. Se han investigado diferentes enfoques, como algoritmos de optimización y técnicas de aprendizaje automático, para abordar este desafío (K. Q. T. Zhang, 2016).

Además, los arreglos de antenas pueden verse afectados por el fenómeno de desvanecimiento multitrayectoria (*multipath*), que ocurre cuando las señales se reflejan, difractan o refractan en objetos y superficies cercanas. Este fenómeno puede introducir fluctuaciones en la intensidad de la señal recibida y afectar la calidad de la comunicación. Se han propuesto técnicas de diversidad espacial y procesamiento de señales adaptativo para mitigar los efectos del desvanecimiento multitrayectoria en los arreglos de antenas (Asplund et al., 2020).

Dado lo anterior es necesario establecer redes de conformación de haz que permitan reducir la complejidad y generar un diagrama de radiación con las características deseadas: un rango amplio de escaneo del haz principal con un nivel bajo de lóbulos laterales.

Es importante destacar que los retos mencionados anteriormente son solo algunos ejemplos de los desafíos comunes asociados con los arreglos de antenas. Con el avance de la tecnología y la investigación en este campo, se continúan proponiendo nuevas soluciones y enfoques para superar estos retos y mejorar el rendimiento de los arreglos de antenas.

2.7 Conclusiones

En este capítulo se abordó el tema de los arreglos de antenas, explorando su importancia en aplicaciones de comunicaciones y las diferentes configuraciones que se pueden utilizar. A continuación, se presentan las principales conclusiones obtenidas:

- Los arreglos de antenas son conjuntos de elementos radiantes que trabajan juntos para lograr un rendimiento mejorado en términos de ganancia, directividad y formación de haces.
- Los arreglos de antenas pueden ser lineales, circulares u otra geometría, según la disposición espacial de los elementos radiantes. Cada configuración tiene sus propias ventajas y desafíos, y la elección adecuada depende de los requisitos específicos de la aplicación.
- El diagrama de radiación es una herramienta importante para caracterizar los patrones de radiación de un arreglo de antenas. Proporciona información sobre la directividad y el ancho de haz, lo que es crucial para evaluar el rendimiento del arreglo.
- Los arreglos de antenas presentan diversos retos, como la interferencia entre elementos adyacentes, el control preciso de fase y la mitigación del desvanecimiento multitraectoria. Se requieren técnicas de diseño y procesamiento de señales adecuadas para superar estos desafíos y optimizar el rendimiento del arreglo.
- En conclusión, los arreglos de antenas son herramientas poderosas en el diseño de sistemas de comunicación, permitiendo un mejor rendimiento y cobertura espacial. Sin embargo, es importante considerar cuidadosamente los requisitos de la aplicación y los desafíos asociados para garantizar un diseño efectivo y eficiente de los arreglos de antenas.

Capítulo 3. Redes de conformación de haz

3.1 Introducción

En el presente capítulo, se aborda uno de los aspectos fundamentales de los sistemas de comunicación inalámbrica: la capacidad de optimizar la transmisión y recepción de señales mediante el uso de redes de conformación de haz. Estas redes constituyen una técnica clave para mejorar la eficiencia espectral y la calidad de la comunicación en entornos de propagación complejos y con alta interferencia. En este sentido, este capítulo examina tres enfoques principales de redes de conformación de haz: la basada en Butler, la basada en sub-arreglos y la basada en CORPS.

El concepto de redes de conformación de haz se basa en la capacidad de direccionar y enfocar la energía transmitida por una antena emisora hacia una dirección específica, lo que permite una comunicación más efectiva y una mayor inmunidad al ruido y a las interferencias. La capacidad de formar haces de radiación direccionales ha sido ampliamente explorada y adoptada en diversas aplicaciones, desde sistemas de comunicación inalámbrica hasta radares y sistemas de posicionamiento global.

En primer lugar, se presenta la red de conformación de haz basada en el enfoque de Butler (Butler, 1961). Esta técnica se basa en el uso de un conjunto de elementos radiantes dispuestos de manera circular o semicircular, conocidos como elementos de antena de Butler. Estos elementos, combinados con un control preciso de fase y amplitud, permiten generar haces direccionales que pueden adaptarse a diferentes patrones de radiación, lo que resulta en una mejora significativa en la capacidad de transmisión y recepción de señales.

A continuación, se explora la red de conformación de haz basada en sub-arreglos (Avser et al., 2016). Esta estrategia consiste en dividir la antena principal en sub-arreglos más pequeños, cada uno de ellos con su propio conjunto de elementos radiantes. La conformación de haz a través de sub-arreglos ofrece mayor flexibilidad en la adaptación del patrón de radiación a condiciones específicas de propagación, además de proporcionar una mayor capacidad para mitigar los efectos de la interferencia y mejorar la calidad de la señal recibida.

Finalmente, se introduce la red de conformación de haz basada en CORPS (*Coherently Radiating Periodic*

Structures, por sus siglas en inglés) (Betancourt & Del Río, 2007). Este enfoque se basa en el uso de estructuras periódicas de radiación coherente para lograr una conformación de haz eficiente. La utilización de CORPS permite obtener información sobre el entorno de propagación y las señales recibidas utilizando un número reducido de mediciones, lo que resulta en un ahorro de recursos de transmisión y una mayor capacidad para enfrentar situaciones de interferencia y obstrucción.

En resumen, este capítulo presenta una exploración exhaustiva de tres enfoques fundamentales en el campo de las redes de conformación de haz: la basada en Butler, la basada en sub-arreglos y la basada en CORPS. Se analizan las ventajas y desafíos asociados con cada enfoque, así como su aplicabilidad en diferentes esquemas.

3.2 Redes de conformación de haz basada en Butler

En esta sección, nos adentraremos en las redes de conformación de haz basadas en la técnica de Butler, la cual es ampliamente utilizada en el diseño de arreglos de antenas. Estas redes proporcionan una forma eficaz de manipular y controlar la dirección del haz radiado, permitiendo una comunicación más eficiente y confiable.

La idea central detrás de las redes de conformación de haz basadas en Butler es utilizar una combinación de divisores y combinadores de señal para ajustar las fases y amplitudes de las señales en cada elemento del arreglo. Esto permite dirigir el haz en una dirección específica y con un ancho determinado, lo que resulta especialmente útil en escenarios donde se requiere una alta directividad y una reducción de interferencias (Butler, 1961).

Uno de los componentes clave en las redes de conformación de haz basadas en Butler es el divisor de señal. Este dispositivo divide la señal de entrada en múltiples caminos, cada uno con una fase y amplitud ajustable. Posteriormente, las señales divididas se armonizan mediante un combinador de señal, donde se suman con las fases y amplitudes adecuadas. El ajuste preciso de estas fases y amplitudes permite la formación del haz deseado.

La figura 6 (Poisel, 2012) muestra una Red Butler 4x4 para generar cuatro haces independientes. En este caso es necesario el uso de cuatro acopladores direccionales de 3 dB, además de dos desfasadores fijos. El enfoque de Butler es particularmente útil en aplicaciones donde se requiere una dirección de haz precisa

y una alta directividad, como en sistemas de comunicación punto a punto o en radares de alta resolución. Además, estas redes pueden adaptarse a diferentes condiciones de propagación y escenarios de comunicación mediante la configuración de los divisores y combinadores de señal.

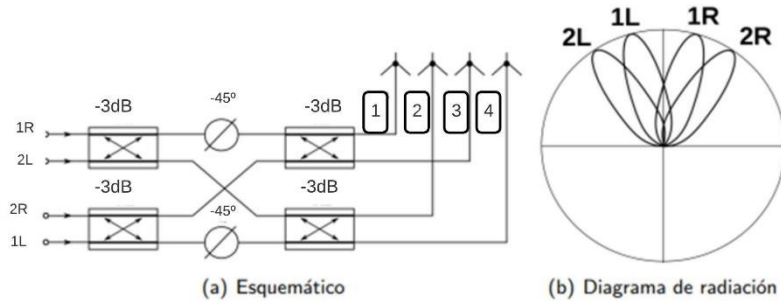


Figura 6 Matriz Butler 4x4 (Poisel, 2012).

Es importante mencionar que el diseño y la optimización de redes de conformación de haz basadas en Butler implican consideraciones técnicas y prácticas. La elección del número de divisiones, la disposición de los elementos del arreglo y la distribución de las amplitudes y fases de las señales son algunos de los factores que deben ser cuidadosamente analizados y ajustados para obtener un rendimiento óptimo.

En la literatura especializada, se han propuesto varios enfoques y algoritmos para el diseño y la optimización de redes de conformación de haz basadas en Butler. Estos incluyen técnicas basadas en optimización convexa, algoritmos genéticos, algoritmos de enjambre de partículas, entre otros. Estas metodologías permiten encontrar configuraciones óptimas de divisores y combinadores de señal para maximizar la potencia recibida o transmitida, mejorar la relación señal-ruido y minimizar las interferencias.

En resumen, las redes de conformación de haz basadas en Butler ofrecen una solución eficiente y flexible para controlar la dirección y forma del haz radiado en arreglos de antenas. Su capacidad para dirigir el haz en una dirección específica y suprimir las interferencias resulta fundamental en aplicaciones que requieren una alta directividad y una comunicación confiable.

3.3 Redes de conformación de haz basada en sub-arreglos

Los sub-arreglos son agrupaciones de elementos de antena más pequeños dentro del arreglo completo, y

se utilizan para lograr una mayor flexibilidad y capacidad de adaptación en la formación del haz.

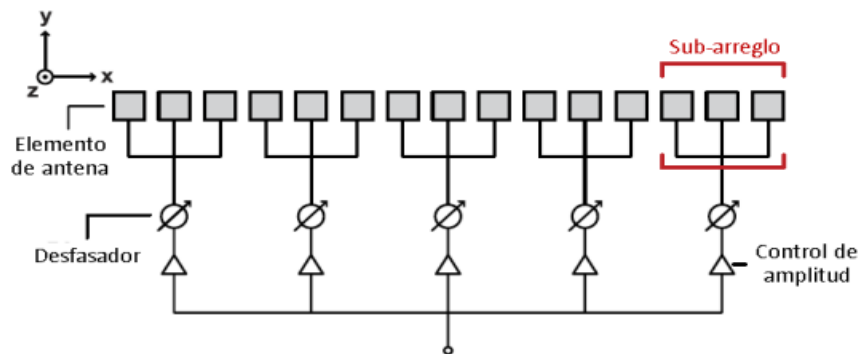


Figura 7 Representación de un esquema de sub-arreglos (Avser et al., 2016).

En esta técnica es necesario usar un dispositivo llamado divisor de potencia, su trabajo es distribuir la energía a cada uno de los elementos de cada sub-arreglo.

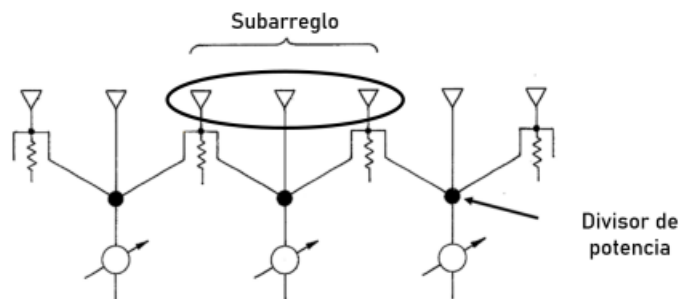


Figura 8 Representación de un esquema de sub-arreglo mostrando el dispositivo divisor de potencia (Nemit & Park, 1972).

En la figura 8 se muestra una red de conformación de haz basada en sub-arreglos. En este caso, se cumple que el número de desfasadores es menor al número de elementos de antena e igual al número de sub-arreglos. Sin embargo, esto implica nuevos retos y desafíos de diseño.

La idea principal detrás de las redes de conformación de haz basadas en sub-arreglos es utilizar sub-arreglos individuales para generar haces direccionales y luego combinar estos haces para formar el haz deseado. Esto permite una mayor capacidad para adaptarse a diferentes direcciones y patrones de radiación, lo que resulta beneficioso en aplicaciones donde se requiere un seguimiento preciso de objetivos en movimiento o donde las condiciones del canal son variables.

En los últimos años, se han realizado avances significativos en el diseño y la implementación de redes de conformación de haz basadas en sub-arreglos. Algunos de los aspectos destacados incluyen:

- ✓ Diseño y optimización de sub-arreglos: se han desarrollado técnicas para diseñar sub-arreglos óptimos en términos de número de elementos, geometría y distribución espacial. Estas técnicas buscan maximizar la ganancia, minimizar el efecto de la interferencia y optimizar la resolución angular del sistema.
- ✓ Estrategias de formación de haz: se han propuesto algoritmos y métodos de formación de haz específicos para redes de conformación de haz basadas en sub-arreglos. Estas estrategias buscan combinar los haces generados por cada sub-arreglo de manera coherente para lograr el haz deseado con la máxima precisión y directividad.
- ✓ Sincronización y coordinación de sub-arreglos: debido a la naturaleza distribuida de los sub-arreglos, es importante establecer una sincronización adecuada y coordinación entre ellos. Esto implica el uso de técnicas de sincronización de tiempo y frecuencia, así como la implementación de algoritmos de coordinación para lograr un rendimiento óptimo en términos de directividad y rechazo de interferencias.

Las redes de conformación de haz basadas en sub-arreglos se han utilizado en una amplia gama de aplicaciones, como sistemas de comunicaciones inalámbricas, radares, sistemas de posicionamiento y seguimiento, y sistemas de detección y reconocimiento de objetivos. Su capacidad para adaptarse a las condiciones del canal y su flexibilidad en la formación del haz las convierten en una opción atractiva para escenarios donde se requiere una alta precisión y eficiencia en la transmisión y recepción de señales.

3.4 Redes de conformación de haz basada en CORPS

Las redes de conformación de haz basadas en CORPS son una estrategia eficaz para mejorar el rendimiento de los arreglos circulares de antenas en términos de conformación de haz y reducción de interferencias. La estrategia CORPS es un enfoque que busca sintetizar patrones de radiación coherentes para optimizar la directividad del haz en una dirección deseada y mitigar la radiación en direcciones no deseadas.

La técnica CORPS se basa en la generación de patrones de referencia coherentes y la adaptación de fase y amplitud de los elementos radiantes del arreglo de antenas.

Una red de conformación de haz basada en CORPS se define por la iteración alternativa de nodos de división (*S*) y nodos de recombinación (*R*), como se muestra en la siguiente figura:

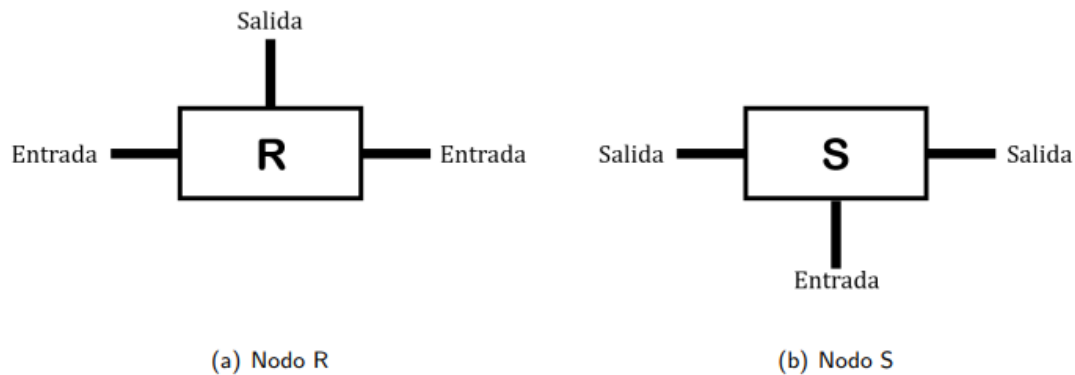


Figura 9 Nodos de división (S) y nodos de recombinación (R).

El nodo *S* está compuesto por un puerto de entrada y dos de salida, y los nodos *R*, compuestos por dos puertos de entrada y uno de salida. El primer nodo recibe energía y la redistribuye equitativamente entre sus salidas. También son responsables de la interconexión entre las diferentes capas de la red. El segundo nodo hace posible recombinar la energía ingresada a través de sus puertos de entrada. El proceso de recombinación es una suma vectorial de señales.

La adaptación de fase y amplitud se logra ajustando los elementos radiantes para seguir los patrones de referencia coherentes generados previamente (Betancourt & Del Río, 2007). El objetivo principal de las redes de conformación de haz basadas en CORPS es lograr una mayor directividad del haz, lo que resulta en una mejor cobertura de la zona objetivo y una reducción significativa de las interferencias en las zonas no deseadas. Al controlar de manera precisa la fase y la amplitud de los elementos radiantes, se puede lograr una conformación de haz más precisa y direccional.

En la figura 10 se muestra una red CORPS de dos entradas, cuatro salidas y dos capas.

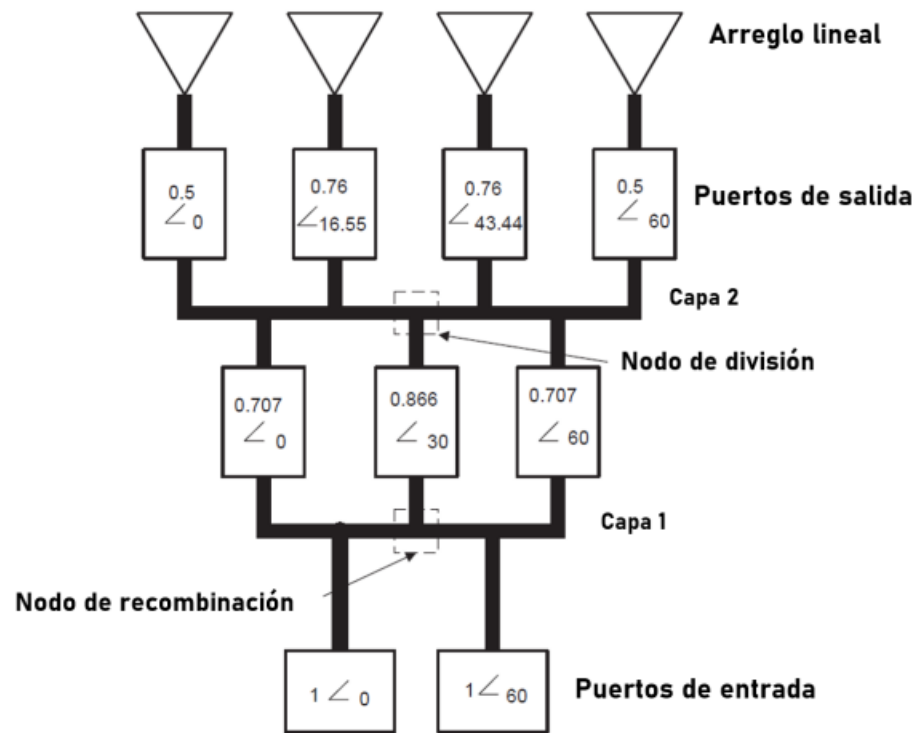


Figura 10 Red CORPS en un arreglo lineal (M. Panduro & Del Río, 2008).

En la primera capa, se identificaron tres salidas o elementos, y se notó que presentan una fase progresiva. Es decir, a medida que se desplaza de un elemento a otro, la fase aumenta linealmente. En concreto, las fases observadas en orden son $[0^\circ, 30^\circ, 60^\circ]$. Por otro lado, en la segunda capa del sistema, se encontraron cuatro salidas o elementos. Sin embargo, a diferencia de la primera capa, estos elementos no presentan una distribución lineal de la fase. Las fases medidas en la segunda capa son $[0^\circ, 16.55^\circ, 43.44^\circ, 60^\circ]$. Al no existir una progresión lineal entre las fases de los elementos, significa que la relación entre la fase y la posición de los elementos en esta capa es más compleja.

En la figura 11 se observa un esquema de CORPS donde (Fonseca, 2012) propone un enfoque diferente a un diagrama convencional de CORPS, en el cual se tiene un puerto de entrada, este lleva a las siguientes 2 capas donde se divide, sin recombinarlas. La recombinación ocurre hasta la tercera capa, en esos puntos azules es donde se produce. Se ha observado que la recombinación de señales es donde se experimentan mayores pérdidas. Por lo tanto, se propone que en las dos primeras capas no se haga esa acción. Además, en cuanto a los valores de amplitud, se establece que en los extremos es de $1/8$, mientras que en los puntos rojos es de $3/8$.

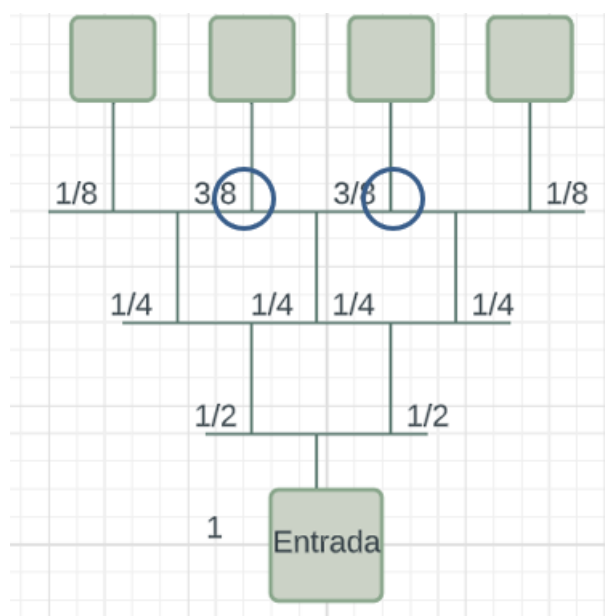


Figura 11 Red CORPS de 1x4 con 3 capas (Fonseca, 2012).

En los últimos años, se han realizado investigaciones y desarrollos significativos en el campo de las redes de conformación de haz basadas en CORPS. Diversos estudios han demostrado su eficacia en la mejora de la directividad del haz, la reducción de interferencias y el aumento del rendimiento de los arreglos circulares de antenas en aplicaciones como comunicaciones inalámbricas, radares y sistemas de satélite.

3.5 Conclusiones

Estas conclusiones se basan en el análisis realizado del estado del arte y en los estudios realizados sobre dichas técnicas. En primer lugar, se puede concluir que las redes de conformación de haz basadas en Butler son una opción eficaz para lograr una dirección de radiación precisa y un control de haz adaptable en arreglos de antenas. Esta técnica utiliza un conjunto de componentes de fase variable para controlar la dirección y la forma del haz radiado, lo que permite una mayor flexibilidad en la comunicación y la detección de señales.

Por otro lado, las redes de conformación de haz basadas en sub-arreglos también ofrecen ventajas significativas en términos de flexibilidad y capacidad de conformación de haz. Al dividir el arreglo en sub-arreglos más pequeños, se puede lograr una mayor resolución espacial y una mayor capacidad de adaptación a diferentes condiciones de propagación.

Además, las redes de conformación de haz basadas en CORPS han demostrado ser una técnica prometedora para el diseño de arreglos de antenas con capacidades avanzadas de conformación de haz. Esta técnica se basa en la síntesis de patrones de radiación coherente y permite un control preciso y eficiente del haz radiado, lo que resulta en un mejor rendimiento en términos de directividad, relación señal-ruido y robustez.

En resumen, las redes de conformación de haz basadas en Butler, en sub-arreglos y en CORPS representan enfoques innovadores y eficaces para mejorar las capacidades de los arreglos de antenas en términos de conformación de haz. Cada técnica tiene sus propias ventajas y características distintivas, y la elección de la técnica más adecuada dependerá de los requisitos específicos de la aplicación y las limitaciones del sistema.

Capítulo 4. Metodología

4.1 Introducción

En el presente capítulo, nos adentraremos en el diseño y la configuración de redes de conformación de haz basadas en diferentes técnicas para arreglos circulares de antena. En este capítulo presentaremos dos casos de diseño específicos: 1) caso de diseño de arreglo circular utilizando una red de excitación cofasal, y 2) caso de diseño de arreglo circular usando una red CORPS cilíndrica.

En la sección 4.2 se ilustra el caso de diseño de arreglos circulares tomando en cuenta la excitación cofasal. Tomando en cuenta esta propiedad podemos establecer algún criterio de diseño que permita tomar ventaja para dirigir el haz en todo el plano de azimut. Además, en la sección 4.3 se presenta el caso de diseño usando una red CORPS cilíndrica para tratar de generar un diagrama de radiación en todo el plano azimutal.

En resumen, en este capítulo se explorarán los casos de diseño que representan dos configuraciones específicas en arreglos circulares de antena. Estos casos de diseño permitirán analizar el rendimiento, la eficiencia y las capacidades de las redes de alimentación en diferentes escalas de arreglos circulares. A través de un análisis detallado de estos casos, se obtendrá una comprensión más profunda de la utilidad y el potencial de las redes de conformación de haz basadas en excitación cofasal y en CORPS para aplicaciones de arreglos circulares de antena.

4.2 Diseño de arreglo circular utilizando una red de excitación cofasal

Este caso toma en consideración la excitación de fase necesaria en el arreglo para establecer la red o el diseño del arreglo circular. El objetivo principal de este caso es tratar de aprovechar las capacidades del sistema evaluando el comportamiento de la fase (excitación cofasal) en los elementos de antena. Por ejemplo, se consideró la excitación cofasal de un arreglo circular de antenas de 12 elementos, se utilizó la ecuación 3 ilustrada en el capítulo 2, para obtener la excitación cofasal; y esto se implementó en Matlab.

La figura 12 muestra un ejemplo de arreglo circular con 12 elementos, en el cual se aplicó lo descrito. Además, el comportamiento de la excitación cofasal se presenta en la figura 13 para el corte de $\theta=90^\circ$.

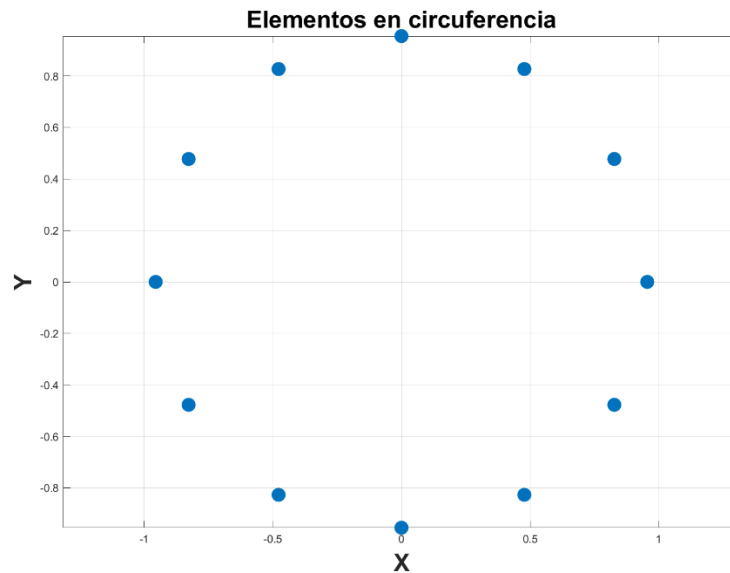


Figura 12. Esquema de un arreglo circular con 12 elementos.

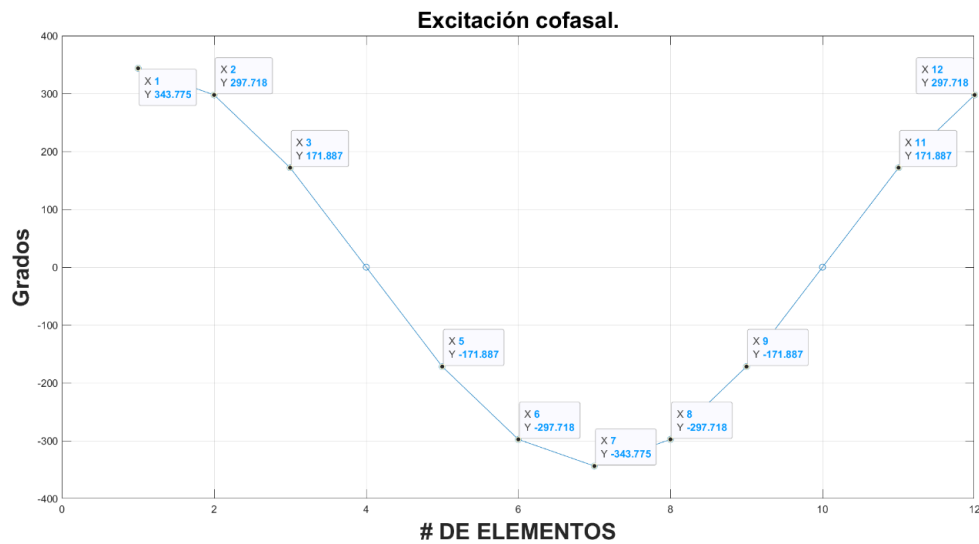


Figura 13. Comportamiento de la excitación cofasal de un arreglo circular de 12 elementos.

La separación angular para el escaneo del haz principal se puede determinar teniendo en cuenta el número de elementos de antena. Es decir, se puede realizar una división del plano o 360 grados entre el número de elementos (N). Por ejemplo:

$$= \frac{360^\circ}{12} \quad (4)$$

Esta división proporciona la separación angular necesaria para el escaneo del haz principal sobre el plano azimutal. Además, se ha observado que a medida que aumenta el número de elementos en el arreglo circular, la excitación cofasal presenta un comportamiento más senoidal, así como una rotación en la fase. Las fases se mantienen en valor, pero van cambiando de antena de manera simétrica. En la tabla 1 se muestran las fases necesarias en los puertos de salida para dirigir el haz en las direcciones de escaneo establecidas.

Tabla 1 Valores de fase para direcciones de escaneo del haz principal (en grados).

ϕ_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}	α_{11}	α_{12}
0°	343.7	297.7	171.8	0	-171.8	-297.7	-343.7	-297.7	-171.8	0	171.8	297.7
30°	297.7	343.7	297.7	171.8	0	-171.8	-297.7	-343.7	-297.7	-171.8	0	171.8
60°	171.8	297.7	343.7	297.7	171.8	0	-171.8	-297.7	-343.7	-297.7	-171.8	0
90°	0	171.8	297.7	343.7	297.7	171.8	0	-171.8	-297.7	-343.7	-297.7	-171.8
120°	-171.8	0	171.8	297.7	343.7	297.7	171.8	0	-171.8	-297.7	-343.7	-297.7
150°	-297.7	-171.8	0	171.8	297.7	343.7	297.7	171.8	0	-171.8	-297.7	-343.7
180°	-343.7	-297.7	-171.8	0	171.8	297.7	343.7	297.7	171.8	0	-171.8	-297.7
210°	-297.7	-343.7	-297.7	-171.8	0	171.8	297.7	343.7	297.7	171.8	0	-171.8
240°	-171.8	-297.7	-343.7	-297.7	-171.8	0	171.8	297.7	343.7	297.7	171.8	0
270°	0	-171.8	-297.7	-343.7	-297.7	-171.8	0	171.8	297.7	343.7	297.7	171.8
300°	171.8	0	-171.8	-297.7	-343.7	-297.7	-171.8	0	171.8	297.7	343.7	297.7
330°	297.7	171.8	0	-171.8	-297.7	-343.7	-297.7	-171.8	0	171.8	297.7	343.7
360°	343.7	297.7	171.8	0	-171.8	-297.7	-343.7	-297.7	-171.8	0	171.8	297.7

Como se observa en la tabla 1, los valores de fase se mantienen para cada dirección de escaneo en el plano azimutal. Es decir, si se considera o se incorpora un mecanismo de rotación en las fases se podría realizar el escaneo del haz principal manteniendo los mismos valores de fase. Además, la configuración geométrica establece una excitación simétrica como se puede observar en la tabla 1. Los valores de excitación de fase de los elementos 7 al 12 serán el conjugado de los valores de excitación de los elementos del 1 al 6. Es importante mencionar, que estrictamente solamente se podrían tener 4 valores de excitación (0, 171.8,

297.7, 343.7) de fase diferentes a través del todo el arreglo de 12 elementos. Todos los valores de fase se pueden generar con el conjugado de la fase y algunos elementos mantienen el mismo valor de fase.

4.2.1 Planteamiento del problema de diseño

En esta sección vamos a plantear el caso de diseño para un arreglo circular de 18 elementos de antena. En este caso vamos a considerar las propiedades de simetría y rotación explicadas en la sección anterior. Si consideramos el diagrama de la Figura 14 tendríamos una excitación de fase simétrica y se tendría la dirección de escaneo en pasos de $360^\circ/18=20^\circ$.

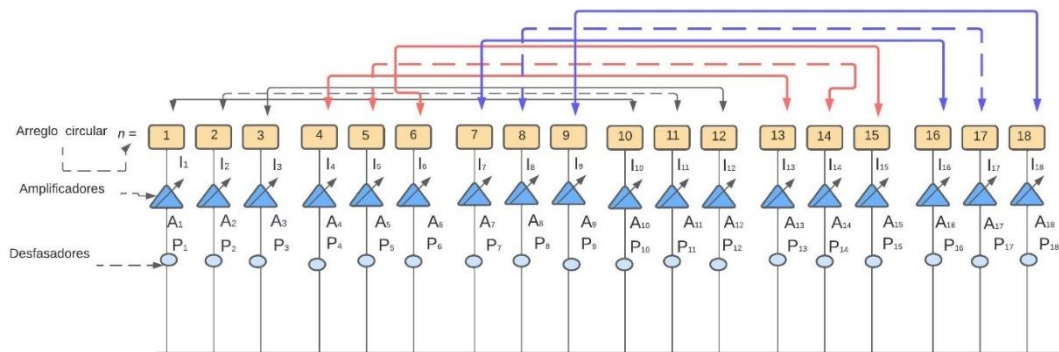


Figura 14. Diseño de un arreglo circular utilizando excitación cofasal.

Se puede definir el valor de excitación de fase a un ajuste específico que se realiza en la antena para controlar la dirección en la que enviará o recibirá señales. Ahora bien, todo este conocimiento de las propiedades de simetría y rotación de las fases de la estructura de arreglo circular, que permite plantear la optimización de los valores de excitación fase que lleven a maximizar la respuesta del diagrama de radiación. En este caso de diseño se plantea minimizar el nivel de lóbulos laterales.

Por lo tanto, para plantear este problema de diseño se puede asumir una dirección de escaneo en $\phi=0^\circ$ y luego identificar el número de valores de excitación de fase diferentes que se tienen para esta dirección. Note que las otras direcciones de escaneo se pueden generar con las propiedades de rotación mencionadas anteriormente. Para este caso de arreglo circular se asumen 5 valores diferentes en la excitación cofasal, que permiten generar los 18 valores necesarios para alimentar el arreglo y realizar escaneo del haz principal.

Entonces, se definen como las variables a optimizar, a los valores de perturbación o modificación que podría tener la excitación cofasal de manera que, permita minimizar el SLL en la siguiente función objetivo:

$$SLL + \text{abs}(\phi_0 - \phi_{\text{gen}}) \quad (5)$$

Este término indica que se busca mejorar la respuesta en el *SLL* manteniendo la dirección de escaneo, es decir un error mínimo entre la dirección de escaneo deseada (ϕ_0) y la dirección de escaneo generada (ϕ_{gen}) con los valores de fase generados u optimizados.

El factor de arreglo con la excitación de fase se crea agregando las perturbaciones o modificaciones de fase, $\mathbf{P} = [\delta\beta_1, \delta\beta_2, \dots, \delta\beta_N]$, $\delta\beta_i$ representa la perturbación del *i*-ésimo elemento del arreglo, de tal manera que:

$$AF(\phi, \mathbf{I}, \mathbf{P}) = \sum_{n=1}^N I_n \exp\{j[\varphi_n + \delta\beta_n]\} \quad (6)$$

donde $\varphi_n = ka[\cos(\phi - \phi_n) - \cos(\phi_0 - \phi_n)]$.

La ecuación 6 indica que el comportamiento del factor de arreglo depende de los vectores de excitación de amplitud (\mathbf{I}), del vector de excitación de fases (\mathbf{P}) y la dirección de llegada de las señales contenidas en ϕ .

La idea de agregar perturbaciones o modificaciones de fase en el factor de arreglo convencional es que es posible utilizar una herramienta o algoritmo de optimización que busque posibles excitaciones de fase en el arreglo. Estas perturbaciones o modificaciones a los valores de la excitación cofasal podrían generar una población inicial adecuada para llevar a cabo un proceso de optimización evolutivo. En este caso de diseño se utilizó como herramienta de optimización a los Algoritmos Genéticos (M. A. Panduro et al., 2009). La razón de valerse de esta técnica metaheurística es resolver un problema de optimización que presenta muchos máximos locales y no linealidad en la función objetivo planteada en la ecuación 5. Además, la efectividad de la técnica de algoritmos genéticos ha sido demostrada en muchos casos de diseño de arreglos de antenas (Haupt, 1996; Khodier & Al-Aqeel, 2009). La siguiente sección presenta detalles del algoritmo de optimización cuando se aplica a este problema de diseño.

4.2.2 Algoritmo de optimización

El método de algoritmos genéticos se utiliza como herramienta de optimización para el arreglo circular de antenas utilizando excitación cofasal. Este método es bien conocido por lo que solo se tratarán de dar detalles de este algoritmo para ser aplicado en este problema de diseño. Un conocimiento más profundo y más información se puede encontrar en las siguientes referencias (Enache et al., 2017; M. A. Panduro et al., 2006; Yaman & Yilmaz, 2010).

En este método se definen las variables o conjunto de parámetros a ser optimizadas. Estas variables de decisión definen a un individuo o solución potencial (que se conoce como cromosoma) y un conjunto de individuos constituyen una población. Esta población se evoluciona por medio de selección, cruzamiento, y operadores genéticos de mutación. El proceso de optimización sigue los siguientes pasos (Man et al., 1996).

El algoritmo genético genera individuos (excitaciones de amplitud y perturbaciones del valor de la excitación cofasal). Los individuos se codifican en un vector de números reales, que representan las amplitudes, y un vector de números reales restringidos en el rango de $(0, 2\pi)$, que representa las perturbaciones en el valor de la excitación cofasal de los elementos de antena.

Cada individuo genera un factor de arreglo de ciertas características de nivel de lóbulos laterales (*SLL*). Entonces, los mecanismos genéticos de cruzamiento y mutación se emplean para generar mejores soluciones. El algoritmo genético evoluciona a los individuos hacia una solución global que genera un factor de arreglo con un *SLL* mínimo y un error mínimo en la dirección de escaneo deseada. Esto se lleva a cabo utilizando la función objetivo basada en la ecuación 5.

Este método se implementó en Matlab para la optimización de un arreglo circular, los resultados arrojados por este algoritmo y más detalles de su implementación se presentan en el siguiente capítulo.

4.3 Diseño de arreglo circular utilizando una red CORPS cilíndrica

El segundo modelo o caso de diseño se basa en una red con estructura cilíndrica. Esta estructura se caracteriza por su forma curva, que se asemeja a un cilindro (como se muestra en la Figura 15), y puede desempeñar un papel fundamental para generar haces de radiación en todo el plano. La estructura

cilíndrica se construye doblando y colocando cuidadosamente los elementos de antena y los componentes de la red CORPS para alimentar a un arreglo circular. Al disponer los elementos en esta configuración cilíndrica, se logra una distribución espacial que permite controlar la dirección y la forma de los haces de radiación resultantes.

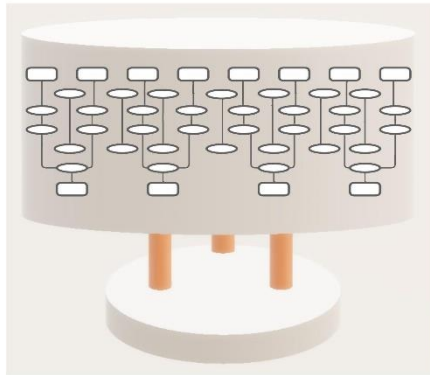


Figura 15 Estructura cilíndrica donde se establece una red CORPS.

La disposición de los elementos de antena en la estructura cilíndrica sigue un patrón coherente y periódico. Cada elemento de antena se encuentra estratégicamente ubicado en el cilindro para maximizar la eficiencia y el rendimiento de la red de alimentación.

En este caso, se utiliza un enfoque específico para dividir las amplitudes en las dos primeras capas, como se muestra en la Figura 16, y luego recombinarlas en la tercera capa. A continuación, se explica el proceso paso a paso (Fonseca, 2012):

División de las amplitudes en las dos primeras capas: En la primera etapa de la red CORPS, se toma la amplitud de entrada y se divide en las dos capas iniciales. Este proceso implica asignar una porción de la amplitud a cada elemento de antena en las capas respectivas. En el caso de una estructura cilíndrica, los elementos de antena se distribuyen a lo largo del cilindro de manera equidistante.

No recombinación en las dos primeras capas: A diferencia de la tercera capa, donde se lleva a cabo la recombinación de las amplitudes, en las dos primeras capas no se realiza ningún proceso de recombinación. Cada elemento de antena en estas capas mantiene su amplitud asignada sin combinarse con otras amplitudes.

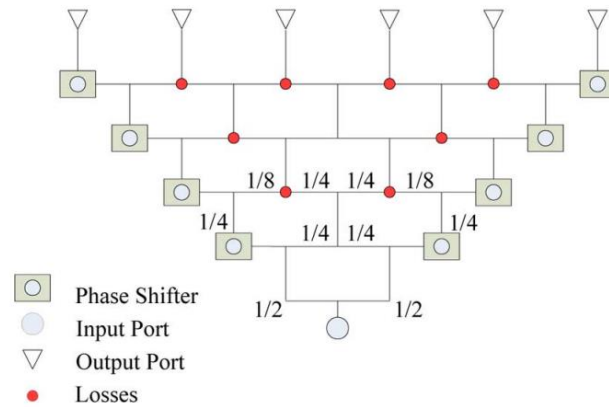


Figura 16 Distribución de amplitud generada por la red CORPS cilíndrica (Fonseca, 2012).

Recombinación en la tercera capa: En la tercera capa, se produce la recombinación de las amplitudes de los elementos de antena. Esto implica la suma o combinación de las amplitudes individuales para formar un haz de radiación coherente. En este punto, las amplitudes se recombinan en una sumatoria vectorial (o combinación de señales) y se genera la distribución de amplitud que se muestra en la Figura 17.

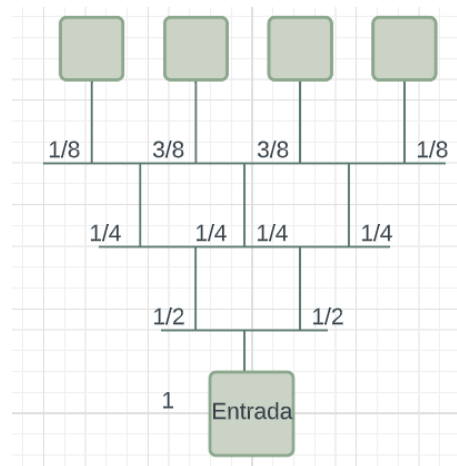


Figura 17 Valores de amplitud generadas por la red CORPS cilíndrica (Fonseca, 2012).

La recombinación en la tercera capa es un paso crítico que permite generar haces de radiación coherentes. Esta reconfiguración de las amplitudes contribuye a la formación de haces independientes en direcciones distintas, lo que permite cubrir todo el plano azimutal con haces separados y controlados.

Es importante tener en cuenta que la forma exacta en que se realiza la recombinación puede variar

dependiendo de la configuración y diseño específico de la red CORPS con estructura cilíndrica. Los detalles adicionales sobre la implementación y técnicas utilizadas para la recombinación de amplitudes pueden ser específicos del sistema y requerir un análisis más detallado y estudio en el contexto de la aplicación particular.

La ventaja principal de la red CORPS cilíndrica es su capacidad para generar haces independientes en direcciones diferentes, abarcando todo el plano azimutal. Esto significa que cada haz puede ser dirigido hacia un objetivo específico sin la necesidad de utilizar desfasadores adicionales. Esta característica simplifica significativamente el diseño y la implementación del sistema, al tiempo que proporciona una cobertura completa en el plano azimutal.

Por ejemplo, si se establece una red CORPS cilíndrica 7x14 se tendría una estructura como la de la Figura 18, considerando 7 puertos de entrada y 14 elementos de antena dispuestos en forma cilíndrica. Para lograr una cobertura completa del plano azimutal, se emplea una configuración de 1x4 con 3 capas, como se mencionó previamente en la Figura 17. En las dos primeras capas, la amplitud de la señal de entrada se divide, mientras que en la tercera capa se realiza la recombinación de las amplitudes para generar los haces dirigidos a diferentes direcciones.

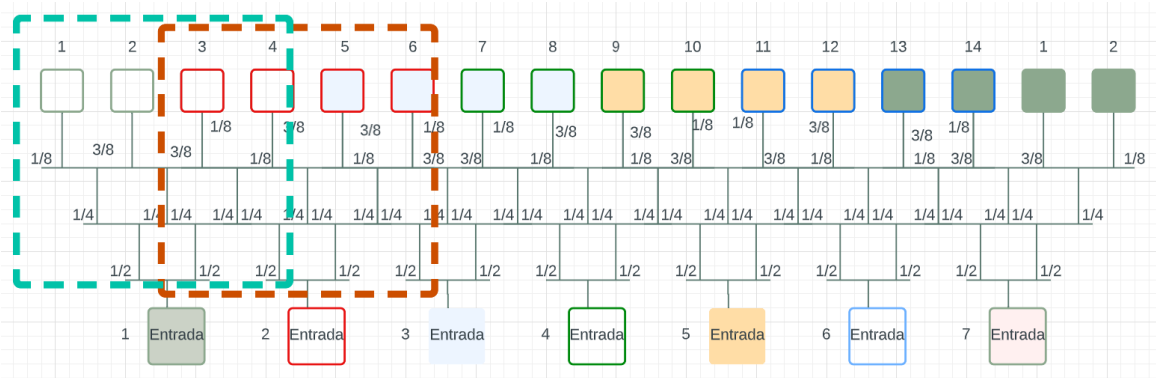


Figura 18 Diseño de arreglo circular usando una red CORPS cilíndrica 7x14.

En la figura 18 se observa que se sigue la idea citada en (Fonseca, 2012), de dividir las primeras dos capas sin recombinar las señales, recombinándolas únicamente a partir de la tercera capa en los puntos marcados. Se ha observado que las pérdidas son mayores en las etapas de recombinación de las señales.

Cada haz generado en la Red CORPS 7x14 es independiente de los demás, lo que significa que se puede direccionar de forma individual y ajustar su amplitud. Esto resulta en una mayor flexibilidad y capacidad de adaptación a diferentes escenarios de comunicación. Además, al utilizar una estructura cilíndrica, se logra un enfoque más eficiente y menos complejo en comparación con los arreglos tradicionales.

Por lo tanto, la red CORPS 7x14 permite lograr una cobertura completa del plano azimutal sin la necesidad de utilizar desfasadores ajustables. Esta configuración representa una solución prometedora, ya que, mediante la división y recombinación de las amplitudes en las capas correspondientes, se generan haces dirigidos a diferentes direcciones, lo que permite cubrir todo el plano azimutal de manera eficiente.

El diagrama completo de la red CORPS 7x14 muestra los 7 puertos de entrada, cada uno alimentando 4 elementos de antena, para un total de 14 elementos. Cada uno de estos puertos de entrada genera un haz independiente, lo que significa que se puede direccionar de manera individual y ajustar su amplitud según las necesidades de comunicación.

Un aspecto importante para destacar es que la red CORPS se coloca en un arreglo cilíndrico, lo que facilita el control de los 7 haces generados por cada puerto de entrada. Cada haz se dirige en una dirección diferente, lo que garantiza una cobertura completa del plano azimutal y permite alcanzar los objetivos establecidos en esta tesis.

En resumen, la red CORPS 7x14 puede representar una propuesta innovadora y eficiente para la conformación de haces en arreglos de antenas. Mediante la combinación de una configuración cilíndrica, divisiones y recombinaciones de amplitudes, se logra una cobertura completa del plano azimutal sin la necesidad de emplear desfasadores ajustables. Esto abre nuevas posibilidades en el campo de las comunicaciones inalámbricas y ofrece una solución más simple y efectiva para la transmisión de señales en diferentes direcciones.

4.4 Conclusiones

En este capítulo se han examinado dos casos de diseño para arreglos circulares de antena utilizando: 1) una red de excitación cofasal, y 2) una red CORPS cilíndrica. En cada una de estas configuraciones se ha demostrado que podrían ser altamente eficientes, a expensas de analizar los resultados de cada uno de ellos.

En el caso de diseño con red de excitación cofasal se plantea utilizar una herramienta de optimización basada en algoritmos genéticos. Este caso, podría escanear el haz de radiación en el plano azimutal ya sea mediante las propiedades de simetría y rotación de la estructura circular. El uso de algoritmos genéticos podría mejorar las prestaciones de radiación en términos de *SLL* y la dirección de escaneo angular.

Por otro lado, la red CORPS 7x14 puede representar una buena opción en términos de tamaño y capacidad de conformación de haces. Con siete entradas y catorce salidas en un arreglo circular, se ha buscado lograr una cobertura más amplia y una mayor capacidad de adaptación en múltiples direcciones. Mediante la división y recombinación de las amplitudes en capas específicas, se han generado haces dirigidos a diferentes direcciones, cubriendo de manera eficiente el plano azimutal. Esta configuración ofrece un mayor grado de libertad y adaptabilidad en entornos de comunicación complejos.

En general, estos casos de diseño han demostrado el valor y el potencial de las redes de conformación de haz basadas en CORPS en aplicaciones de arreglos circulares de antena. Estas configuraciones han ofrecido soluciones innovadoras y eficientes para la formación de haces, mejorando la precisión y la cobertura del plano azimutal. Además, al aprovechar las características cilíndricas de los arreglos circulares, se puede lograr una configuración más eficiente y menos compleja en comparación con los arreglos tradicionales.

Estas áreas de investigación adicional ayudarán a mejorar aún más el rendimiento y la eficiencia de las redes CORPS en arreglos circulares de antena.

El siguiente capítulo ilustrará resultados de simulación para los casos planteados anteriormente.

Capítulo 5. Resultados de simulación

5.1 Introducción

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para los casos de diseño planteados para arreglos circulares de antena. Como se indicó en el capítulo anterior, se han establecido dos casos de diseño: 1) utilizando una red de excitación cofasal, y 2) usando una red CORPS cilíndrica. En estos casos, se destacan los aspectos clave proporcionando una visión general de los hallazgos y su relevancia en relación con los objetivos de la investigación.

Por lo tanto, el objetivo principal de este capítulo es presentar y discutir los resultados obtenidos en relación con el factor de arreglo (AF) en los arreglos de antenas circulares propuestos. Además, se examina el impacto de alimentar un arreglo circular utilizando las metodologías de diseño propuesta. Es decir, se realiza un análisis detallado de los resultados proporcionando gráficos y tablas para respaldar las conclusiones.

5.2 Resultados del caso de la red de excitación cofasal

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en el diseño de arreglo de antenas considerando una red de excitación cofasal, como se planteó en el capítulo anterior. En este caso, se implementó el método de algoritmos genéticos en una plataforma de programación en Matlab. Esto para evaluar y estudiar el comportamiento del factor de arreglo utilizando una red de excitación cofasal, como se describió en la sección 4.2.1. El número de elementos de antena se estableció en $N=18$ para una separación uniforme entre elementos de 0.5λ . En este caso, se consideró la literatura para establecer los valores de los parámetros del algoritmo (Haupt, 1996; Khodier & Al-Aqeel, 2009). El tamaño de la población se estableció en 100 individuos. El algoritmo se detiene hasta alcanzar las 1000 iteraciones. La probabilidad de cruzamiento se establece en un valor igual a $p_c=1.0$ y la probabilidad de mutación $p_m=0.1$. Para la optimización del arreglo se considera que el haz es dirigido en $\phi=0^\circ$. Una vez optimizado se pueden utilizar las propiedades de rotación y simetría del arreglo para establecer otras direcciones de escaneo y dirigir el haz en todo el plano de azimut.

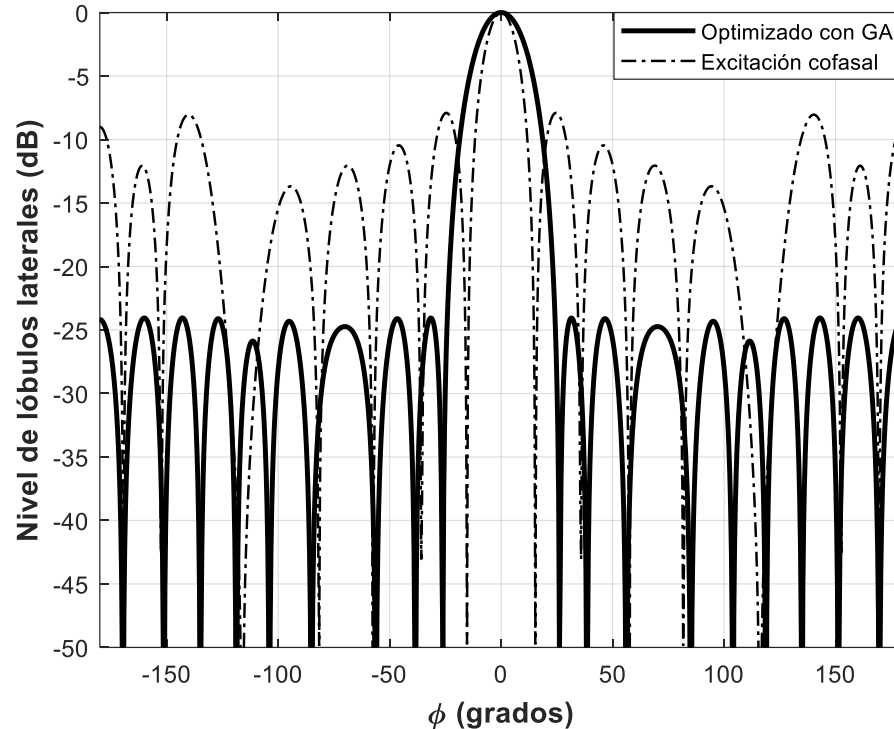


Figura 19 Comportamiento del factor de arreglo obtenido usando la red de excitación cofasal optimizada con algoritmos genéticos y su comparación con el caso sin optimizar.

La Figura 19 ilustra el comportamiento del factor de arreglo obtenido para la red de excitación cofasal utilizando optimización con algoritmos genéticos. Como se puede apreciar en la figura 19, a través de la optimización de las amplitudes y valores de perturbación en la excitación cofasal se puede generar un diagrama de radiación con un nivel de lóbulos laterales muy bajo. En este caso, se llega a obtener un nivel de lóbulos laterales de -24 dB. En aplicaciones inalámbricas se puede considerar un valor bajo alrededor de -15 dB para el nivel de lóbulos laterales. Por lo que, el valor de nivel de lóbulos laterales obtenido representa una mejora en el desempeño de las prestaciones de radiación del arreglo. Si este valor de nivel de lóbulos laterales se compara con el caso de red de excitación cofasal sin optimizar, se tiene una mejora substancial al aplicar la optimización basada en algoritmos genéticos. El caso de excitación cofasal sin optimizar proporciona un nivel de lóbulos laterales de aproximadamente -8 dB, por lo que, se tiene una diferencia de aproximadamente -16 dB en el nivel de lóbulos laterales generado por medio de la optimización. Los valores de excitación de amplitud y perturbaciones de fase encontrados por el algoritmo genético para el arreglo circular de antenas son: amplitudes=[19.8176, 17.0050, 13.5583, 12.8076, 9.7169, 9.7169, 12.8076, 13.5583, 17.0050, 19.8176, 17.0050, 13.5583, 12.8076, 9.7169, 9.7169, 12.8076, 13.5583, 17.0050], valores de perturbación en la excitación cofasal=[-34.0037°, -16.9124°, -64.2652°,

8.8612°, 179.8320°, -179.8320°, -8.8612°, 64.2652°, 16.9124°, 34.0037°, 16.9124°, 64.2652°, -8.8612°, -179.8320°, 179.8320°, 8.8612°, -64.2652°, -16.9124°].

Como se puede apreciar en los valores de excitación amplitud y de perturbación en la excitación cofasal, la geometría circular permite utilizar una excitación de amplitud simétrica, es decir, los valores de amplitud de los elementos del 1 al 9 son iguales a los de los elementos 10 al 18. Además, los valores de fase utilizados para los elementos del 1 al 9 son el conjugado (o simétricos) de los elementos del 10 al 18.

Ahora bien, las propiedades de rotación y simetría del arreglo circular permiten generar las direcciones de escaneo en todo el plano azimutal. Primero, se establece el valor de los pasos de escaneo. Esto se establece dividiendo el plano, 360° entre el número de elementos usado. En este caso, el paso sería de 20° al utilizar un arreglo de 18 elementos. Es decir se tendrá una separación angular de 20° entre cada haz dirigido. En este caso, los valores de excitación de amplitud y fase generados para el arreglo mediante la optimización se pueden rotar, es decir se utilizan los mismos valores de excitación de amplitud y fase, y al decir rotar significa que el valor de $(I_n \text{ y } \delta\beta_n)$ se sustituye en $(I_{n+1} \text{ y } \delta\beta_{n+1})$ cuando la dirección de escaneo del haz principal se incrementa en un valor de 20° (paso angular).

La Figura 20 muestra el factor de arreglo dirigido en todo el plano azimutal usando las propiedades de rotación y simetría del arreglo circular. Note que cada haz está dirigido en pasos de 20° y se cubre todo el rango de -180° a 180°. Es interesante observar que las prestaciones de radiación se mantienen al dirigir el haz en diferentes direcciones considerando esta regla de diseño. Es decir, el mismo diagrama de radiación obtenido en $\phi=0^\circ$ se mantiene en las otras direcciones con el mismo valor de nivel de lóbulos laterales de -24 dB. También hay que tomar en cuenta, que solo un haz de radiación fue necesario optimizar ($\phi=0^\circ$) o aplicarle el método de algoritmos genéticos, y los otros haces se generan utilizando las propiedades de rotación y simetría anteriormente mencionadas.

En la Figura 21 se ilustra un diagrama a bloques del resultado que proporciona el algoritmo genético. En este diagrama se ilustran los valores de diseño que involucran la red de alimentación cofasal. En este caso, también se observa la simetría para los valores de alimentación en amplitud y fase, como se explicó anteriormente. También es importante visualizar que este diseño permite una simplificación de la red dada la simetría que presenta. Es decir un mismo valor de amplitud puede utilizarse para varios elementos de antena. Además, el valor de la fase para la mitad de los elementos de antena es el valor inverso para la otra mitad de los elementos. Esto podría analizarse en un estudio más profundo para establecer más simplificación en la red de alimentación.

Es importante mencionar que los resultados obtenidos para este caso de diseño en este trabajo son a nivel de simulación y evaluación del factor de arreglo para la estructura circular. Los aspectos de implementación de una red de excitación cofasal de este tipo tendrían que analizarse por separado para estudiar y analizar los efectos. Es decir, ya sea en la manufactura de los componentes de diseño, el mecanismo del escaneo del haz principal al utilizar las propiedades de rotación y simetría del arreglo circular; se tendrían aspectos de implementación física a considerar en un trabajo más amplio. Esto puede realizarse como continuación o extensión de este trabajo de investigación.

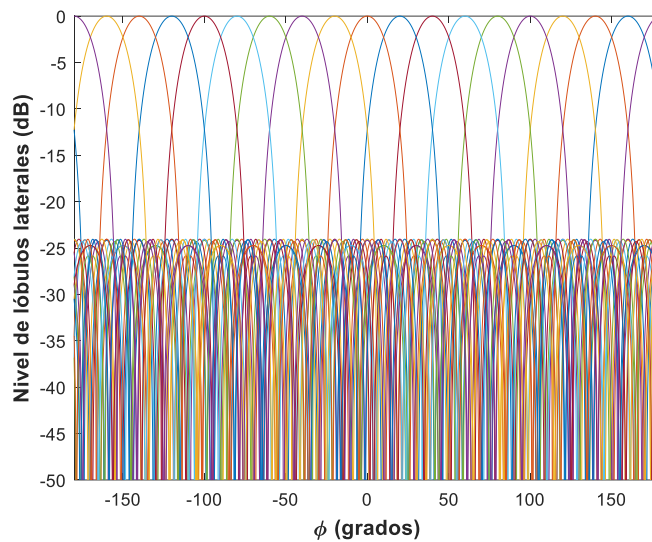


Figura 20 Comportamiento del factor de arreglo utilizando propiedades de rotación de la excitación cofasal de la estructura de arreglo circular.

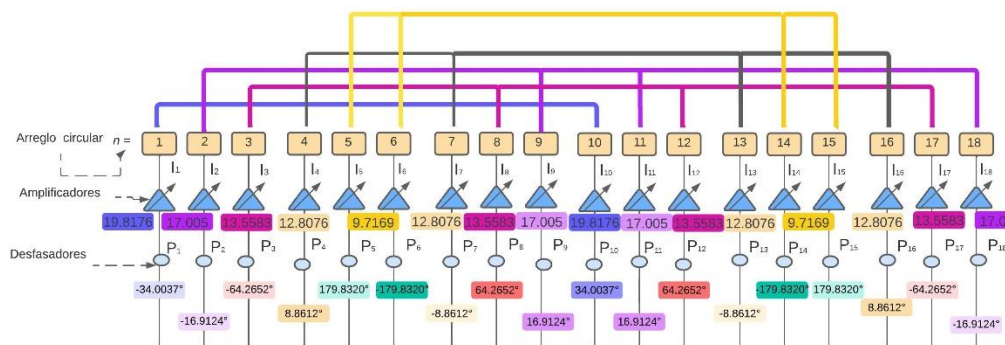


Figura 21 Diagrama a bloques o esquemático del resultado arrojado por el algoritmo genético.

5.3 Resultados del caso de utilizar una red CORPS cilíndrica

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en el diseño del arreglo circular de antenas considerando una red CORPS cilíndrica. Para este caso en particular se utilizó un elemento de antena para el arreglo circular que consiste en una antena de parche cuadrado, y se realizaron los cálculos considerando una frecuencia de resonancia objetivo de 6 GHz, teniendo en cuenta el posible efecto de la curvatura.

Una vez obtenido el diseño del elemento de antena para el arreglo circular, se procedió a evaluar el patrón de radiación del arreglo de antenas en su conjunto. Para simplificar el análisis, se utilizó un modelo simplificado basado en un patrón de radiación similar a una distribución gaussiana para el elemento del arreglo. Además, se consideró el factor de arreglo de un arreglo circular de elementos de antena.

Estos resultados nos proporcionarán una comprensión clara de los patrones de radiación esperados para el arreglo circular de antenas diseñado. Teniendo en cuenta tanto la curvatura en el diseño completo como la disposición circular de los elementos equidistantes.

En el desarrollo de este caso de diseño se procedió al estudio de dos escenarios. Esto con el objetivo de evaluar su desempeño en diferentes configuraciones. El primer diseño consistió en un arreglo circular de 14 elementos de antena, mientras que el segundo diseño presenta una cantidad de 20 elementos para el sistema.

La configuración de red propuesta se puede diseñar y simular en el software Matlab para analizar en detalle su comportamiento al alimentar arreglos circulares. Para el arreglo circular se propusieron dos estructuras: 1) catorce elementos de antena que se podría controlar con siete puertos de entrada, y 2) veinte elementos de antena que se controlan con diez puertos de entrada.

El primer diseño se basa en la utilización de la técnica de alimentación descrita en el capítulo anterior, ilustrada en la Figura 18. Dadas las condiciones establecidas de diseño, esta red mantiene un diámetro de 175 mm. Por otro lado, el segundo diseño emplea una red de alimentación CORPS cilíndrica con la misma topología, pero con un mayor número de puertos, específicamente 10 puertos de entrada y 20 puertos de salida.

La Figura 22 muestra el patrón de radiación para el sistema basado en la Figura 18 utilizando 14 elementos de antena y 7 puertos de entrada. Como se puede apreciar en la Figura 22, es factible generar varios haces de manera simultánea, siendo un total de 7 haces, cada uno dirigido en una dirección diferente. En este caso de diseño de arreglo circular se busca generar haces en todo el plano azimutal sin necesidad de utilizar desfases, lo cual simplifica el proceso y se considera una solución efectiva. Para este caso en particular, se tiene un valor de -11 dB de desempeño en el nivel de lóbulos laterales.

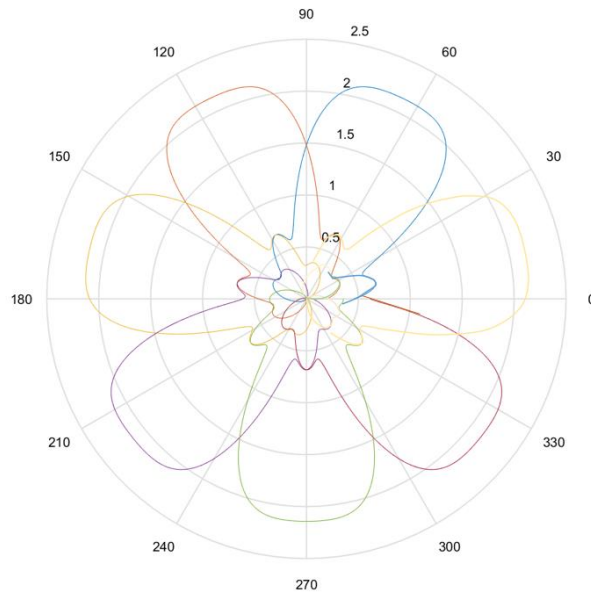


Figura 22 Patrón de radiación generado por el sistema de red CORPS cilíndrica (Fig. 18) utilizando 14 elementos de antena y 7 puertos de entrada.

Este valor de nivel de lóbulos laterales pudiera ser alto para algunas aplicaciones, por lo que si fuese recomendable incorporar alguna técnica de reducción del nivel de lóbulos laterales. Aunque el desempeño del arreglo de antenas circular se enfoca primordialmente en generar estos 7 haces de radiación utilizando un sistema de 14 elementos de antena. Es decir, es posible cubrir todo el plano azimutal con tan solo 7 puertos de entrada para 14 elementos de antena. Esto podría traducirse en una simplificación de la red de alimentación de un 50%.

La Figura 23 muestra el patrón de radiación para el sistema basado en la red CORPS cilíndrica utilizando 20 elementos de antena. Como se puede apreciar en la Figura 23, al incrementar el número de elementos de antena y el número de puertos de entrada, es factible generar más haces de manera simultánea. Para

este caso, dado que se tienen 10 puertos de entrada, es posible controlar un total de 10 haces, uno por cada puerto de entrada cada uno dirigido en una dirección diferente.

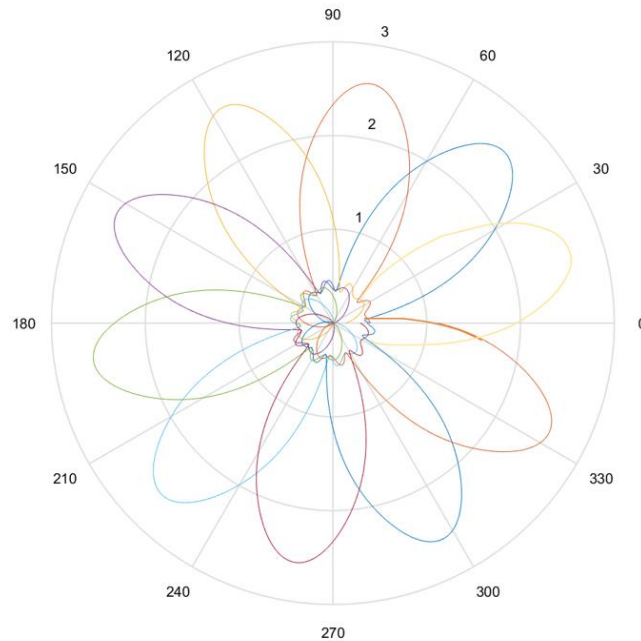


Figura 23 Patrón de radiación generado por el sistema de red CORPS cilíndrica utilizando 20 elementos de antena y 10 puertos de entrada.

Como se mostró en el escenario anterior, este caso de diseño de arreglo circular busca generar haces en todo el plano azimutal sin necesidad de utilizar desfasadores, lo cual ayuda a simplificar el proceso y puede considerarse como una solución efectiva. Para este escenario de diseño en particular, se tiene un valor de -16.5 dB de desempeño en el nivel de lóbulos laterales. Esto significa que a medida que se incrementa el número de elementos y el número de puertos de entrada, este valor de nivel de lóbulos laterales mejora en sus prestaciones, sin la necesidad de incorporar alguna técnica de reducción del nivel de lóbulos laterales. Es interesante notar y observar la simplificación de la red en un 50% cubriendo todo el plano azimutal. Esto a medida que se incrementó el número de haces en el sistema de arreglo. Por lo tanto, el diseñador establecerá el escenario más favorable considerando la aplicación dentro de las comunicaciones inalámbricas y los requerimientos de diseño a tomar en cuenta.

Además, como se puede apreciar en la Figura 23, al incrementar el número de elementos en el sistema se incrementa el valor del radio del arreglo circular de antenas. Por lo que al incrementar el radio en el sistema de arreglo circular para este escenario, el ancho del haz de radiación principal disminuye.

Teóricamente, un arreglo lineal de cuatro elementos con distribución de amplitud uniforme proporciona un aumento de ganancia de aproximadamente 6 dB sobre el elemento individual del arreglo. Mientras que para la distribución tipo gaussiana de la red CORPS cilíndrica propuesta, el aumento de ganancia se limitaría a 5.05 dB. La ganancia calculada del arreglo circular, en comparación con el elemento individual del arreglo, es de 1.37 y 3.15 dB para los elementos de antena del arreglo de 14 y 20 elementos, respectivamente (no se toma en cuenta la eficiencia de la red de alimentación en estas cifras). Esta degradación se debe a la distribución de fase uniforme.

Es interesante notar que un arreglo similar con distribución de amplitud uniforme proporcionaría una ganancia de 0.21 dB y 3.23 dB para el diseño de 14 elementos y 20 elementos, respectivamente, sobre la ganancia del elemento individual. Lógicamente, una distribución de amplitud tipo gaussiana presenta una ventaja mayor para radios más pequeños, ya que los efectos de interferencia debido a las diferencias de fase se reducen debido a la predominancia de las señales provenientes de los elementos centrales del arreglo. Además, a medida que el radio aumenta, la ganancia del arreglo tiende hacia el caso del arreglo lineal. En este caso, se tiene que la ganancia de la antena es aproximadamente de 7.6 dB y 8.8 dB para los elementos de antena del arreglo de 14 y 20 elementos, respectivamente.

La implementación de este tipo de sistemas sería importante analizar con más detalle en un trabajo de investigación futuro. Ya que sería interesante verificar la eficiencia o pérdidas que se pudieran tener en manufactura de un prototipo para este caso de diseño. En este arreglo circular de antenas, las redes CORPS que se emplean son redes de 1x4 para cada haz generado. Sin embargo, pudieran utilizarse otras configuraciones que permitan más grados de libertad en el diseño y las prestaciones de radiación del sistema.

Además, hay muchos aspectos en la implementación física de este tipo de sistemas que deben considerarse en escenarios de aplicaciones reales, que sería interesante analizar y verificar en un trabajo de investigación a futuro.

5.4 Conclusiones

En este capítulo se presentan los resultados de investigación de los casos más importantes analizados en esta tesis de investigación. Los resultados generados fueron para los casos de diseño para arreglos circulares planteados: el caso de red de alimentación cofasal y red de alimentación CORPS cilíndrica. En el

primer caso, se demostró que una red de alimentación cofasal utilizando una herramienta de optimización basada en algoritmos genéticos permite generar un haz de radiación. Este haz puede ser escaneado en todo el plano azimutal usando las propiedades de rotación y simetría del arreglo circular. Estas prestaciones de radiación se mantienen al dirigir el haz en diferentes direcciones considerando esta regla de diseño. Además, al utilizar una herramienta de optimización como los algoritmos genéticos, se logró un desempeño notable en el nivel de lóbulos laterales de -24 dB. Lo que representa una reducción del nivel de lóbulos laterales de -16 dB con respecto al caso sin optimizar.

Además, se concluye que al utilizar una red CORPS cilíndrica como la presentada en este trabajo de investigación, se tiene una simplificación de la red de alimentación de un 50%. Este sistema permitió generar el mismo número de haces para el mismo número de puertos de entrada. También, este sistema permitió generar todos los haces de manera distribuida en todo el plano azimutal. La dirección de escaneo de cada haz depende del número de puertos de entrada o número de haces a utilizar. Cada puerto de entrada permite controlar un haz de radiación simplificando la complejidad del sistema. Al aumentar el número de elementos y puertos de entrada, mejoran las prestaciones en el nivel de lóbulos laterales. Por lo que, es factible controlar el valor del nivel de lóbulos laterales para diferentes escenarios de diseño.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1 Conclusiones generales

En el transcurso de esta investigación se llevó a cabo un estudio extenso y un análisis en el ámbito de los arreglos de antenas y las redes de conformación de haz. Los resultados y hallazgos obtenidos han proporcionado una comprensión más profunda de los desafíos y las soluciones en este campo de estudio. A continuación, se presentan las conclusiones generales más destacadas:

Se demostró que el uso de una red de excitación cofasal junto con algoritmos genéticos es una estrategia eficaz para optimizar la formación de haces en arreglos circulares de antena. La optimización permitió alcanzar un nivel de lóbulos laterales de hasta -24 dB, lo que representa una mejora sustancial en comparación con los arreglos sin optimizar.

Las propiedades de rotación y simetría de los arreglos circulares permiten escanear el haz de radiación en todo el plano azimutal sin la necesidad de optimizar cada dirección por separado. Esto simplifica significativamente el proceso de formación de haces y amplía las capacidades de adaptación del arreglo.

Se identificó que la simetría en la excitación de amplitud y la relación conjugada de las fases entre elementos adyacentes son características clave que contribuyen al éxito de la formación de haces en arreglos circulares.

La implementación de redes CORPS cilíndricas en arreglos circulares de antena ofrece una solución eficiente y simplificada para la formación de haces en múltiples direcciones. Estas redes permiten controlar varios haces de radiación de manera distribuida en todo el plano azimutal.

El número de puertos de entrada en las redes CORPS cilíndricas determina la cantidad de haces que pueden generarse. A medida que se aumenta el número de elementos y puertos de entrada, las prestaciones del arreglo mejoran, particularmente en términos del nivel de lóbulos laterales.

La ganancia del arreglo circular, en comparación con el elemento individual del arreglo, se ve afectada por la distribución de fase uniforme en las redes CORPS cilíndricas. Se observó que, en algunos casos, las ganancias pueden ser mayores en arreglos lineales similares.

6.2 Contribuciones realizadas

Durante el desarrollo de esta tesis de investigación, se han logrado importantes contribuciones en el campo de los arreglos de antena y las redes de conformación de haz. Estas contribuciones han enriquecido el conocimiento en esta área y han proporcionado soluciones innovadoras para desafíos relacionados con la formación de haces en arreglos circulares de antena. Las principales contribuciones se destacan a continuación:

Uno de los logros significativos de esta investigación es la aplicación exitosa de algoritmos genéticos para la optimización de arreglos circulares de antena. La implementación de una red de excitación cofasal junto con algoritmos genéticos permitió alcanzar niveles de lóbulos laterales excepcionalmente bajos, llegando hasta -24 dB en algunas direcciones. Esta mejora en las prestaciones de radiación representa una contribución valiosa para aplicaciones de comunicaciones inalámbricas, donde la reducción del nivel de lóbulos laterales es crucial.

La investigación ha destacado la importancia de las propiedades de simetría y rotación en arreglos circulares de antena. Se demostró que estas propiedades pueden utilizarse para escanear el haz de radiación en todo el plano azimutal sin la necesidad de optimizar cada dirección por separado. Esta contribución simplifica significativamente el proceso de formación de haces y mejora la eficiencia del arreglo.

La implementación de redes CORPS cilíndricas en arreglos circulares de antena representa una solución innovadora y eficiente para la formación de haces en múltiples direcciones. Se logró controlar varios haces de radiación de manera distribuida en todo el plano azimutal, lo que simplifica la red de alimentación y reduce la complejidad del sistema. Esta contribución tiene aplicaciones prometedoras en entornos de comunicación complejos.

6.3 Trabajos a futuro

Las contribuciones realizadas en esta tesis abren el camino para futuras investigaciones en el campo de las antenas y los arreglos de antena. Se identifican varias áreas de interés para investigaciones futuras, incluyendo:

La implementación física y la evaluación de prototipos basados en redes CORPS cilíndricas en aplicaciones del mundo real.

La exploración de configuraciones alternativas de redes CORPS que puedan ofrecer un mayor grado de libertad en el diseño y las prestaciones de radiación.

La investigación de técnicas adicionales para reducir el nivel de lóbulos laterales en arreglos circulares, particularmente cuando se utilizan redes CORPS cilíndricas.

Literatura citada

- Al-Sadoon, M. A. G., Patwary, M. N., Zahedi, Y., Parchin, N. O., Aldelemy, A., & Abd-Alhameed, R. A. (2022). A New Beamforming Approach Using 60 GHz Antenna Arrays for Multi-Beams 5G Applications. *Electronics*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/electronics11111739>
- Asplund, H., Astely, D., von Butovitsch, P., Chapman, T., Frenne, M., & Ghasemzadeh, F. (2020). *Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments*. Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128200469/advanced-antenna-systems-for-5g-network-deployments>
- Avser, B., Frazita, R. F., & Rebeiz, G. M. (2018). Interwoven Feeding Networks With Aperture Sinc-Distribution for Limited-Scan Phased Arrays and Reduced Number of Phase Shifters. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(5), 2401–2413. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2816603>
- Avser, B., Pierro, J., & Rebeiz, G. (2016a). Random Feeding Networks for Reducing the Number of Phase Shifters in Limited-Scan Arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64, 1. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2600861>
- Avser, B., Pierro, J., & Rebeiz, G. M. (2016b). Random Feeding Networks for Reducing the Number of Phase Shifters in Limited-Scan Arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 64(11), 4648–4658. <https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2600861>
- Balanis, C. A. (1997). *Antenna theory. Analysis and design* (2nd ed). John Wiley & Sons, Inc. [http://pws.npru.ac.th/sarthong/data/files/%5BENG_C.A.Balanis%5D_Antenna.Theory.Analysis.and.Design_2ed_\(Wiley_1997\).pdf](http://pws.npru.ac.th/sarthong/data/files/%5BENG_C.A.Balanis%5D_Antenna.Theory.Analysis.and.Design_2ed_(Wiley_1997).pdf)
- Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory. Analysis and design*. (4th ed). John Wiley & Sons, Inc. <https://latam.casadellibro.com/libro-antenna-theory---analysis-and-design-4e/9781118642061/13646444>
- Betancourt, D., & Del Río, C. (2007). A Novel Methodology to Feed Phased Array Antennas. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions On*, 55, 2489–2494. <https://doi.org/10.1109/TAP.2007.904133>
- Betancourt, D., & Del Rio, C. (2007). *Utilizando CORPS-BFN para Alimentar Sistemas de Antenas de Múltiples Haces*. <https://hdl.handle.net/2454/24552>
- Butler, J. (1961). Beam-forming matrix simplifies design of electronically scanned antennas. *Electronic Design*, 9, 170–173. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:112814751>
- Cardama, Á., Jofre, L., Rius, J. M., Romeu, J., & Ferrando, M. (1998). *Antenas* (A. Latorre & D. Pablo, Eds.; UPC). El Tinter. <https://www.calameo.com/read/001292451cc7130063b75>
- Enache, F., Depărățeanu, D., & Popescu, F. (2017). Optimal design of circular antenna array using genetic algorithms. *9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ECAI.2017.8166392>

- Fonseca, N. J. G. (2012). Design and Implementation of a Closed Cylindrical BFN-Fed Circular Array Antenna for Multiple-Beam Coverage in Azimuth. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(2), 863–869. <https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2174956>
- Haupt, R. L. (1996). Genetic algorithm design of antenna arrays. *IEEE Aerospace Applications Conference. Proceedings*, 103–109. <https://doi.org/10.1109/AERO.1996.495875>
- Juárez, E., Panduro, M. A., Covarrubias, D. H., & Reyna, A. (2021). Coherently Radiating Periodic Structures to Reduce the Number of Phase Shifters in a 2-D Phased Array. *Sensors*, 21(19), 6592. <https://doi.org/10.3390/s21196592>
- Juárez, E., Panduro Mendoza, M. A., Covarrubias, D. H., Maldonado, A. R., Sanchez, B., & Rio, C. del. (2022). An Innovative Way of Using Coherently Radiating Periodic Structures for Phased Arrays With Reduced Number of Phase Shifters. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 70(1), 307–316. <https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3096989>
- Khan, M. M., Hossain, S., Mozumdar, P., Akter, S., & Ashique, R. H. (2022). A review on machine learning and deep learning for various antenna design applications. *Heliyon*, 8(4), e09317. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09317>
- Khodier, M. M., & Al-Aqeel, M. (2009). Linear and circular array optimization: a study using particle swarm intelligence. *Progress In Electromagnetics Research B*, 15, 347–373. <https://doi.org/10.2528/PIERB09033101>
- Mailloux, R. J. (2018). *Phased Array Antenna Handbook* (3er ed). Congress Cataloging. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9100156>
- Man, K. F., Tang, K. S., & Kwong, S. (1996). Genetic algorithms: concepts and applications [in engineering design]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 43(5), 519–534. <https://doi.org/10.1109/41.538609>
- Nechaev, Y., Borisov, D., & Peshkov, I. (2011). Beamforming algorithm for circular antenna array immune to multipath propagation and non-stationary interference sources. *Radioelectronics and Communications Systems*, 54. <https://doi.org/10.3103/S0735272711110045>
- Nemit, J. T., & Park, C. (1972). *Network approach for reducing the number of phase shifters in a limited scan phased array*. <https://patents.google.com/patent/US3803625A/en>
- Panduro, M. A., Brizuela, C. A., Balderas, L. I., & Acosta, D. A. (2009). A comparison of genetic algorithms, particle swarm optimization and the differential evolution method for the design of scannable circular antenna arrays. *Progress In Electromagnetics Research B*, 13, 171–186. <https://doi.org/10.2528/PIERB09011308>
- Panduro, M. A., & del Rio-Bocio, C. (2009). Design of beam-forming networks using CORPS and evolutionary optimization. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 63(5), 353–365. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2008.02.009>
- Panduro, M. A., Mendez, A. L., Dominguez, R., & Romero, G. (2006). Design of non-uniform circular antenna arrays for side lobe reduction using the method of genetic algorithms. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 60(10), 713–717. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2006.03.006>

- Panduro, M., & Del Río, C. (2008). Design of beam-forming networks for scannable multi-beam antenna arrays using CORPS. *Progress in Electromagnetics Research-Pier - PROG ELECTROMAGN RES*, 84, 173–188. <https://doi.org/10.2528/PIER08070403>
- Poisel, R. A. (2012). *Electronic Warfare Target Location Methods - Artech House Information Warfare Library* (2nd ed). Artech House. <https://us.artechhouse.com/Electronic-Warfare-Target-Location-Methods-Second-Edition-P1512.aspx>
- Pozar, D. M. (2011). *Microwave Engineering* (A. Melhorn & C. Cerf, Eds.; 4th ed). John Wiley & Sons, Inc. [http://mw1.diet.uniroma1.it/people/pisa/RFELSYS/MATERIALE%20INTEGRATIVO/BOOKS/Pozar_Microwave%20Engineering\(2012\).pdf](http://mw1.diet.uniroma1.it/people/pisa/RFELSYS/MATERIALE%20INTEGRATIVO/BOOKS/Pozar_Microwave%20Engineering(2012).pdf)
- Sanchez, B., Panduro, M. A., Covarrubias, D. H., Reyna, A., & Juárez, E. (2022). Coherently Radiating Periodic Structures for Feeding Concentric Rings Array with Reduced Number of Phase Shifters. *Sensors*, 22(23), 9528. <https://doi.org/10.3390/s22239528>
- Yaman, F., & Yilmaz, A. E. (2010). Impacts of Genetic Algorithm Parameters on the Solution Performance for the Uniform Circular Antenna Array Pattern Synthesis Problem. *Journal of Applied Research and Technology*, 8(3). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-64232010000300007
- Zhang, H.-T., Wang, W., Zheng, Z., Jin, M.-P., Fang, X., & Huang, G. (2018). Design of A Beamforming Circular-polarization Waveguide Antenna Array. 64–65. <https://doi.org/10.1109/APCAP.2018.8538115>
- Zhang, K. Q. T. (2016). *Wireless Communications. Principles, Theory and Methodology*. John Wiley & Sons, Std. <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=8039657>