



**Análisis del Factor de Reducción de Interferencia de sistemas MIMO masivos con  
arreglos de gran apertura**

Castillo Marcillo, Miguel Ángel

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Maestría de Investigación en Electrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Magíster en Electrónica mención

Telecomunicaciones

Ing. Altamirano Carrillo Carlos Daniel, PhD.

06 de junio del 2023

## Herramienta de verificación de similitud de contenidos

6/6/23, 22:48

Revisión Tesis Miguel Castillo

### Informe de originalidad

---

**NOMBRE DEL CURSO**

Revision Tesis Maestria 1

**NOMBRE DEL ALUMNO**

MIGUEL ANGEL CASTILLO MARCILLO

**NOMBRE DEL ARCHIVO**

MIGUEL ANGEL CASTILLO MARCILLO - Miguel Castillo

**SE HA CREADO EL INFORME**

6 jun 2023

---

#### Resumen

Fragmentos marcados	3	0,3 %
Fragmentos citados o entrecomillados	2	0,2 %

**Coincidencias de la Web**

us.es	3	0,4 %
issuu.com	1	0,1 %
ebjornson.com	1	0,1 %

**Ing. Altamirano Carrillo, Carlos Daniel, PhD.**

**Director**

**CC. 1715060040**



**Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología**

**Centro de Posgrados**

### **Certificación**

Certifico que el trabajo de titulación: **“Análisis del Factor de Reducción de Interferencia de sistemas MIMO masivos con arreglos de gran apertura”** fue realizado por el señor **Castillo Marcillo, Miguel Ángel**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 6 de junio de 2023**

**Ing. Altamirano Carrillo Carlos Daniel, PhD.**

**Director**

**CC. 1715060040**



Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Responsabilidad de autoría

Yo, **Castillo Marcillo, Miguel Ángel**, con cédula de ciudadanía n° 0702908930, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Análisis del Factor de Reducción de Interferencia de sistemas MIMO masivos con arreglos de gran apertura”** es de mí autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 6 de junio de 2023**

**Castillo Marcillo Miguel Ángel**

**CC. 0702908930**



Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

### Autorización de publicación

Yo, **Castillo Marcillo, Miguel Ángel**, con cédula de ciudadanía n° 0702908930, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**Análisis del Factor de Reducción de Interferencia de sistemas MIMO masivos con arreglos de gran apertura**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 6 de junio de 2023**

**Castillo Marcillo Miguel Ángel**

**CC. 0702908930**

## Dedicatoria

Dedicatoria dirigida a mi querida y amada familia, Priscila &

Luciano, fuentes de mi inspiración.

A mis amados padres, Ángel & Susanita, por su amor infinito y

apoyo incondicional.

## Agradecimiento

Mi agradecimiento se dirige a quien ha guiado mi vida, a Dios, gracias a su ser, las metas propuestas han sido cumplidas.

Junto con él, a mi hermosa esposa Priscila por su apoyo, consideración y sacrificio durante todo este tiempo que llevó la culminación de la maestría.

Sin pasar por alto, a mis padres Ángel y Susanita por todas sus enseñanzas y confianza, lo que ha permitido crecer como persona y ser humano. A mi hermana Tania por sus valiosos consejos.

Gratitud también a mis compañeros de la I cohorte, especial gratitud a mi compañero Fernando Lara, por su amistad y apoyo.

Finalmente, y no menos importante, gratitud a mi tutor Dr. Daniel Altamirano, por su orientación y su constante estímulo para alcanzar este gran logro, sus virtudes de paciencia y guía fueron fundamentales durante este periodo académico.

## Tabla de Contenido

Herramienta de verificación de similitud de contenidos .....	2
Certificación.....	3
Responsabilidad de autoría .....	4
Autorización de publicación .....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimiento .....	7
Índice de Tablas .....	10
Índice de Figuras .....	11
Resumen.....	13
Abstract .....	14
Capítulo 1 .....	15
Introducción.....	15
Antecedentes.....	15
Justificación e importancia .....	19
Alcance del proyecto.....	22
Objetivos.....	23
Objetivo General .....	23
Objetivo Específicos.....	23
Metodología.....	24
Capítulo II.....	26
Fundamento Teórico .....	26
Sistema MIMO .....	26
M-MIMO.....	27
Canal MIMO.....	43



Arreglos de gran apertura .....	45
Factor de reducción de interferencia (IRF) .....	48
M-MIMO Distribuido .....	54
Capítulo III .....	57
Simulación y resultados.....	57
Análisis de los arreglos de gran apertura ULA, UPA y UCA .....	57
<i>Arreglos de Gran Apertura ULA</i> .....	58
<i>Arreglos de Gran Apertura UPA</i> .....	63
<i>Arreglos de Gran Apertura UCA</i> .....	67
Propagación favorable para sistemas de M-MIMO.....	71
<i>IRF de arreglos de gran apertura ULA</i> .....	72
<i>IRF de arreglos de gran apertura UPA</i> .....	73
<i>IRF de arreglos de gran apertura UCA</i> .....	74
Propuesta de arreglos de gran apertura en fachadas de edificios .....	74
<i>Descripción del simulador ELAA para calcular el IRF en fachadas de edificios</i> .....	75
<i>M-MIMO en escenario real</i> .....	107
Capítulo IV .....	111
Conclusiones y recomendaciones.....	111
Bibliografía .....	115

## Índice de Tablas

Tabla 1 Características de la simulación realizada .....	81
Tabla 2 Resultados de la simulación, Eje Y .....	92
Tabla 3 Resultados de la simulación, Eje Z .....	96
Tabla 4 Resultados de la simulación, Plano YZ.....	101
Tabla 5 Resultados de la simulación, Plano XY.....	106
Tabla 6 Resultados de la simulación, M-MIMO en escenario real KU Leuven .....	110

## Índice de Figuras

Figura 1 Ilustración de UE en redes celulares, M-MIMO.....	17
Figura 2 Modelo básico de una canal MIMO.....	27
Figura 3 M-MIMO .....	28
Figura 4 Diversidad de antenas.....	31
Figura 5 Multiplexación espacial.....	32
Figura 6 Beamforming.....	33
Figura 7 Arreglo lineal uniforme eje X, Y y Z.....	35
Figura 8 Arreglo planar uniforme, plano XY.....	38
Figura 9 Geometría de un arreglo circular .....	41
Figura 10 Arreglos de gran apertura.....	46
Figura 11 ELAA con un número elevado de antenas.....	47
Figura 12 Modelo de M-MIMO Distribuido .....	56
Figura 13 Diagrama de radiación ULA N=10 .....	60
Figura 14 Diagrama de radiación ULA N=50 .....	61
Figura 15 Diagrama de radiación ULA N=100 .....	62
Figura 16 Diagrama de radiación ULA N=200 .....	62
Figura 17 Diagrama de radiación UPA N=5X5 (25 antenas).....	64
Figura 18 Diagrama de radiación UPA N=10X10 (100 antenas).....	65
Figura 19 Diagrama de radiación UPA N=20X20 (400 antenas).....	66
Figura 20 Diagrama de radiación UCA N= 50.....	68
Figura 21 Diagrama de radiación UCA N= 100.....	69
Figura 22 Diagrama de radiación UCA N= 150.....	70
Figura 23 IRF con arreglos ULA, UPA, UCA, teórico y simulado .....	72
Figura 24 Diagrama de flujo del simulador ELAA desarrollado .....	77

Figura 25 Imagen cargada con altura y longitud definida.....	78
Figura 26 Selección de los puntos P11 y Pmn.....	79
Figura 27 Escenarios simulados.....	82
Figura 28 Escenarios de ELAA con ULA eje Y .....	88
Figura 29 Patrón de radiación de ELAA en el eje Y .....	90
Figura 30 Escenarios de ELAA con ULA eje Z .....	93
Figura 31 Patrón de radiación de ELAA en el eje Z .....	94
Figura 32 Escenarios de ELAA con UPA en el plano YZ .....	98
Figura 33 Patrón de radiación de ELAA en el plano YZ.....	100
Figura 34 Escenarios de ELAA con UPA en el plano XY .....	103
Figura 35 Patrón de radiación de ELAA en el plano XY.....	105
Figura 36 Dos BS dan servicio a todos los UE .....	108

## Resumen

El continuo crecimiento del tráfico de datos como videos de alta definición, videollamadas simultáneas y sincronización de datos por parte de terminales móviles, ha conminado a la búsqueda de tecnologías para desplegar redes celulares con mayores velocidades y mejor desempeño. Una estrategia planteada para atender las limitaciones actuales de las comunicaciones móviles, es el uso de varias antenas transmisoras y receptoras conocida como sistemas de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas (MIMO). Inicialmente MIMO consideraba sistemas de antenas con hasta 8x8, por este motivo, nuevas técnicas como MIMO masivo (M-MIMO) surgen para referirse a un elevado número de antenas en la estación base, donde adecuar decenas o centenas de antenas se torna importante y representa un reto de diseño experimental y práctico para conectar a múltiples usuarios.

En el presente proyecto se investiga el desempeño de arreglos de antenas uniformes lineales (ULA), planares (UPA) y circulares (UCA), en canales aleatorios uniformes con línea de vista UR-LOS (Uniform random line of sight) extendiéndose la investigación hacia su comportamiento cuando son considerados como arreglos de antenas de gran apertura o arreglos de antenas extremadamente grandes como es el caso de sistemas M-MIMO. Los datos obtenidos serán comparados mediante la evaluación del factor de reducción de interferencia (IRF), por ser una variable que permite analizar el desempeño de sistemas con múltiples antenas. Como resultados, se pretende analizar las relaciones entre la eficiencia, separación y el tamaño de los arreglos de antenas para las futuras redes celulares.

*Palabras claves:* factor de reducción de interferencia, arreglo lineal uniforme, arreglo planar uniforme, arreglo circular uniforme, MIMO masivo.

## Abstract

The continuous growth of data traffic such as high-definition videos, simultaneous video calls, and data impact from mobile devices has prompted the search for higher speeds with greater capacity and performance of cellular networks. A strategy proposed to address current limitations of mobile communications is the use of multiple transmitting and receiving antennas known as Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) systems. Initially, MIMO operated antenna systems of up to 8x8, for this reason, new paradigms such as Massive MIMO (M-MIMO) have emerged to refer to a large number of antennas with larger arrays, where adapting dozens or hundreds of antennas becomes important and represents a practical and experimental design challenge to connect multiple users. In the present project, the performance of uniform linear antenna arrays (ULA), planar arrays (UPA), and circular arrays (UCA) in uniform random line of sight (UR-LOS) channels is investigated, extending the research towards their behavior when considered as large aperture antenna arrays or extremely large antenna arrays as in the case of M-MIMO systems. The obtained data will be compared by evaluating the Interference Reduction Factor (IRF), as it is a variable that allows analyzing the performance of systems with multiple antennas. As a result, the goal is to analyze the relationships between efficiency, spacing, and size of antenna arrays for future cellular networks.

*Keywords:* interference reduction factor, uniform lineal array, uniform planar array, uniform circular array, massive mime.

## Capítulo 1

### Introducción

#### Antecedentes

La tecnología MIMO ha surgido como una alternativa para mejorar el desempeño de redes celulares en un entorno totalmente basado en el empleo de varias antenas tanto en el receptor como en el transmisor, es decir, en las estaciones bases (BS) como en dispositivos móviles (UE). MIMO masivo (M-MIMO) es una innovación tecnológica escalable de MIMO, que proporciona mayor eficiencia espectral, eficiencia energética, aumenta la velocidad de datos, ofrece mayor robustez contra interferencias, mayor fiabilidad, menor latencia, entre otros, siendo una tecnología prometedora para las nuevas generaciones de comunicaciones inalámbricas, teniendo como beneficios lo siguiente (Chataut & Akl, 2020):

- Permite aumentar la capacidad de la red al admitir la transmisión simultánea de grandes cantidades de datos a través de varias antenas.
- Mejor calidad de la señal dado que, utiliza varias antenas para transmitir y recibir datos, la señal es menos susceptible a las interferencias y a la atenuación de la señal, lo que da como resultado, una mejor calidad de la señal y una experiencia de usuario más fluida.
- El uso de múltiples antenas también puede mejorar la cobertura de la red, lo que permite mejores conexiones en áreas con señales débiles o inestables.

- El uso de esta tecnología permite ahorrar energía al reducir la potencia requerida para transmitir una cantidad determinada de datos.

Actualmente, M-MIMO está siendo desarrollado como una tecnología potencial para tráficos masivos de datos y usuarios conectados (Chimeh, 2020).

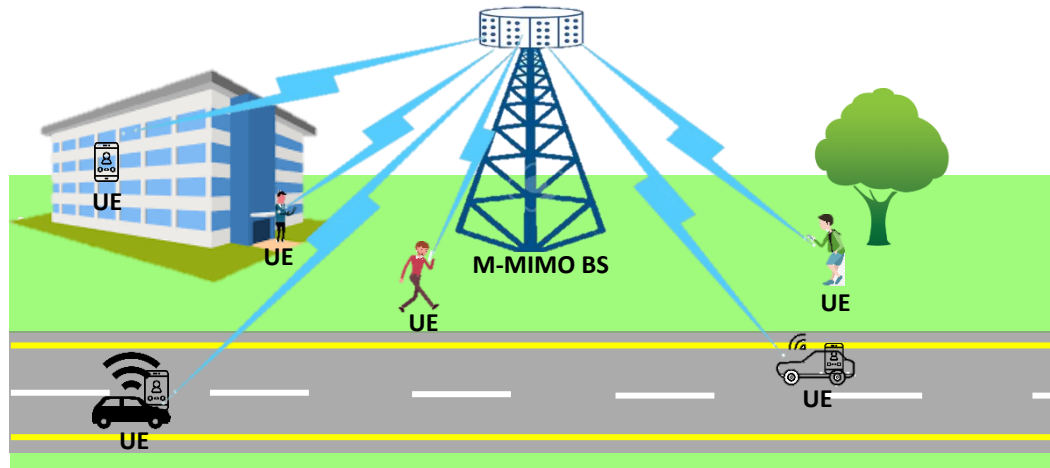
Para un funcionamiento óptimo de los sistemas M-MIMO, su implementación ha sido validada tanto en software y en hardware, siendo este último, un gran desafío que abre camino a diferentes soluciones tecnológicas.

M-MIMO emplea un gran número de antenas en la estación base como se ejemplifica en la Fig. 1 (por ejemplo 8, 16, 64, 128, etc), las mismas que, transmiten y reciben diversas señales, utilizando los mismos recursos de tiempo y frecuencia. Por tanto, se emplea multiplexación espacial. Por otro lado, para dividir el enlace ascendente y descendente se utiliza duplexación en el dominio de tiempo donde la estación base requiere el conocimiento de los coeficientes de la matriz de canal  $H$  (Temiz & Zhang, 2020), (Altamirano D. , 2021).



## Figura 1

*Ilustración de UE en redes celulares, M-MIMO*



*Nota.* La figura representa las comunicaciones inalámbricas con tecnología M-MIMO con un gran número de antenas en la estación base (BS) y varios equipos de usuarios (UE)

El uso de un número elevado de antenas en la estación base, a la vez de que trae mejoras, en la práctica, introduce desafíos, pues no es posible tener un número infinitos de antenas en la estación base, así como, el implementar decenas o centenas de antenas en una estación base de forma óptima, por lo que representa un reto en sistemas M-MIMO. Por consiguiente, el adecuar un elevado número de antenas con arreglos geométricos de antenas bajo un entorno matemático y simulado, se torna importante para analizar el desempeño de un sistema.

En la actualidad, es posible implementar diferentes arreglos geométricos de antenas que garanticen irradiar diversos patrones de radiación, y con esto, seleccionar el modelo de arreglo que preste mejores condiciones de irradiación y de reducción de

interferencia, junto a esto, el análisis de los fenómenos de propagación como el desvanecimiento que usualmente es modelado como Rayleigh , Ricean u otros modelos generalizadas (Temiz & Zhang, 2020), requieren una reducción del factor de interferencia (IRF Interference Reduction Factor), que garantice una propagación favorable mediante la agrupación de elementos radiantes los cuales permitirán la mutua ortogonalidad entre canales, aspecto que depende del canal de desvanecimiento analizado (Altamirano D. , 2021).

Al estudio de adecuar un elevado número de antenas a través de arreglos geométricos como los arreglos de antenas uniformes lineales (ULA), planares (UPA), circulares (UCA), se suma el estudio de los arreglos de antenas de gran apertura o arreglos de matrices de antenas extremadamente grandes denominados (ELAA, Extremely Large Aperture Array), el cual se perfila como una solución para las futuras generaciones de redes celulares (Méndez, Jojoa, & Almenar, Julio, 2015). Los arreglos de gran apertura además de considerar características particulares de propagación, buscan ocupar de forma parcial o total, la infraestructura física donde se montará la estación base, mejorando aún más el desempeño de M-MIMO respecto a la tecnología MIMO tradicional (Björnson & Marzetta, 2019).

Finalmente, M-MIMO es uno de los principales pilares para la conectividad 5G, dando como resultados, redes inalámbricas y dispositivos móviles capaces de transmitir y recibir información de forma masiva y rápida.

## **Justificación e importancia**

Las redes celulares son los principales actores de conectividad, lo que ha permitido acceder a un sinnúmero de servicios de forma rápida y segura, sin embargo, aunque las comunicaciones celulares hayan evolucionado, todavía existe inconvenientes técnicos como, por ejemplo: cobertura, interferencia, atenuación, latencia y capacidad de la red; que deben ser abordados para mejorar la calidad del servicio y poder satisfacer a los usuarios que cada día crecen y utilizan diferentes servicios. Con relación a la capacidad, para el 2023 se tiene estimado un incremento de del volumen de tráfico del 46%, pasando de 13 Exabytes que se genera desde el año 2017 a los 77 Exabyte, siendo el principal elemento los smartphones, los cuales aportarán el 93% del tráfico móvil global (Ngo, Larsson, & Marzetta, 2014).

Los desafíos atribuidos a las nuevas generaciones de sistemas de comunicaciones móviles se tornan no solo en el volumen de información, sino también, al incremento en el número de usuarios conectados del 11 % del año 2017 al 31 % en el año 2023 (Barnett & Khurana, 2018).

En este contexto, las actuales tecnologías de comunicaciones inalámbricas deben innovarse para sostener el incremento de usuarios conectados, en tal virtud, los investigadores continúan desarrollando nuevas tecnologías, capaces de desarrollar comunicaciones masivas a altas velocidades, latencia mínima, confiabilidad en las comunicaciones, reducción del consumo energético, entre otros, mediante la determinación de una propagación favorable que maximice la capacidad del canal.

Por este motivo, los cambios tecnológicos en las comunicaciones móviles y el incremento de usuario conectados, constituyen un desafío. En particular, para los sistemas M-MIMO existen algunos desafíos que se detallan a continuación:

1. **Hardware:** Aumentando el número de antenas, se reduce el efecto producido por el ruido, desvanecimiento e interferencias, sin embargo, aumentar el número de antenas de decenas a centenas en los sistemas M-MIMO, además de representar un reto de diseño por el limitado espacio físico existente, aumenta la complejidad y costo computacional del sistema. El desafío radica en implementar sistemas con bajo costo y pequeños componentes que permitan reducir la complejidad, tamaño de antenas, distanciamiento entre antenas, arreglo geométrico óptimo, entre otros. En tal razón, la implementación de M-MIMO requiere de un hardware completo, que incluya una gran cantidad de antenas y componentes de procesamiento de señales, esto puede ser costoso y de costo computacional, lo que puede ser un desafío en algunos entornos (Chataut & Akl, 2020). Cabe mencionar que los inconvenientes en hardware no podrán ser eliminados en su totalidad, pero se pretende minimizar los inconvenientes que este produce.
2. **Eficiencia:** Al aumentar el número de antenas, aumenta la eficiencia espectral, lo que conlleva a un mayor consumo de energía. Para reducir este consumo de energía de los sistemas, investigadores académicos se enfocan en adecuar decenas o centenas de antenas mediante el diseño óptimo y amplificadores de potencia, quedando abierto una serie de posibilidades para la investigación para mejorar la eficiencia espectral.

3. Arreglos de apertura extremadamente grande: Uno de los inconvenientes presentes en los sistemas M-MIMO, es la cantidad de antenas que deben ser instalados en edificios y torres de comunicaciones, estudios realizados en (Björnson & Marzetta, 2019) se aprecian arreglos de 64 antenas distribuidos en 8 antenas por fila, cuya separación es de aproximadamente 7,42 centímetros por antena, por tanto, para implementar cientos de antenas y con esto, aumentar la eficiencia espectral, es necesario contar con nuevas estrategias de despliegue de antena que permita explotar toda la infraestructura y en todos sus componentes a los sistemas M-MIMO. De igual manera, una de las características principales y que se encuentra parcialmente estudiada es el patrón de radiación, cuyo entendimiento de dicha característica, se debe realizar mediante el estudio de los arreglos de antenas, siendo los más comunes los arreglos lineales, planares, circulares y cilíndricos.
  
4. Interferencia: Al existir un gran número de antenas, puede haber interferencia entre ellas, lo que puede afectar de forma negativa a la calidad de la señal, por lo que se necesita evaluar este parámetro para maximizar el desempeño del sistema (Blanco Murga, 2018).

El presente trabajo, analiza la reducción de interferencia mediante el estudio de los arreglos de antenas considerando sus características de apertura extremadamente grandes, asociado también, al medio de propagación de tipo aleatorio mediante la estimación de los parámetros de calidad de los sistemas por medio de información estadística pertinente, teniendo aspectos no considerados en otras investigaciones como la IRF, todo esto, contribuyendo a la línea de investigación, evolución y transformación de la forma de comunicación, con principios de integralidad,

confiabilidad, seguridad e interoperabilidad de los sistemas de comunicaciones inalámbricas.

Como centro educativo y de investigación en el área de Telecomunicaciones, la ESPE lleva a cabo estudios sobre la evolución y desafíos en el dinámico desarrollo de comunicaciones inalámbricas, la propuesta está basada en el profundo conocimiento de las comunicaciones móviles que tienen los investigadores académicos de la universidad, conocimientos adquiridos en cada nivel de la carrera y del estudio técnico específico del estado del arte, permitiendo enfrentar y brindar posibles soluciones técnicas que afronta la tecnología actual y a su vez, abre camino para quienes deseen continuar explorando la tecnología móvil y aprovechar su potencial. Asimismo, es importante iniciar con una investigación que considere nuevas tendencias de arreglos de antenas que podrían convertirse en la base de redes móviles 5G.

### **Alcance del proyecto**

Dado los desafíos planteados en el apartado anterior, donde el incremento de usuarios móviles conectados conlleva a nuevos estudios técnicos para mejorar la propagación maximizando la capacidad del canal, se propone el análisis del factor de reducción de interferencia mediante el estudio de arreglos de antenas considerando sus características de gran apertura considerando distintos modelos de canal.

Para el desarrollo de este estudio, será necesario el diseño de arreglos geométricos de tipo ULA, UPA y UCA a través de simulaciones mediante la herramienta de Matlab y Wolfram Mathematica. Esto permitirá entender el comportamiento de canal con diferentes arreglos geométricos planteados, además, se analizará su desempeño

mediante la implementación simulada de arreglos de apertura extremadamente grande (ELAA) en edificios, para finalmente, obtener un IRF óptimo para sistemas M-MIMO.

La fuente principal para la presente investigación es la tesis doctoral denominada “Evaluación de los sistemas MIMO masivo con Reducción de interferencia y estimación de canal imperfecta” del año 2021 del Dr. Carlos Daniel Altamirano Carrillo (Altamirano D. , 2021). Así como también, para la adecuación de arreglos extremadamente grandes, se tiene como referencia el artículo “¿Massive MIMO is a Reality-What is Next?” del año 2020, de Emil Björnson, Luca Sanguinetti, Henk Wymeersch, Jakob Hoydis, Thomas L. Marzetta (Björnson & Marzetta, 2019). Las fuentes mencionadas anteriormente permiten tener una noción de los conceptos básicos, sin embargo, a lo largo del desarrollo del presente trabajo se incluirán nuevas fuentes bibliográficas.

Los resultados serán puestos a consideración bajo un esquema de solución donde se busca beneficiar a las comunicaciones móviles actuales.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Analizar el Factor de Reducción de Interferencia de arreglos de antenas y sus características como arreglos de antenas extremadamente grandes (gran apertura) en M-MIMO.

### **Objetivo Específicos**

1. Identificar las capacidades y limitaciones de los arreglos geométricos ULA, UPA y UCA, así como, sus características al considerarse como arreglos de gran apertura para los sistemas M-MIMO.
2. Determinar las consideraciones técnicas requeridas para arreglos geométricos y arreglos de gran apertura que permita disponer de una solución favorable para sistemas M-MIMO.
3. Analizar el desempeño de los arreglos geométricos ULA, UPA, UCA, y arreglos de gran apertura estudiados e investigados en función de Factor de Reducción de Interferencia IRF.

## **Metodología**

La metodología se basa en planificar-ejecutar-verificar-actuar (PDCA, plan-do-check-act). Una adaptación de la metodología PDCA a los requerimientos de este trabajo es presentada a continuación:

Planificar: En primer lugar, se realizará un levantamiento bibliográfico para comprender el estado del arte de comunicaciones inalámbricas, M-MIMO, propuesta matemática planteada por diferentes autores para arreglos geométricos y arreglos de gran apertura. Con base a este estudio del estado del arte, se determinarán los arreglos geométricos que permitirán alcanzar el objetivo propuesto, previo a los cálculos matemáticos que la investigación conlleve.



**Ejecutar:** Mediante simulaciones realizadas con la herramienta de Matlab y Wolfram Mathematica se diseñará arreglos geométricos de tipo ULA, UPA y UCA lo que permitirá entender el comportamiento de canal con diferentes arreglos geométricos planteados, donde se analizará su desempeño considerando distintos modelos de canal para arreglos de gran apertura, todo esto, para obtener un IRF óptimo para sistemas M-MIMO. Se definirán los indicadores clave de desempeño (KPI - Key Performance Indicators) para posterior verificación de nuestro diseño.

**Verificar:** Se analizará los KPIs, se realizarán análisis del Factor de Reducción de Interferencia obtenidos en diferentes escenarios y se comparará el desempeño con modelos teóricos. Adicionalmente, se analizará los puntos débiles y fuertes de nuestro diseño.

**Actuar:** Los resultados serán puestos a consideración del tutor bajo un esquema de solución que beneficiará a las comunicaciones móviles actuales. En caso de que los resultados no sean los esperados, se analizará estas diferencias y con sus respectivas causas. De ser necesario, se establecerá condiciones para el uso y ajustes necesarios. Finalmente, con los resultados se determinará las conclusiones y determinará los escenarios de operación cumpliendo los objetivos del proyecto.

## Capítulo II

### Fundamento Teórico

#### Sistema MIMO

La gran demanda de las redes inalámbricas por parte de los usuarios es cada día más notoria puesto que, indiscutiblemente, garantizan comunicaciones ágiles, rápidas y oportunas. A pesar de tener una ventaja competitiva por el crecimiento exponencial de usuarios y dispositivos conectados con respecto a las redes cableadas, las redes inalámbricas se encuentran limitadas en capacidades y robustez debido a varias razones como: ancho de banda limitado lo que afecta al número de usuarios que pueden acceder a la red, a la velocidad y al desempeño del sistema; interferencia por el uso cercano de otros dispositivos o por factores ambientales que afectan a la calidad de la señal; entre otros (Trujillo & Quishpe, 2022).

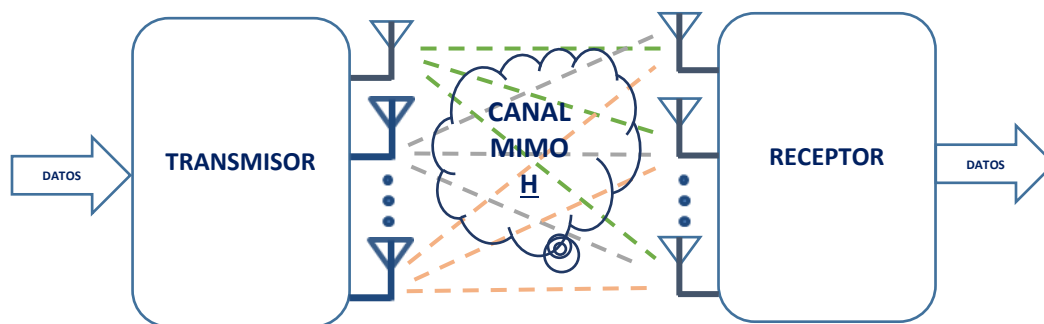
Una de las soluciones para atender las necesidades planteadas es el empleo de la tecnología MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) mediante el uso de múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor, como se muestra en la Fig. 2, el cual, ofrece entre otros aspectos técnicos: mayor tasa de transferencia, cobertura mayor, incremento de usuarios conectados, fiabilidad (Méndez, Jojoa, & Almenar, Julio, 2015).

La tecnología MIMO ha ocupado mucho espacio en las comunicaciones inalámbricas, por citar algunos, se tiene las redes de área local inalámbrico (WLAN por sus siglas en inglés) bajo el estándar 802.11, también MIMO hace presencia en redes

WPAN o WMAN, WiMAX, así como también, en las comunicaciones móviles, este último, se ha evaluado desde la tercera generación (3G) hasta la quinta generación (5G) de redes celulares donde se ha evidenciado teóricamente que el incrementar el número de antenas, se solucionan parámetros como eficiencia espectral, capacidad del sistema, velocidad de datos, optimización del consumo de potencia entre otros (Méndez, Jojoa, & Almenar, Julio, 2015), (Morales, Morales, & Quiñónez, 2020).

## Figura 2

*Modelo básico de un canal MIMO*



*Nota.* La figura representa un modelo básico de un canal MIMO mediante el uso de múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor.

## M-MIMO

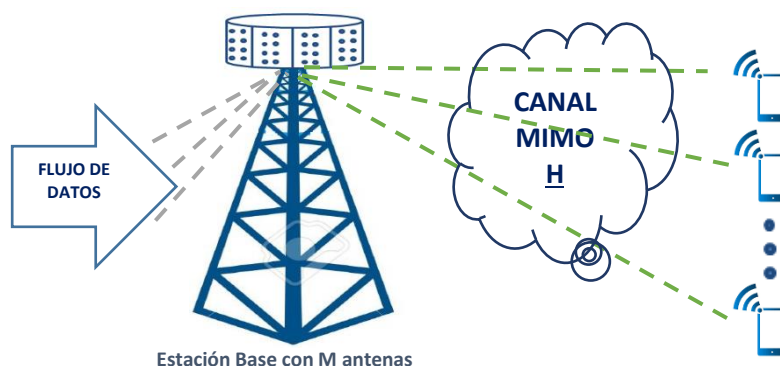
M-MIMO hace referencia a la escalabilidad que tiene MIMO para los diferentes servicios detallados anteriormente, permitiendo incrementar un mayor número de antenas y con esto, mejorar la eficiencia espectral, reducir la interferencia, reducir la

potencia requerida, aumentar la velocidad de datos, aumentar la cobertura, entre otros (Alonso González, 2020).

De igual forma, como se visualiza en la Fig. 3 **Figura 3**, M-MIMO es una técnica avanzada de procesamiento de señales en la que se implementa un gran número de antenas en la estación radio base (ERB), es decir decenas o centenas, y sirven tanto en la transmisión como en la recepción, con el fin de aprovechar eficientemente los recursos de tiempo y frecuencia del canal de radiocomunicaciones. Esto es posible mediante el aprovechamiento de los múltiples trayectos presentes durante la propagación y, por consiguiente, el uso de técnicas de transmisión como: la diversidad espacial, también denominada diversidad de antenas, multiplexación espacial y beamforming.

**Figura 3**

*M-MIMO*



*Nota.* La figura ejemplifica la implementación de un gran número de antenas en la estación base (BS) y varios equipos de usuarios con tecnología M-MIMO.

En la literatura, se encuentran diferentes técnicas para referirse a M-MIMO, como por ejemplo Large MIMO (L-MIMO) y redes ultra densa (UDN) cuyas ventajas atribuidas son: tasas altas de datos, fiabilidad en el enlace, mayor eficiencia espectral y energética, y, disminuye el ruido térmico y la interferencia co-canal (Kamel, Hamouda, & Youssef, 2016).

Large MIMO se ha caracterizado por ser una técnica potente para un sin número de aplicaciones actuales entre otros, como la detección de símbolos para grandes sistemas MIMO (Nguyen & Lee., 2019), el despliegue de matrices de antenas de 64x64 con 4-QAM con códigos de bloques, espacio tiempo (STBCs) (Datta, Srinidhi, Chockalingam, & Rajan, 2010) y, despliegue de L-MIMO 32x32 QPSK a través de la detección de símbolos por redes neuronales.

La ligera diferencia entre M-MIMO y L-MIMO radica en la distribución de antenas entre la estación base y los dispositivos receptores. M-MIMO utiliza un gran número de antenas en la estación base y un número relativamente menor en los dispositivos receptores, mientras que L-MIMO emplea un gran número de antenas tanto en la estación base como en los dispositivos receptores. Ambas técnicas tienen como objetivo mejorar el desempeño y la capacidad de las redes inalámbricas, pero se aplican en diferentes configuraciones según los requisitos del sistema (Nguyen & Lee, 2020), (Anzaldo Navarrete, 2019).

### **Diversidad de antenas**

Diversidad hace referencia a la transmisión de la misma información por múltiples caminos radioeléctricos diferentes que se ven afectados de forma

independiente por el desvanecimiento. El aprovechamiento de estas múltiples señales consiste en el procesamiento de las señales para generar una única señal, el número de múltiples señales existentes se conoce como orden de diversidad, lo cual, a mayor orden de diversidad y mejor desempeño del sistema (Altamirano D. , 2021).

Existen diferentes clases de diversidad que difieren de donde se genere: diversidad en el tiempo, en frecuencia, en el espacio, polarización y de usuario (Dorize, et al., 2021).

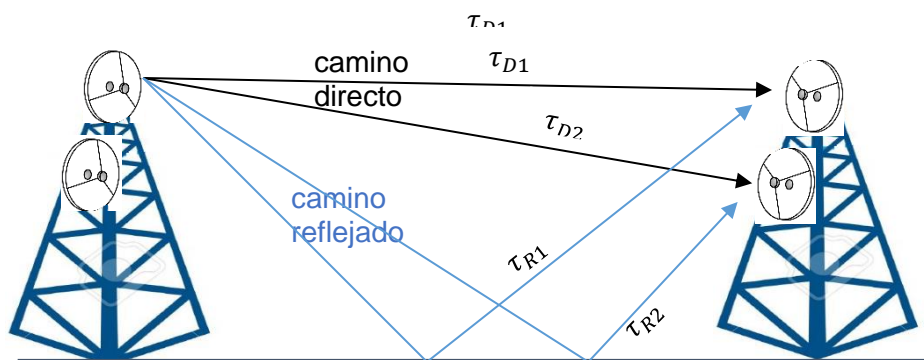
Diversidad en el tiempo se refiere a la transmisión de la misma señal por múltiples caminos en diferentes intervalos de tiempos. Diversidad en frecuencia, es cuando la señal es transmitida por diferentes canales de frecuencia. Diversidad en el espacio se refiere a la transmisión de la señal por diferentes canales de propagación, en efecto, esta técnica es muy utilizada mediante la diversidad de antenas, es decir, varias antenas tanto en el transmisor como en la recepción (diversidad en transmisión y diversidad en recepción). Finalmente, la diversidad de usuarios se da cuando se transmite la señal a un usuario específico de varios usuarios existentes en el canal.

Es por tanto que, los sistemas MIMO utilizan la diversidad de antenas (varias antenas tanto en el transmisor como en la recepción) para mejorar las prestaciones del sistema en general, la calidad y fiabilidad de la transmisión de datos mediante el uso de múltiples antenas en la estación base o en los dispositivos de usuario. A la diversidad de antenas se puede dividir en diversidad en transmisión y diversidad en recepción, los cuales pueden combinarse o utilizarse por separados (Ver Figura 4).

La diversidad en recepción o en transmisión, conlleva al uso de dos o más antenas en un mismo receptor o transmisor, conllevando a recepciones independientes de la señal. Para lo cual, la separación entre antenas receptoras debe ser de tal forma que no se vea afectado por el desvanecimiento considerando, por tanto, que la separación entre antenas en un canal multitrayecto es como mínimo  $d \approx \frac{\lambda_c}{2}$  donde  $\lambda_c$  es la longitud de onda  $\lambda_c \approx \frac{c}{f_c}$  (Tse & Viswanath, 2005).

**Figura 4**

*Diversidad de antenas*



*Nota.* La figura ilustra el comportamiento de la diversidad de antenas en el camino directo como en el camino reflejado.

### **Multiplexación espacial**

La multiplexación es una técnica que combina dos o más señales para ser transmitidas por un solo medio de transmisión, cuya ventaja principal es la de permitir varias comunicaciones de forma simultánea. Por tanto, la multiplexación espacial

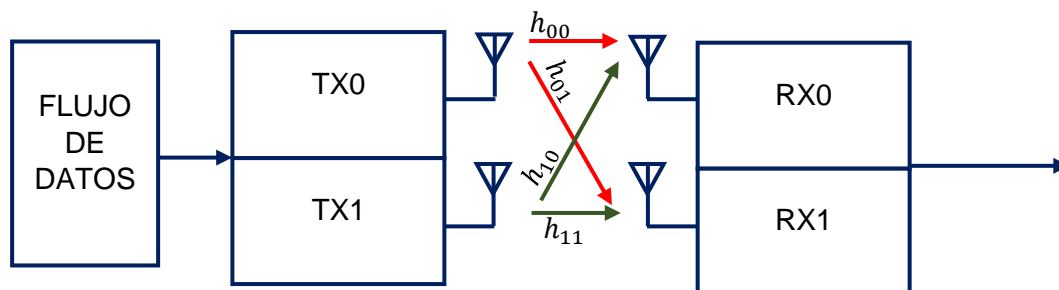
consiste en la combinación de dos o más señales de menor ancho de banda en una señal de mayor ancho de banda (Anguís H, 2008)

Al contrario de la multiplexación espacial, la demultiplexación espacial consiste en la división de una señal de mayor ancho de banda en varias señales iguales de menor ancho de banda (Anguís H, 2008).

Las ventajas atribuidas a la multiplexación espacial y diversidad de antenas para los sistemas MIMO, se basan en el desempeño y al mejoramiento de la eficiencia espectral, además para reducir las interferencias.

### Figura 5

*Multiplexación espacial*



*Nota.* La figura ilustra la multiplexación espacial mediante la combinación de dos o más señales de menor ancho de banda en una señal de mayor ancho de banda.

### Beamforming

Beamforming es una técnica de procesamiento capaz de conformar haces exclusivos para uno o varios usuarios, con la finalidad de dirigir el haz que genera el arreglo de antenas del transmisor hacia el receptor mediante la asignación de mayor



potencia en la dirección requerida y anulando en otras direcciones, consiguiendo reducir y atenuar las señales que interfieren entre usuarios (Cuevas, 2017).

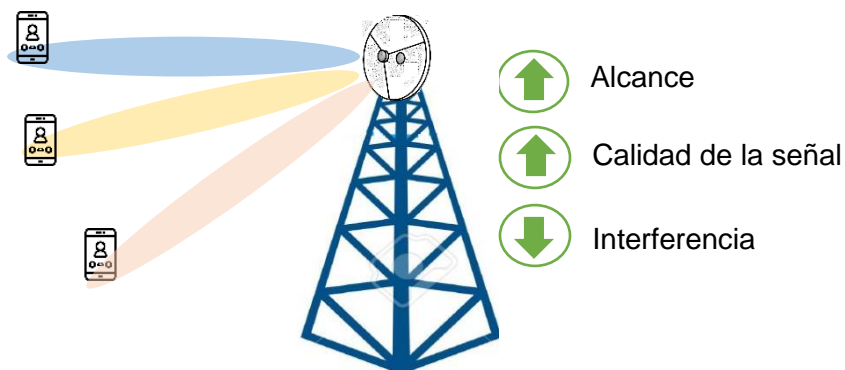
Esta técnica se puede situar en lado del transmisor y en el receptor.

Beamforming en transmisión es utilizado para configurar el patrón de radiación, permitiendo aumentar la directividad de la antena hacia una dirección deseada, y atenuar la señal hacia otras direcciones. Por otro lado, beamforming en recepción es utilizado para incrementar la sensibilidad en el receptor hacia una dirección deseada y disminuir hacia otras direcciones no deseadas, permitiendo reducir las interferencias (Anguís H, 2008).

El funcionamiento de la conformación de haz debe ser analizado mediante arreglos de antenas, modelos de la señal de un arreglo y formación del haz (Motta Vargas & Tejada Vera, 2018).

## Figura 6

### *Beamforming*



*Nota.* La figura ilustra la técnica de beamforming mediante conformación de haces exclusivos para uno o varios usuarios.

## **Arreglo de antenas y modelo de la señal**

Un arreglo de antenas es una agrupación de antenas conectadas entre sí que cumplen ciertas características de radicación, tamaño, dirección y de forma geométrica especial de tal manera que generen patrones de radiación directivos, se colocan en una configuración específica y se ajustan para trabajar juntas como un sistema coherente. La importancia del aspecto geométrico de estos arreglos, además de brindar mayor directividad hacia una dirección específica y ganancia, buscan el factor de interferencia entre usuarios mediante interferencias de manera constructivas que permitan incrementar las ganancias en las direcciones deseadas y anular a través de interferencia destructiva (anulación entre sí) hacia otras direcciones (Orozco Bermúdez, 2013).

Existen múltiples configuraciones de arreglos de antenas que varían geoméricamente como es: lineal, planar, circular, anillo, entre otros, los cuales, cada tipo tiene sus propias ventajas y desventajas, y son utilizados para diferentes aplicaciones de comunicaciones inalámbricas. En el presente trabajo que parte del sistema de telefonía móvil, se abordarán los siguientes:

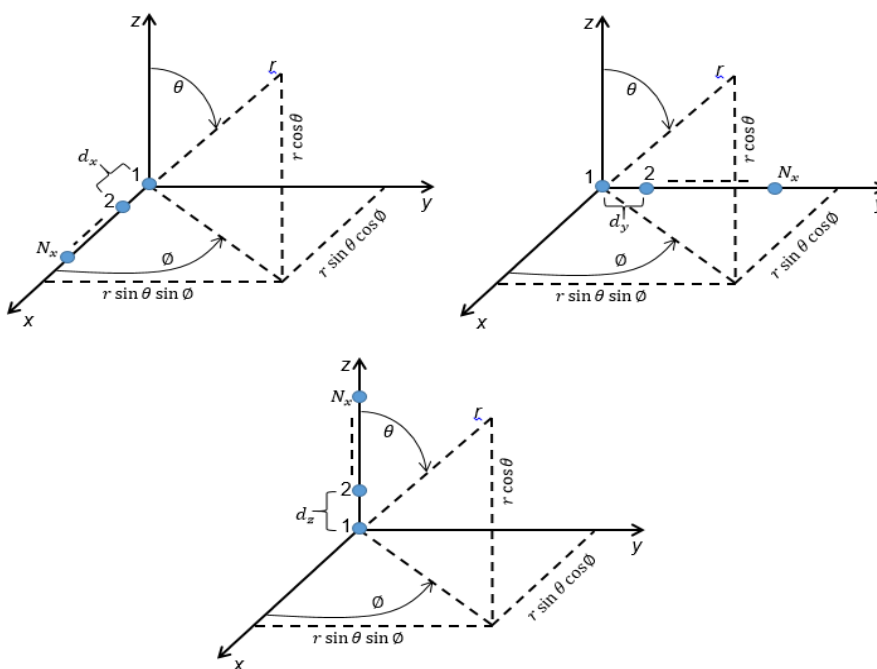
- **Arreglo Lineal Uniforme (ULA).**- (Uniform Linear Array, por sus siglas en inglés) Corresponde a un arreglo de antenas en línea recta separados de forma equidistante con una distancia igual entre elementos. Este tipo de arreglo se utiliza comúnmente en sistemas de comunicaciones celulares, sistemas radares y comunicaciones por satélite (Amadid, Boulouird, & Riadi, 2022).

Los arreglos lineales pueden colocarse en cualquier eje tridimensional, siendo estos, el eje X, el eje Y y el eje Z, el cual depende de las necesidades específicas y de su aplicación en entornos reales.

Por ejemplo, un arreglo lineal en el eje X sería la colocación de antenas en línea horizontal de un extremo al otro en el plano XY; un arreglo lineal en el eje Y, sería la colocación de antenas en línea vertical de un extremo al otro en el mismo plano XY; y, un arreglo lineal en el eje Z, sería la colocación de antenas a lo largo de una línea que se extiende perpendicularmente al plano XY. En la Fig. 7, se muestra un arreglo de antenas de  $N$  elementos separados a una distancia  $d$  fija a lo largo de los ejes X, Y y Z.

**Figura 7**

*Arreglo lineal uniforme eje X, Y y Z*



*Nota.* La figura ilustra arreglos de antenas en línea recta en cada eje (X, Y y Z)

En (Altamirano D. , 2021) se describe la diferencia de fase entre la señal de arriba y las dos antenas adyacentes de cada eje, como:

$$\Phi_{k,x} = 2\pi\Delta_x \cos \phi_k \sin \theta_k \quad (2.1)$$

$$\Phi_{k,y} = 2\pi\Delta_y \sin \phi_k \sin \theta_k \quad (2.2)$$

$$\Phi_{k,z} = 2\pi\Delta_z \cos \theta_k \quad (2.3)$$

Donde:

$\Delta_x = \frac{d_x}{\lambda_c}$ ,  $\Delta_y = \frac{d_y}{\lambda_c}$  y  $\Delta_z = \frac{d_z}{\lambda_c}$  son la separación normalizada entre antenas

$d_x$ ,  $d_y$  y  $d_z$  es la distancia entre antenas, donde  $d \approx \frac{\lambda_c}{2}$ .

$\phi_k$  es el ángulo de arribo que varía entre  $[0, 2\pi)$  y  $\theta_k$  es en ángulo de elevación el cual que varía entre  $[\frac{\pi}{2}, \pi)$ . En un escenario en campo lejano (*far-field*) u horizonte, el ángulo de elevación se reduce a  $\theta_k = \pi/2$  puesto que las ondas electromagnéticas son propagadas a largas distancias, lo que se aproxima a una propagación de forma paralela a la tierra, lo que se reduce a dos dimensiones (2-D) es decir a una propagación de ondas en los ejes X y Y.

El vector de dirección (*steering vector*) es un vector utilizado para representar la dirección de llegada de una señal la cual se forma a partir de la fase y la amplitud de la señal. Es comúnmente utilizado para localización, seguimiento y cancelación de interferencia a través del direccionamiento de

la energía de la señal recibida en una dirección específica, reduciendo la interferencia de señales que llegan en otras direcciones.

Para un arreglo lineal, el vector de dirección está dado por las siguientes ecuaciones (Altamirano D. , 2021):

$$\mathbf{h}_{k,x} = [1 \exp[-i\Phi_{k,x}] \dots \exp[-i(N_x - 1)\Phi_{k,x}]]^T \quad (2.4)$$

$$\mathbf{h}_{k,y} = [1 \exp[-i\Phi_{k,y}] \dots \exp[-i(N_y - 1)\Phi_{k,y}]]^T \quad (2.5)$$

$$\mathbf{h}_{k,z} = [1 \exp[-i\Phi_{k,z}] \dots \exp[-i(N_z - 1)\Phi_{k,z}]]^T \quad (2.6)$$

Donde: N es el número de antenas en la dirección X, Y o Z según corresponda;  $\Phi_{k,x}$ ,  $\Phi_{k,y}$ ,  $\Phi_{k,z}$  es la fase de la señal recibida por el K-ésimo antena del arreglo lineal en la dirección X, Y o Z según corresponda la cual se describe en la ecuación (2.1), (2.2) y (2.3) respectivamente.

- **Arreglo Planar Uniforme (UPA).**- Un arreglo planar es una extensión de un arreglo lineal dispuestos en un plano y separados a una distancia uniforme entre sí. Este arreglo permite obtener un diagrama con mayor número de antenas con patrón de radiación hacia una dirección específica y eliminar la radiación en otras direcciones, es decir, más directiva (Cuevas, 2017).

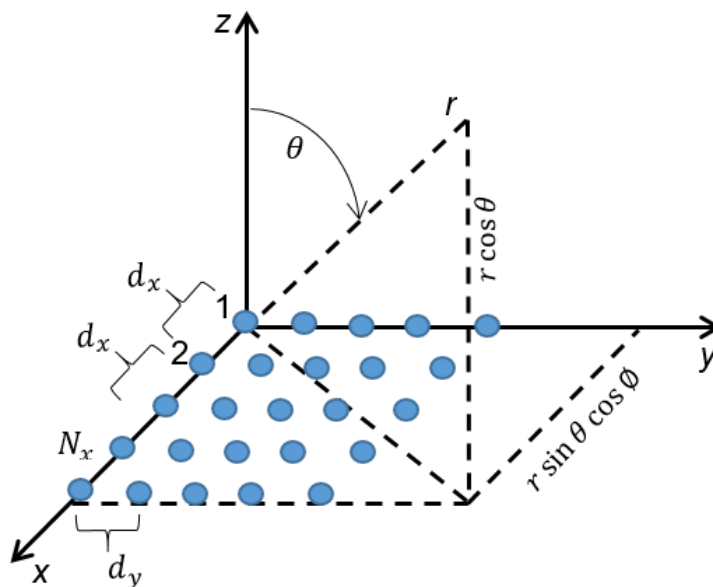
Un arreglo planar puede ser colocado en un plano bidimensional, por lo general, en un plano horizontal o vertical, es decir, puede ser colocado en el

suelo o suspendido en el aire como en techos (plano horizontal) o en una pared (plano vertical).

Las antenas están dispuestas en filas y columnas equidistantes en ambas direcciones sobre un plano, por ejemplo, arreglo planar en el plano XY, dando como resultado la implementación de antenas en el eje X y en el eje Y, como se muestra en la Fig. 8; arreglo planar en el plano YZ, la cual despliega antenas sobre el eje Y y eje Z; y, arreglo planar en el plano XZ, el cual involucra el despliegue de antenas sobre el eje X y eje Z.

**Figura 8**

*Arreglo planar uniforme, plano XY*



*Nota.* La figura ilustra un arreglo planar sobre el eje XY.

El vector de direcciones para el arreglo planar, se puede representar como una combinación del producto de Kronecker de los vectores de direcciones en cada eje del arreglo planar, obteniendo lo siguiente:

$$\mathbf{h}_{k,xy} = \mathbf{h}_{k,x} \otimes \mathbf{h}_{k,y} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{h}_{k,xz} = \mathbf{h}_{k,x} \otimes \mathbf{h}_{k,z} \quad (2.8)$$

$$\mathbf{h}_{k,yz} = \mathbf{h}_{k,y} \otimes \mathbf{h}_{k,z} \quad (2.9)$$

Donde:

$\otimes$  es el producto de Kronecker de los steering vector de cada eje del arreglo planar.

$\mathbf{h}_{k,x}$ ,  $\mathbf{h}_{k,y}$ ,  $\mathbf{h}_{k,z}$  representan los vectores de direcciones de un arreglo lineal.

A manera de ejemplo, el vector de dirección  $\mathbf{h}_{k,xy}$  de dimensión  $N_x N_y \times 1$  en el plano XY, se representa como:

$$\mathbf{h}_{k,xy} = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp\{-i\Phi_{k,x}\} \\ \vdots \\ \exp\{-i[N_x - 1]\Phi_{k,x}\} \\ \exp\{-i\Phi_{k,y}\} \\ \exp\{-i[\Phi_{k,x} + \Phi_{k,y}]\} \\ \vdots \\ \exp\{-i[(N_x - 1)\Phi_{k,x} + \Phi_{k,y}]\} \\ \vdots \\ \exp\{-i[(N_x - 1)\Phi_{k,x} + (N_y - 1)\Phi_{k,y}]\} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Y, el vector de dirección  $\mathbf{h}_{k,yz}$  de dimensión  $N_y N_z \times 1$  en el plano YZ, se representa como:

$$\mathbf{h}_{k,yz} = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp\{-i\Phi_{k,z}\} \\ \vdots \\ \exp\{-i[N_z - 1]\Phi_{k,z}\} \\ \exp\{-i\Phi_{k,y}\} \\ \exp\{-i[\Phi_{k,y} + \Phi_{k,z}]\} \\ \vdots \\ \exp\{-i[(N_z - 1)\Phi_{k,z} + \Phi_{k,y}]\} \\ \vdots \\ \exp\{-i[N_y - 1]\Phi_{k,y}\} \\ \exp\{-i[(N_y - 1)\Phi_{k,y} + \Phi_{k,z}]\} \\ \vdots \\ \exp\{-i[(N_y - 1)\Phi_{k,y} + (N_z - 1)\Phi_{k,z}]\} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

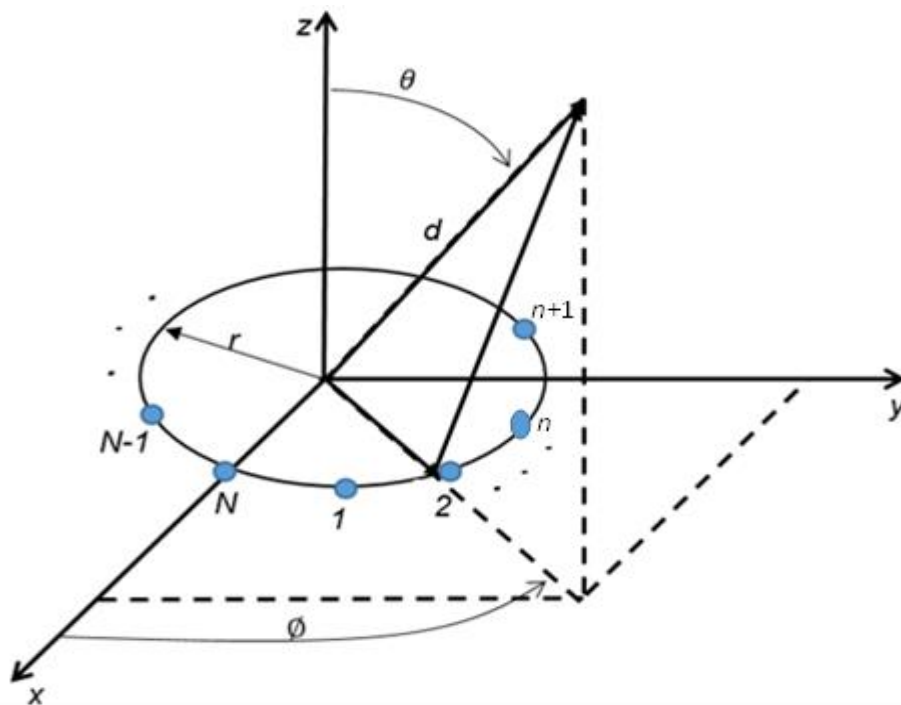


- **Arreglo Circular Uniforme (UCA).**- Un arreglo circular es un tipo de arreglo que dispone de antenas colocadas en un patrón circular uniforme, es decir, cada elemento de antena están separados por una distancia uniforme. UCA es actualmente de gran interés práctico y se está utilizando en diferentes aplicaciones donde se requiera una cobertura en todas las direcciones (360 grados) entre otros: radiogonometría, navegación aérea, MIMO, radar (Balanis, 2015).

Al igual que los arreglos UPA, UCA permite una mejor recepción y transmisión de señales, ya que pueden enfocar la radiación de la antena en una dirección específica y suprimir la radiación en otras direcciones

**Figura 9**

*Geometría de un arreglo circular*



*Nota.* La figura ilustra un arreglo de antenas circular sobre el eje XY.

Arreglo circular es una geometría donde sus elementos se distribuyen de forma equidistante en un anillo circular de radio  $r$  sobre el plano XY, XZ o YZ.

El vector de dirección de un arreglo circular está definido como (Balanis, 2015):

$$\mathbf{h}(\phi) = [ \exp^{jk\rho\cos(\phi_0)}, \exp^{jk\rho\cos(\phi_0-\phi_s)}, \dots, \exp^{jk\rho\cos(\phi_0-(N-1)\phi_s)} ]^T \quad (2.12)$$

Donde:  $\rho$  es el radio del arreglo circular y  $\phi_0$  es el ángulo de arribo del  $k$ -ésimo elemento del arreglo circular.

$$\mathbf{h}(\phi) = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} 1 \\ \exp\{-i\Phi_{k,y}\} \\ \exp\{-i2\Phi_{k,y}\} \\ \vdots \\ \exp\{-i(N-1)\Phi_{k,y}\} \end{bmatrix}^T \quad (2.13)$$

### Arreglo de antenas no uniforme

Arreglo de antenas no uniforme hace referencia a la disposición de antenas en un espacio que no es constante, dando como resultado una distribución no uniforme, para el presente documento, se hablará de dos tipos de arreglos no uniformes: NULA y NUPA.

- **Arreglo lineal no uniforme (NULA).**- Las antenas están separadas a diferentes intervalos, esta condición tiene una diversidad de beneficios para varias aplicaciones específicas. La no uniformidad de las antenas puede contribuir a manipular el patrón de radiación lo que permite controlar la direccionalidad de las antenas y con esto, obtener una mayor ganancia (Chung, Joo, & Kim, 2020).

Las aplicaciones comunes donde se utilizan arreglos NULA requieren de haces adaptativos, asimismo, en aplicaciones como la implementación de antenas en fachadas de edificios dado a la presencia de ventanas, puertas, entre otros.

- **Arreglo planar no uniforme (NUPA).**- Este tipo de arreglo hace referencia al despliegue de antenas sobre dos ejes (bidimensional) pero con un espaciado entre antenas no uniforme o variable. Al igual que NULA, este arreglo garantiza una manipulación del patrón de radiación y directividad que permita mejorar el desempeño de los sistemas (Guo, et al., 2023).

Las aplicaciones con este tipo de arreglos se encuentran en sistemas radares, redes de comunicaciones inalámbricas, comunicaciones por satélite, entre otros.

## **Canal MIMO**

Canal MIMO hace referencia al canal de comunicaciones utilizado por múltiples antenas tanto en el transmisor como en el receptor, el vector de señal recibida de un

sistema MIMO que emplea  $K$  antenas en el transmisor y  $N$  antenas en recepción, viene dado por (Altamirano D. , 2021):

$$y = Hx + w \quad (2.14)$$

Donde:

- $y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_N]^T$  es la señal recibida por las  $N$  antenas de recepción, el cual tiene una dimensión de  $N \times 1$ .
- $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_k]^T$  es la señal transmitida por las  $k$  antenas transmisoras con una dimensión de  $K \times 1$ .
- $w = [w_1, w_2, w_3, \dots, w_N]^T$  representa al Ruido Gaussiano Blanco Aditivo (AWGN) presente en el canal de comunicación, con dimensión  $N \times 1$
- $H$  es el canal de comunicaciones MIMO de dimensión  $N \times K$ , cada elemento de la matriz  $H$  representa la ganancia de la señal transmitida desde la  $k$ -ésima antena transmisora a la  $n$ -ésima antena receptora expresado por:

$$H = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,K} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \dots & h_{2,K} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ h_{N,1} & h_{N,2} & \dots & h_{N,K} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

De igual forma, cada columna de la matriz  $H$  representa el canal de recepción desde una antena transmisora, es decir, la matriz  $H$  en el canal MIMO, representa una colección de canales SISO.

## Arreglos de gran apertura

Arreglos de gran apertura hace referencia al uso de M-MIMO en el rango de las decenas a centenas elementos de antenas tanto en el transmisor como en el receptor logrando un mejor desempeño del sistema en términos de alcance, velocidad y capacidad de usuarios conectados simultáneamente, los mismos que en la actualidad son utilizadas por grandes empresas como Ericsson, Apple, Cisco, entre otros.

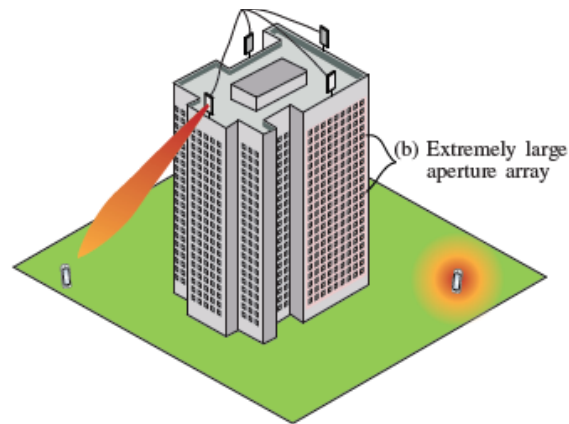
Por citar, los conjuntos de antenas que se despliegan oscilan entre arreglos de 64 antenas (8x8) en bandas bajo los 6 GHz, garantizando una multiplexación espacial en áreas amplias (Björnson & Marzetta, 2019).

Uno de los inconvenientes presentes en los sistemas M-MIMO, es la cantidad de antenas que deben ser instalados en edificios y torres de comunicaciones. Estudios realizados en (Björnson & Marzetta, 2019) muestran arreglos de 64 antenas distribuidos en 8 antenas por fila, cuya separación es de aproximadamente 7,42 centímetros por antena, por tanto, para implementar cientos de antenas y con esto, aumentar la eficiencia espectral, es necesario contar con nuevas estrategias de despliegue de antena que permita explotar toda la infraestructura y en todos sus componentes a los sistemas M-MIMO

Los arreglos de gran apertura como parte del estudio de M-MIMO, hace referencia al desafío de utilizar cientos o miles de antenas para brindar servicios de comunicaciones a múltiples usuarios. Además, se suma la optimización del reducido espacio físico destinado para la implementación de las antenas mediante la distribución sobre áreas más grandes como las paredes de las construcciones o edificios existentes (Björnson & Marzetta, 2019).

## Figura 10

### Arreglos de gran apertura



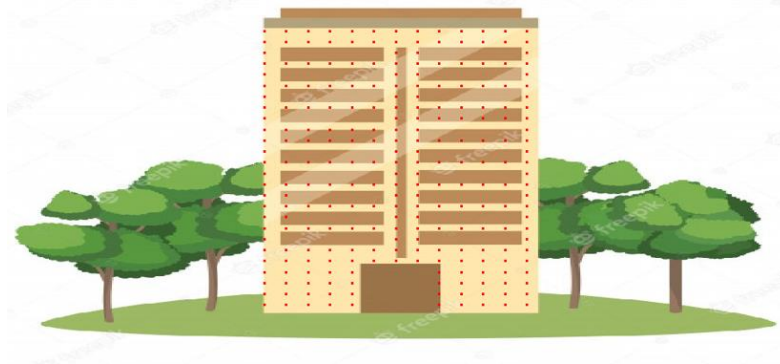
*Nota.* La figura ejemplifica una aplicación de arreglos de gran apertura mediante la implementación de antenas sobre las fachadas de edificios. Tomado de (Björnson & Marzetta, 2019).

### Extremely Large Aperture Arrays (ELAA)

Arreglos de Apertura Extremadamente Grande (ELAA por sus siglas en inglés), es una tecnología implementada que consiste en el despliegue de cientos o miles de antenas, aprovechando las áreas de una edificación donde se desplegarán las antenas es decir, ELAA se implementa sobre una gran área, pudiendo ser, un arreglo planar uniforme o no uniforme.

**Figura 11**

*ELAA con un número elevado de antenas*



*Nota.* La figura ejemplifica la tecnología ELAA sobre la fachada de un edificio.

ELAA está definido como la configuración de cientos o miles de antenas en la estación base espacialmente distribuidos que, de manera conjunta, brindan comunicación a muchos usuarios, considerando dos parámetros importantes como la ganancia del canal y el ángulo de arribo (Björnson & Marzetta, 2019).

ELAA se ha convertido en una alternativa para mantener la comunicación a varios usuarios tanto en el campo cercano como en el campo lejano, reduciendo significativamente las interferencias entre usuarios, pérdida de propagación y aumento de la eficiencia espectral y tasas de transmisión alta por el alto grado de multiplexación espacial (Feng, 2023).

Es importante manifestar que este sistema tiene grandes oportunidades para comunicaciones de banda ancha, como desafíos, este último por muchos factores como, por ejemplo: la macrodiversidad contra el desvanecimiento a pequeña escala,

sombreado a gran escala, degradación en el desempeño del sistema, entre otros (Björnson & Marzetta, 2019).

Además, se considera la gran resolución espacial que hará que los canales de usuario sean casi ortogonales, lo que se conoce como propagación favorable, garantizando que las antenas trabajen coherentemente con canales ortogonales entre sí.

### **Factor de reducción de interferencia (IRF)**

La interferencia es definida por el reglamento de radiocomunicaciones de la IUT como la acción o efecto de una energía no deseada que se manifiesta en un sistema de radiocomunicaciones como elemento que degrada la calidad, falseamiento o pérdida de la información original (ITU, 2020).

Un aspecto determinista en la implementación de sistemas M-MIMO es la evaluación de la interferencia entre usuarios UT dada a la cercanía de las antenas, la cual es una medida que permite mitigar la interferencia entre los diferentes transmisores y receptores. Al tener un gran número de antenas en los sistemas M-MIMO, permite enfocar la energía en la dirección deseada, reduciendo la interferencia en las direcciones no deseadas, ante lo cual, una de las consideraciones importantes para estos sistemas es que los vectores de canal entre la estación base BS y los terminales de usuarios UT deben ser casi ortogonales (Altamirano D. , 2021), lo que conlleva a crear una condición de propagación que garantice un desempeño óptimo conocida como propagación favorable. Cuanto mayor sea el IRF, menor será la interferencia en las



direcciones no deseadas, mejor será el desempeño del sistema en relación a velocidad de transmisión y capacidad del sistema; y, antenas más eficientes y directivas.

Es conocido que la propagación favorable es una condición intrínseca de los sistemas M-MIMO que refiere a la condición del canal por el cual las señales transmitidas experimentan menor atenuación e interferencia de lo esperado. Describe una situación en la que el entorno de propagación de las ondas de radio es óptimo y adecuado para lograr un alto grado de ganancia, dando como resultado una mejor calidad de la señal y una mayor eficiencia espectral, esta condición ocurre cuando existe un gran número de antenas en la transmisión y las antenas están pocas espaciadas entre ellas, conllevando a la explotación de la propagación por múltiples trayectos de forma constructiva, dando como resultado una señal más fuerte en el lado del receptor (Wu, Beaulieu, & Liu, 2017).

En M-MIMO la propagación es favorable en la condición que, al incrementar el número de antenas receptoras, la ortogonalidad mutua aumenta, debido a que se puede aprovechar de mejor manera las propiedades de propagación de ondas en el medio, lo que lleva a una mayor eficiencia espectral. En el escenario práctico y real, se dice que los usuarios son prácticamente ortogonales, cuando la media tiende a cero y la varianza es mucho menor que uno (Ngo, Larsson, & Marzetta, 2014).

Es por tanto que la propagación favorable tiene el efecto de reducir la interferencia entre usuarios lo que permite evaluar el factor de reducción de interferencia (IRF) (Marzetta & Yang., 2016). En tal virtud, se deduce que, al aumentar el número de antenas, el haz principal se torna más directivo y los lóbulos secundarios más pequeños llegando incluso a hacer mínimos, conllevando a una interferencia

mínima entre usuarios. Asimismo, la propagación favorable tiene el efecto de reducir la interferencia entre usuarios la cual puede ser cuantificado por el Factor de Reducción de Interferencia (IRF, por sus siglas en inglés) así como también, puede ser utilizado para optimizar el diseño del sistema M-MIMO (Kiomi Teshima & De Almeida, 2000).

EL IRF se define por el valor cuadrático medio del patrón de radiación determinado de la siguiente manera:

$$Y = E\{R^2\} \quad (2.16)$$

Para lo cual, el patrón de radiación  $R$  para el campo lejano está dado por (Altamirano & De Almeida, 2016):

$$R = \frac{|\mathbf{h}_j^H \mathbf{h}_k|}{N} \quad (2.17)$$

Donde:  $\mathbf{h}_k$  es el vector del canal (vector de dirección) para k-ésima antena receptora y  $\mathbf{h}_j$  es el vector de dirección para j-ésima antena transmisora,  $N$  es el número total de antenas en el arreglo. El patrón de radiación es obtenido mediante el producto de los vectores de canal  $\mathbf{h}_k$  y  $\mathbf{h}_j$ , la cual, mide la correlación entre los canales de transmisión y recepción, para luego, tomar el valor absoluto para eliminar el efecto de los cambios de fase entre los canales.

El patrón de radiación en el campo cercano se define como (Altamirano D. , 2021):

$$R = \sin(\theta_k) \sin(\theta_j) \frac{|\mathbf{h}_j^H \mathbf{h}_k|}{N} \quad (2.18)$$

Donde:  $\mathbf{h}_k$  es el vector de direcciones (steering vector) y  $\mathbf{h}_j^H$  es el vector de posición de UT y  $N$  es el número de antenas.  $\sin(\theta_k)$  y  $\sin(\theta_j)$  son presentados por el uso de dipolos cortos polarizados verticalmente entre  $(\frac{\pi}{2}, \pi)$ .

Ahora bien, para el campo cercano, el IRF para un arreglo uniforme lineal (ULA) sobre el eje X, está dado por (Altamirano D. , 2021):

$$\begin{aligned} Y_x &= \frac{4}{9N_x} \\ &+ \frac{2}{N_x^2} \sum_{m=1}^{N_x-1} (N_x - m) \frac{1}{(2\pi\Delta_x m)^6} \{(2\pi\Delta_x m) \cos(2\pi\Delta_x m) + [(2\pi\Delta_x m)^2 - 1] \sin(2\pi\Delta_x m)\}^2 \end{aligned} \quad (2.19)$$

Y, para el campo cercano, el IRF para un arreglo uniforme lineal (ULA) sobre el eje Z, está dado por (Altamirano D. , 2021):

$$\begin{aligned} Y_z &= \frac{4}{9N_z} \\ &+ \frac{2}{N_z^2} \sum_{m=1}^{N_z-1} (N_z - m) \frac{1}{(2\pi\Delta_z m)^6} \{8 \\ &+ 8(2\pi\Delta_z m)^2 + (2\pi\Delta_z m)^4 - [8 + 4(2\pi\Delta_z m)^2][\cos(2\pi\Delta_z m) + (2\pi\Delta_z m) \sin(2\pi\Delta_z m)]\} \end{aligned}$$

(2.20)

En el campo lejano, el IRF para un arreglo uniforme lineal sobre el eje x puede ser obtenido por:

$$Y_x = \frac{1}{N_x} + \frac{2}{N_x^2} \sum_{m=1}^{N_x-1} (N_x - m) J_0^2(2\pi\Delta_x m) \quad (2.21)$$

Donde:  $N_x$  es el número de antenas en el arreglo horizontal,  $\Delta_x$  es la separación normalizada entre antenas  $J_0$  es la función de Bessel en el orden cero de primer tipo.

En el campo lejano (escenario 2-D) el IRF para un arreglo planar (UPA) sobre el plano XY se define como (Altamirano D. , 2021):

$$\begin{aligned} Y_{xy} &= \frac{1}{N_x N_y} + \frac{2N_y}{N_x^2 N_y^2} \sum_{m=1}^{N_x-1} (N_x - m) J_0^2(2\pi\Delta_x m) + \frac{2N_x}{N_x^2 N_y^2} \sum_{n=1}^{N_y-1} (N_y - n) J_0^2(2\pi\Delta_y n) \\ &+ \frac{4}{N_x^2 N_y^2} \sum_{m=1}^{N_x-1} \sum_{n=1}^{N_y-1} (N_x - m)(N_y - n) J_0 \left( 2\pi\Delta_x \sqrt{m^2 + n^2} \right) J_0 \left( 2\pi\Delta_y \sqrt{m^2 + n^2} \right) \end{aligned} \quad (2.22)$$

En el campo cercano (escenario 3-D) el IRF para un arreglo planar (UPA) sobre el plano XY se define como (Altamirano D. , 2021):

$$\begin{aligned}
& Y_{xy} \\
&= \frac{4}{9N_x N_y} + \frac{2N_y}{N_x^2 N_y^2} \sum_{m=1}^{N_x-1} \frac{(N_x - m)}{(2\pi\Delta_x m)^6} \{ (2\pi\Delta_x m) \cos(2\pi\Delta_x m) + [(2\pi\Delta_x m)^2 - 1] \sin(2\pi\Delta_x m) \}^2 \\
&+ \frac{2N_x}{N_x^2 N_y^2} \sum_{n=1}^{N_y-1} \frac{(N_y - n)}{(2\pi\Delta_y n)^6} \{ (2\pi\Delta_y n) \cos(2\pi\Delta_y n) + [(2\pi\Delta_y n)^2 - 1] \sin(2\pi\Delta_y n) \}^2 \\
&+ \frac{4}{N_x^2 N_y^2} \sum_{m=1}^{N_x-1} \sum_{n=1}^{N_y-1} \frac{(N_x - m)(N_y - n)}{\left[ \sqrt{(2\pi\Delta_x m)^2 + (2\pi\Delta_y n)^2} \right]^6} x \left\{ \sqrt{(2\pi\Delta_x m)^2 + (2\pi\Delta_y n)^2} \cos \left[ \sqrt{(2\pi\Delta_x m)^2 + (2\pi\Delta_y n)^2} \right] \right. \\
&+ \left. \left[ (2\pi\Delta_x m)^2 + (2\pi\Delta_y n)^2 - 1 \right] \sin \left[ \sqrt{(2\pi\Delta_x m)^2 + (2\pi\Delta_y n)^2} \right] \right\}^2
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Y, el IRF para un arreglo planar (UPA) sobre el plano YZ, se define como

(Altamirano D. , 2021):

$$\begin{aligned}
& Y_{yz} \\
&= \frac{4}{9N_y N_z} + \frac{2N_z}{N_y^2 N_z^2} \sum_{m=1}^{N_y-1} \frac{(N_y - m)}{(2\pi\Delta_y m)^6} \{ (2\pi\Delta_y m) \cos(2\pi\Delta_y m) + [(2\pi\Delta_y m)^2 - 1] \sin(2\pi\Delta_y m) \}^2 \\
&+ \frac{2N_y}{N_y^2 N_z^2} \sum_{l=1}^{N_z-1} \frac{(N_z - l)}{(2\pi\Delta_z l)^6} \{ 8 + 8(2\pi\Delta_z l)^2 + (2\pi\Delta_z l)^4 \\
&- [8 + 4(2\pi\Delta_z l)^2] [\cos(2\pi\Delta_z l) + (2\pi\Delta_z l) \sin(2\pi\Delta_z l)] \} \\
&+ \frac{4}{N_y^2 N_z^2} \sum_{m=1}^{N_y-1} \sum_{l=1}^{N_z-1} (N_y - m)(N_z \\
&- l) \int_{\pi/2}^{\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} J_0(2\pi\Delta_y m \sin \theta_k) J_0(2\pi\Delta_y m \sin \theta_j) x \cos[(2\pi\Delta_z l)(\cos \theta_k \\
&- \cos \theta_j)] \sin^3(\theta_k) \sin^3(\theta_j) d\theta_k d\theta_j
\end{aligned} \tag{2.24}$$

El IRF para un arreglo circular está dado por:

$$\Upsilon = \frac{E\{R^2\}}{R_{max}^2} \quad (2.25)$$

El IRF con N antenas, está definido por:

$$\Upsilon = \frac{1}{N^2} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} J_0^2(2\pi d \sin \theta (n - m))$$

$$\Upsilon = \frac{1}{N^2} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} J_0^2\left(2\pi d \sqrt{\sin^2 \theta_m + \sin^2 \theta_n}\right) \quad (2.26)$$

Donde:  $d$  es la distancia entre antenas,  $\theta_m$  y  $\theta_n$  corresponden al ángulo de elevación y de arribo de los elementos de antenas  $m$  y  $n$  respectivamente,  $J_0$  es la función de Bessel en el orden cero de primer tipo.

### **M-MIMO Distribuido**

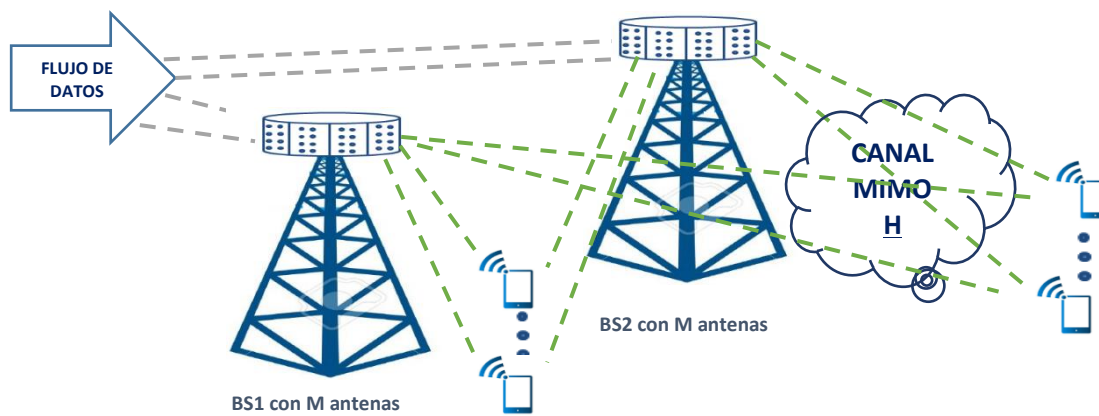
M-MIMO distribuido es una tecnología de comunicaciones inalámbricas que usa un gran número de antenas que se encuentran distribuidas en múltiples estaciones base para transmitir y recibir información de múltiples usuarios de forma simultánea. Esta tecnología es prometedora en especial en áreas densamente pobladas donde hay una gran cantidad de usuarios que demandan de una gran cantidad de datos y ancho de banda (Guevara, Chen, & Pollin, 2018).

M-MIMO hace referencia al diseño de un gran número de antenas que se encuentran implementadas en la estación base lo que hace que mejore la capacidad del

sistema, no obstante, a diferencia de M-MIMO, M-MIMO distribuido las antenas se distribuyen en varias estaciones base en lugar de uno, obteniendo beneficios como:

- Mejora significativamente la eficiencia espectral.
- Incrementa el área de cobertura para usuarios más lejanos
- Mejora la calidad de la señal.
- Reduce la interferencia
- Disminuye el efecto shadowing

La principal ventaja de mimo distribuido es que proporciona un sistema de antenas distribuidas para una mejor cobertura, capacidad y confiabilidad en las redes inalámbricas. También, proporciona una forma de mitigar la interferencia y el desvanecimiento de múltiples trayectos, mediante la distribución espacial de antenas y la combinación de señales (Frisanco, Tafertshofer, Lurin, & Ang, 2008).

**Figura 12***Modelo de M-MIMO Distribuido*

*Nota.* La figura representa el sistema M-MIMO distribuido mediante la existencia de varias estaciones bases (BS) distribuidos para varios equipos de usuarios (UE).



## Capítulo III

### Simulación y resultados

A continuación, se presenta la simulación y el análisis de los datos los cuales permiten alcanzar los objetivos planteados para el presente trabajo.

Los resultados obtenidos se dividen en 3 ejes acorde a los objetivos: El primer eje son las capacidades y limitaciones de los arreglos geométricos ULA, UPA y UCA al considerarse como arreglos de gran apertura, el segundo eje son las soluciones de propagación favorable para sistemas M-MIMO; y, el tercer eje es la propuesta de arreglos de gran apertura en función al Factor de Reducción de Interferencia IRF en entornos reales.

### Análisis de los arreglos de gran apertura ULA, UPA y UCA

Una vez que los conceptos técnicos y desarrollo de la tecnología M-MIMO fue presentado en el capítulo anterior, se procede a realizar las simulaciones que ayuden a entender las características de la tecnología con arreglos ULA, UPA y UCA de gran apertura.

Para esto, se realiza el análisis del patrón de radiación de los arreglos propuestos, el mismo que permitirá evaluar su directividad, ancho de haz, lóbulos secundarios generados, entre otros. La directividad representada en el patrón de radiación y característica propia requerida en los sistemas de M-MIMO, es una medida que concentra la energía en una dirección específica. Un arreglo de antenas ULA, UPA

o UCA, puede tener una alta directividad en la dirección de su lóbulo principal, lo que significa que, puede ser muy efectivo para recibir o transmitir señales en la dirección deseada.

El ancho de haz representado en el patrón de radiación generado, corresponde a la cantidad de espacio angular entre los puntos de mitad de potencia en el que el arreglo de antenas puede recibir o transmitir señales con una ganancia razonable (Monachesi, Frenzel, & Carrasco, 2011). Un ancho de haz estrecho para M-MIMO puede ser deseable, ya que permite una mayor concentración de la energía en la dirección deseada. Los lóbulos secundarios corresponden a regiones de alta ganancia en direcciones no deseadas y pueden ser una limitación en la implementación arreglos de antenas para rechazar señales interferentes o recibir señales de direcciones específicas, no obstante, en ciertas situaciones y escenarios específicas, los lóbulos secundarios pueden ser útiles para aumentar la eficiencia espectral de los sistemas M-MIMO (Chen, Zhang, & Li, 2018).

Como fue descrito en el Capítulo 1, las simulaciones obedecen al resultado obtenido con la herramienta de Matlab® en la versión R2019a y Wolfram Mathematica.

### ***Arreglos de Gran Apertura ULA***

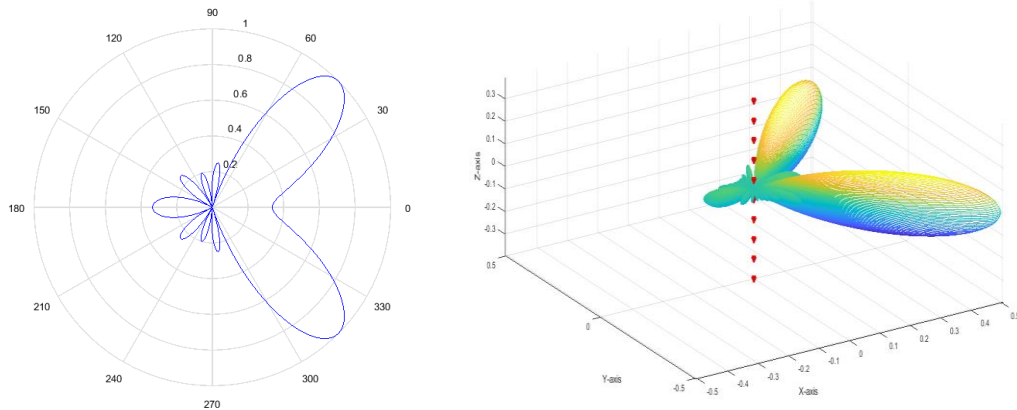
A continuación, los arreglos de gran apertura simulados corresponden a un arreglo lineal con distancia uniforme. Como objetivo en este punto se tiene el visualizar el patrón de radiación y su comportamiento modificando el número de antenas implementadas en el eje X, Y y Z.

La distancia entre antenas seleccionada debido a su capacidad de mitigar las interferencias y mejorar la eficiencia espectral es  $d = \frac{\lambda}{2}$  en todos los ejes simulados (eje X, Y y Z) además, esta separación ha demostrado que evita el apareamiento de un mayor número de lóbulos en el diagrama de radiación y evita interferencias entre estos elementos. Para generar el patrón de radiación, el ángulo de arribo o de llegada (*direction of arrival*) de la señal que permite determinar la dirección desde la cual llega la señal incidente con respecto al eje de referencia, fue establecida inicialmente en  $\emptyset = \frac{\pi}{4}$ , otro valor varia significativamente la respuesta del arreglo de antenas; y, el tamaño del arreglo de antenas elegido es de  $N = 10$ ,  $N = 50$ ,  $N = 100$  y  $N = 200$  antenas, las mismas que puede ser escalable a un número mayor acorde a la teoría de M-MIMO con arreglos de gran apertura.

En las Fig. 13 -16, se visualiza el patrón de radiación tanto en 2-D y 3D, en este último, también se representa visualmente el despliegue de antenas (puntos de color rojo) en los diferentes ejes.

**Figura 13**

*Diagrama de radiación ULA N=10*



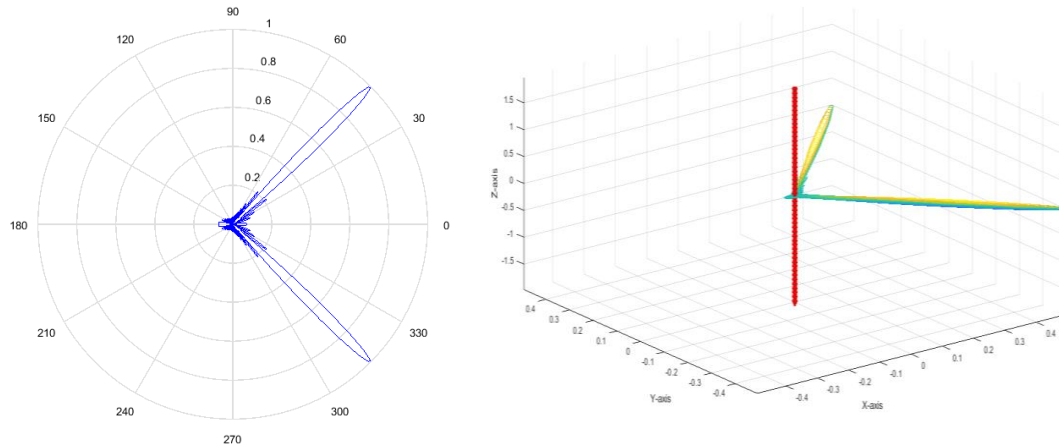
*Nota.* La figura ilustra el diagrama de radiación de un ULA en 2D y 3D.

En la Fig. 13, se puede observar el diagrama de radiación en 2-D y 3-D de  $N=10$  antenas implementadas en el eje Z, con un patrón directivo hacia el ángulo de arriba seleccionado ( $\vartheta = \frac{\pi}{4}$ ), observando un ancho de haz no tan estrecho. Se puede observar que el lóbulo de radiación del arreglo lineal se refleja en  $\vartheta = \frac{7\pi}{4}$  puesto que el patrón de radiación es simétrico con respecto al eje de simetría que pasa por el lóbulo principal y perpendicular al arreglo como se visualiza en la Fig. 13 tridimensional. El arreglo también tiene lóbulos secundarios con menor directividad que el lóbulo principal.

En la Fig. 14, con  $N=50$  antenas implementadas en el eje Z, se puede apreciar un diagrama de radiación más directivo hacia el ángulo de arriba seleccionado que el arreglo lineal de  $N=10$  antenas, esto, debido a que la directividad del arreglo lineal aumenta a medida que el número de antenas se incrementa. Note que los lóbulos secundarios son mínimos y tienen una menor directividad que el lóbulo principal.

## Figura 14

Diagrama de radiación ULA  $N=50$

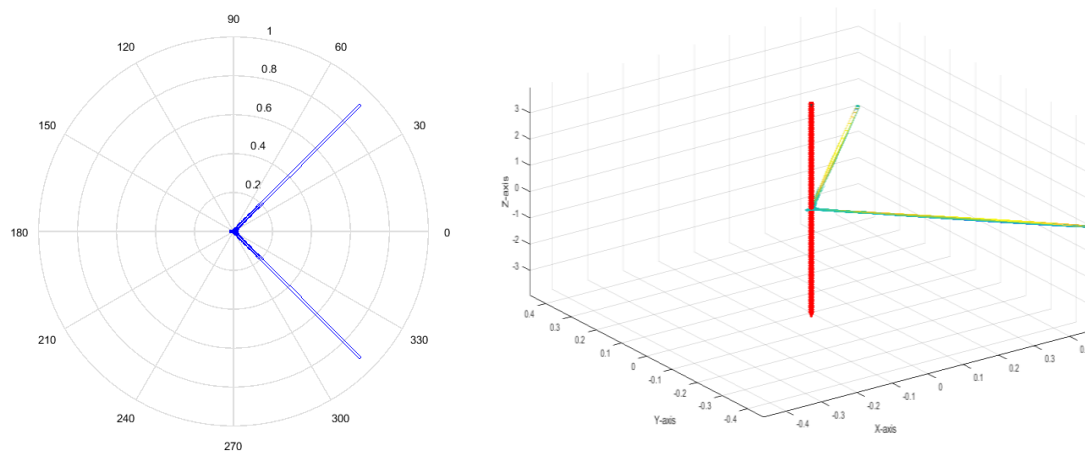


*Nota.* La figura ilustra el diagrama de radiación de un ULA en 2D y 3D.

En la Fig. 15, se observa un haz de radiación mucho más estrecho y con una mayor directividad al ángulo de arriba seleccionado que el arreglo lineal de  $N=100$  antenas. Los lóbulos secundarios son aún más pequeños que los casos anteriores y están aún más alejados del lóbulo principal.

**Figura 15**

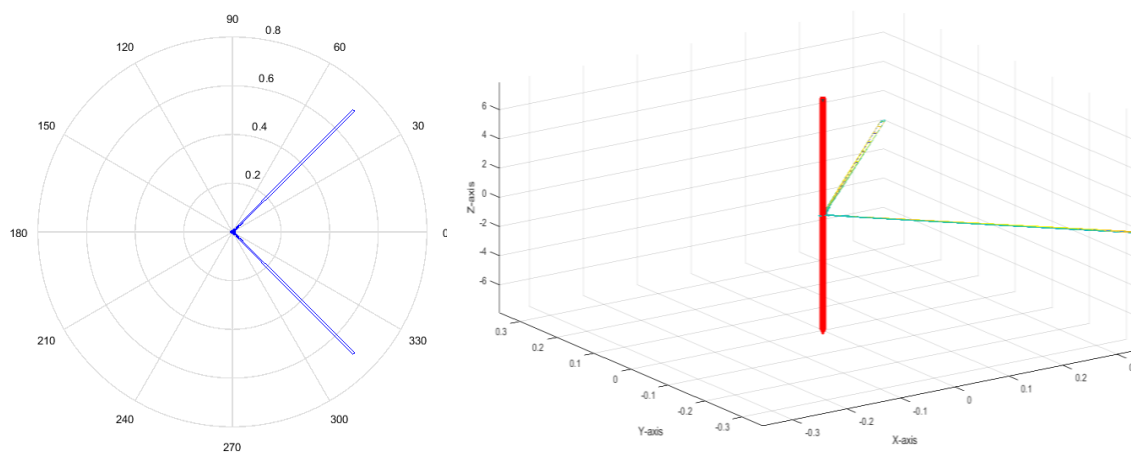
*Diagrama de radiación ULA N=100*



*Nota.* La figura ilustra el diagrama de radiación de un ULA en 2D y 3D.

**Figura 16**

*Diagrama de radiación ULA N=200*



*Nota.* La figura ilustra el diagrama de radiación de un ULA en 2D y 3D.

Finalmente, en la Fig. 16, se observa un haz de radiación con mayor directividad y resolución angular que en los escenarios anteriores. En resumen, el lóbulo principal

seguirá siendo estrecho a medida que aumenta el número de antenas, esto debido a que se tiene mayor libertad para ajustar el ángulo de arribo y de elevación para enfocar el haz a una dirección deseada y, además, por la interacción constructivas y destructiva de las ondas la cual contribuyen a la formación de haces más directivos y estrechos, lo que resulta a una mejora calidad de la señal y a una mayor eficiencia espectral.

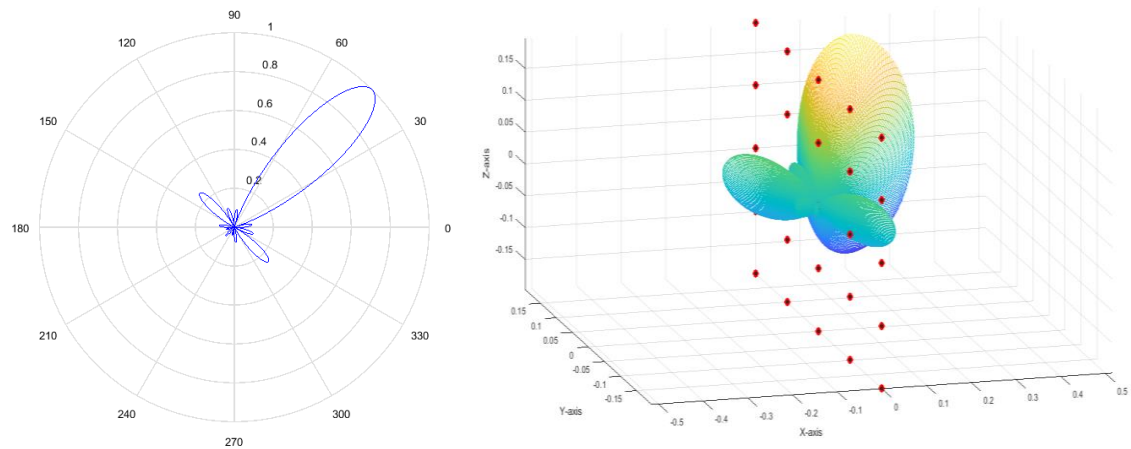
### ***Arreglos de Gran Apertura UPA***

El análisis del patrón de radiación de arreglos de antenas planares, se lo realizó en el plano YZ puesto que, en entornos reales, esta orientación maximiza el desempeño, cobertura y directividad. Estos arreglos planares también pueden ser colocados en el plano XZ la cual dependerá de la orientación y de la dirección deseada de cobertura.

En las Fig. 17 -19, se visualiza el patrón de radiación tanto en 2-D y 3D, a una separación entre antenas de  $d = \frac{\lambda}{2}$  en todos los ejes simulados (eje X, Y y Z) y un ángulo de arribo de  $\theta = \frac{\pi}{4}$ . En la gráfica tridimensional, se representa visualmente el despliegue de antenas (puntos de color rojo) en el plano.

## Figura 17

Diagrama de radiación UPA N=5X5 (25 antenas)



*Nota.* La figura ilustra el diagrama de radiación de un UPA en 2D y 3D.

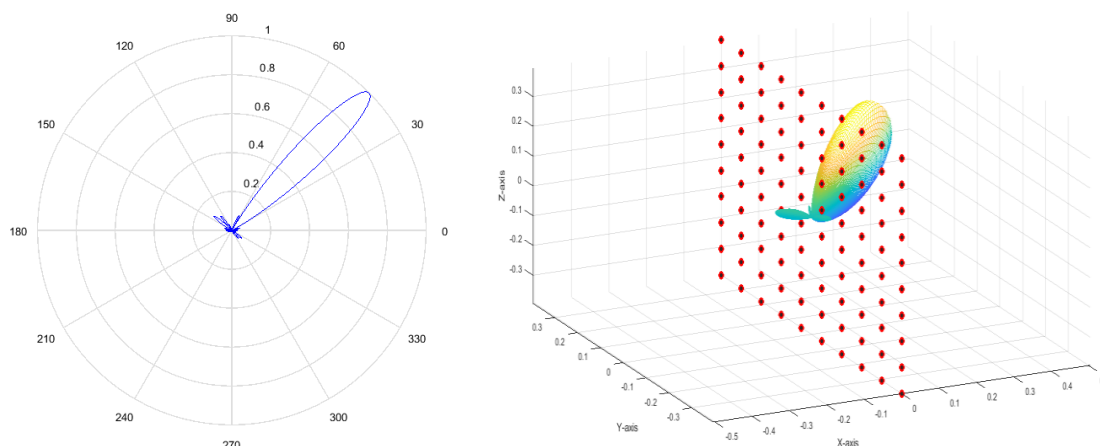
En la Fig. 17, se puede apreciar un arreglo planar N=5X5, es decir, 25 antenas desplegadas sobre el plano YZ, elementos con un diagrama de radiación directivo con un haz no tan estrecho con lóbulos laterales.

En comparación con el arreglo lineal simulado anteriormente donde el lóbulo principal se refleja en dos direcciones simétricas,  $\phi = \frac{\pi}{4}$  y  $\phi = \frac{7\pi}{4}$ ; en el arreglo planar, no se tiene la misma simetría axial, por lo que no hay un eje que permita la reflexión del lóbulo principal.



## Figura 18

Diagrama de radiación UPA  $N=10 \times 10$  (100 antenas)



*Nota.* La figura ilustra el diagrama de radiación de un UPA en 2D y 3D.

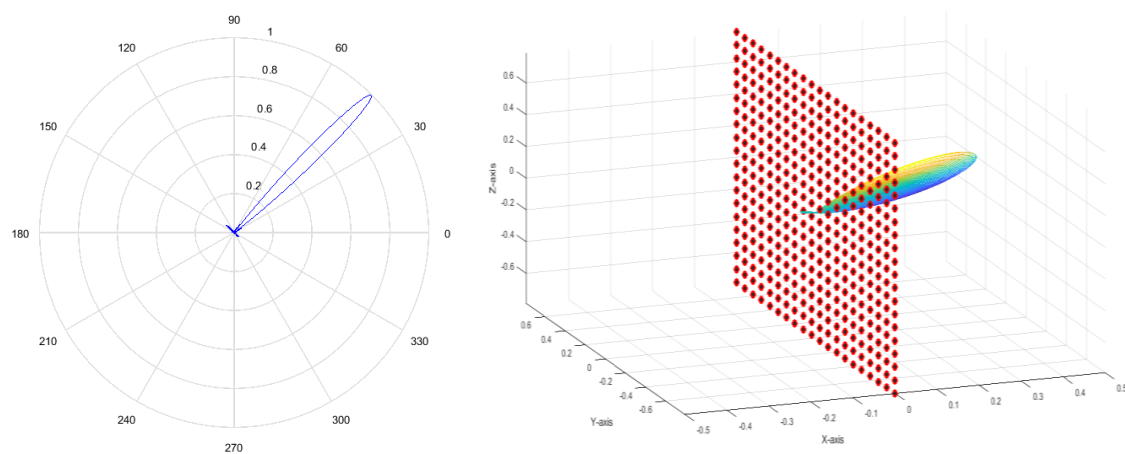
En la Fig. 18, se tiene un arreglo planar de  $N=10 \times 10$  antenas, es decir, 100 antenas desplegadas sobre el plano YZ. Se puede apreciar que, a medida que aumenta el número de antenas de  $N=5 \times 5$  a  $N=10 \times 10$ , el diagrama de radiación de vuelve más directivo y estrecho por las mismas razones especificadas en la simulación del arreglo planar, es decir, por la interacción constructiva y destructiva presente en el sistema por el creciente número de antenas.

Por otro lado, la distribución de 100 antenas de forma lineal y planar ( $10 \times 10$ ) de la Fig. 15 y Fig. 18 respectivamente, da como resultado que, en un arreglo lineal tiene una dirección de máxima ganancia que hace una formación de haz más directivo y estrecho que un arreglo planar de la misma cantidad de antenas, esta situación se debe a que las ondas de radio emitidas por las antenas en un arreglo lineal se combinan de manera más eficiente a lo largo de un eje específico o una sola dimensión, lo que

resulta en una mayor directividad en esa dirección. En un arreglo planar, las antenas están dispuestas en dos dimensiones (en este caso, plano YZ), lo que resulta en un diagrama de radiación más amplio y menos directivo, no obstante, un arreglo planar puede proporcionar una ganancia global más alta debido a la longitud total utilizada en el arreglo. La ventaja del arreglo planar es que no genera el lóbulo reflejado lo que permite concentrar el haz apenas en la dirección deseada.

**Figura 19**

*Diagrama de radiación UPA N=20X20 (400 antenas)*



*Nota.* La figura ilustra el diagrama de radiación de un UPA en 2D y 3D.

En la Fig. 19, se despliega un arreglo planar de  $N=20 \times 20$  antenas, es decir, 400 antenas desplegadas sobre el plano YZ. De igual forma, se observa que a medida que aumenta el número de antenas de la matriz, el lóbulo principal se vuelve más directivo y estrecho.

### **Arreglos de Gran Apertura UCA**

El análisis del patrón de radiación de arreglos de antena circular, se realizó sobre el plano YZ los cuales están dispuestas en círculo equiespaciadas de forma uniforme, concediendo un mayor apuntamiento y directividad hacia el UT objetivo.

En la Fig. 20 – 22, se visualiza el patrón de radiación tanto en 2-D como 3-D. La separación entre antenas es de  $d = \frac{\lambda}{2}$  con un ángulo de arribo de  $\phi = \frac{\pi}{4}$ . Asimismo, en la gráfica en 3-D se representa visualmente el despliegue de las antenas sobre el plano YZ.

A medida que aumenta el número de antenas con una separación entre antenas de  $d = \frac{\lambda}{2}$  definida, el radio del círculo aumentará de acuerdo a la siguiente relación:

$$\Delta = r \sqrt{(1 - \cos\alpha)^2 + (\sin\alpha)^2}$$

$$\Delta = r \sqrt{1 - 2\cos\alpha + \cos^2\alpha + \sin^2\alpha}$$

$$\Delta = r \sqrt{1 - 2\cos\alpha + 1}$$

$$\Delta = r\sqrt{2}\sqrt{1 - \cos\alpha}$$

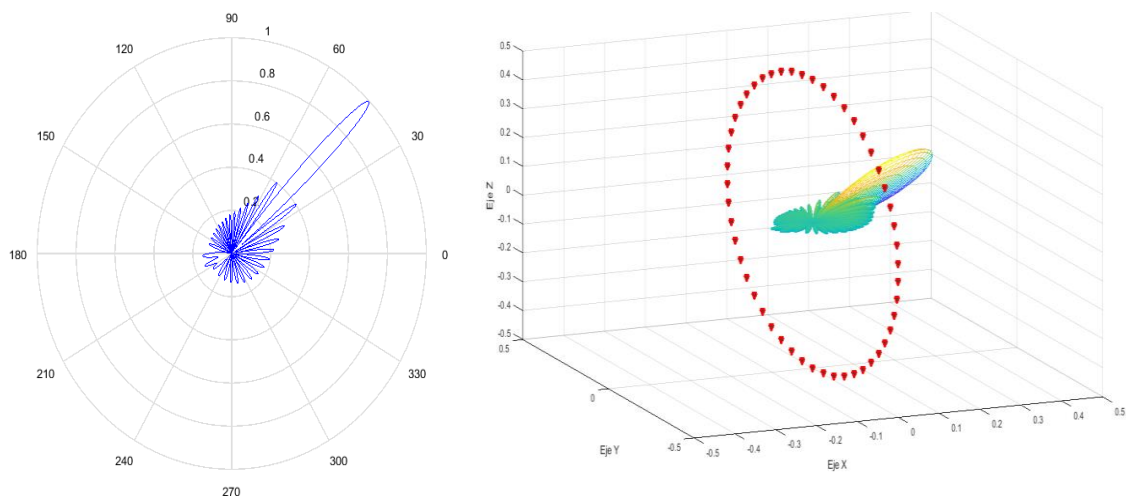
$$r = \frac{\Delta}{\sqrt{2}\sqrt{1 - \cos\alpha}} \quad (3,1)$$

Donde,  $\Delta$  es la separación normalizada entre antenas expresada como  $\Delta = \frac{d}{\lambda}$ ;  $\alpha$  representa el ángulo que existe entre dos antenas definida como  $\alpha = \frac{2\pi}{N}$ ,  $N$  es el número de antenas.

En la Fig. 20, se aprecia un arreglo circular con  $N=50$  antenas implementadas sobre el plano bidimensional YZ hacia un apuntamiento de  $\theta = \frac{\pi}{4}$ . En la gráfica se puede apreciar un patrón de radiación directivo hacia el ángulo de arriba deseado y amplio debido a la combinación de ondas en múltiples direcciones. Se visualiza también que, el apareamiento de pequeños lóbulos laterales en varias direcciones.

**Figura 20**

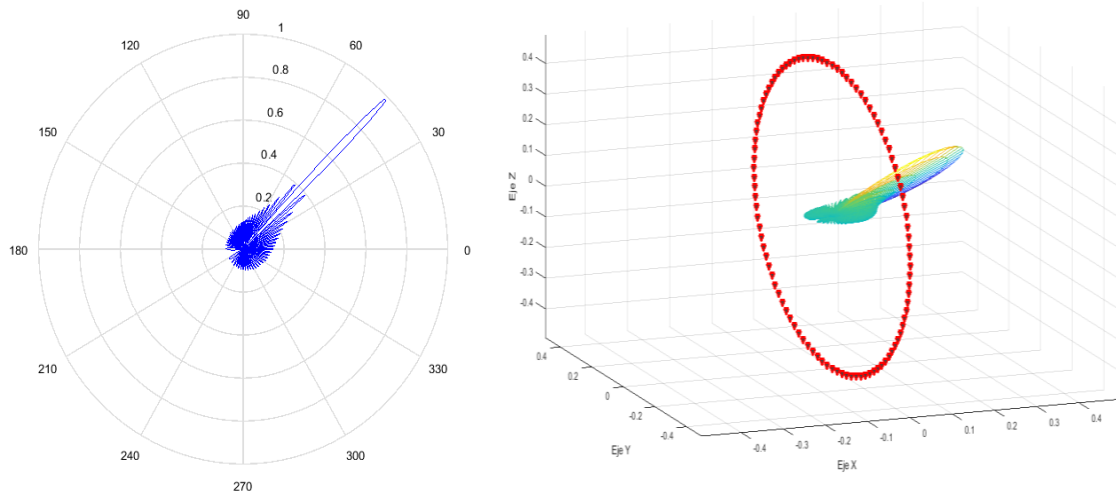
*Diagrama de radiación UCA N= 50*



*Nota.* La figura ilustra el diagrama de radiación de un UCA en 2D y 3D.

## Figura 21

Diagrama de radiación UCA  $N= 100$



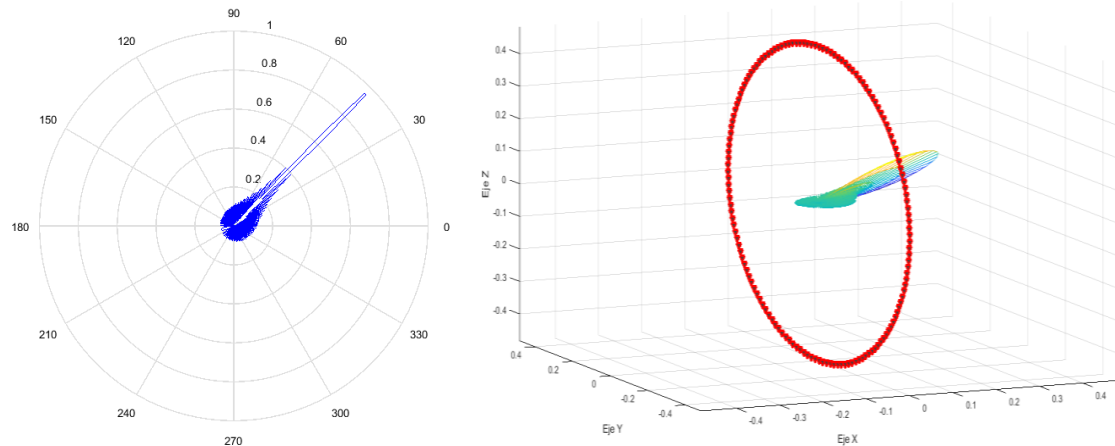
*Nota.* La figura ilustra el diagrama de radiación de un UCA en 2D y 3D.

En la Fig. 21, se tiene un arreglo circular con  $N=100$  antenas distribuidas con una mayor directividad hacia la dirección de arriba deseada y más estrecho que el despliegue de  $N=50$  antenas, esto se debe a la suma constructiva entre cada antena, lo que contribuye a una mayor ganancia.

En la Fig. 21 se aprecia también que, al aumentar el número de antenas, se puede reducir los lóbulos secundarios debido al ángulo de incidencia de las ondas y a la cancelación de las interferencias entre antenas.

**Figura 22**

*Diagrama de radiación UCA N= 150*



*Nota.* La figura ilustra el diagrama de radiación de un UCA en 2D y 3D.

Finalmente, en la Fig. 22 se aprecia el despliegue de  $N=150$  antenas distribuidas uniformemente en un círculo. Algo muy interesante que se puede observar en el arreglo circular es que cuando menor es el orden de las antenas, mayor es el nivel del lóbulo principal, por el contrario, si aumentamos el número de antenas, disminuye el nivel del lóbulo principal, esto puede ser debido al ángulo de incidencia de las ondas la cual es un elemento importante en la formación de lóbulos secundarios los mismos que pueden afectar al desempeño del sistema.

En este contexto, se determina que el arreglo de antenas en línea recta las ondas de radio se combinan hacia una dirección deseada lo que resulta un patrón de radiación más estrecho y con mayor ganancia, no obstante, tiene una desventaja, la cual es la generación de lóbulo reflejado con la misma ganancia que el lóbulo principal, lo que le conlleva a ser menos eficiente que los otros arreglos analizados. Por el contrario, el arreglo planar es menos estrecho que el arreglo lineal y más estrecho que

el arreglo circular con una alta ganancia hacia la dirección deseada con lóbulos laterales atenuados.

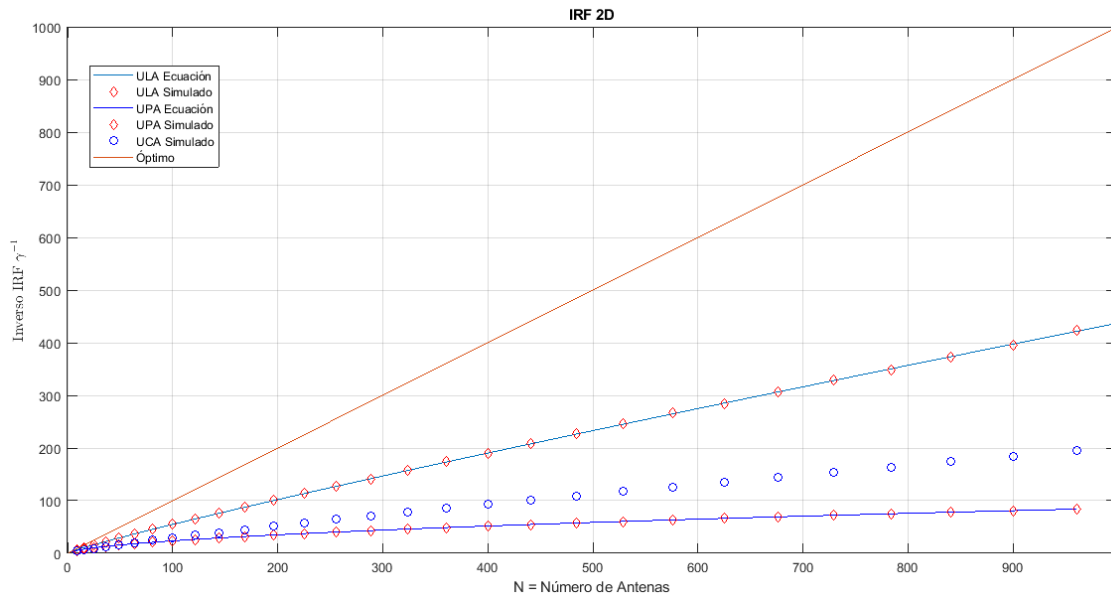
### **Propagación favorable para sistemas de M-MIMO**

Como fue descrito en el capítulo 1.5.- Factor de reducción de interferencia, a medida que aumenta el número de antenas, los vectores de los canales entre las antenas y el UT, se vuelven asintóticamente ortogonales dando como resultado que la interferencia entre usuarios se reduzca de forma considerable (Altamirano D. , 2021), lo que es conocido como propagación favorable.

En este contexto y con el fin de obtener una condición favorable de propagación, se analizará el IRF en los arreglos lineales, planares y circulares mediante una separación entre antenas  $d = \frac{\lambda_c}{2}$  con una frecuencia de portadora de 1,9 GHz en cada arreglo de antenas simuladas, obteniendo los siguientes resultados descrito en la Fig. 23:

Figura 23

IRF con arreglos ULA, UPA, UCA, teórico y simulado



Nota. La figura ilustra el IRF de los arreglos ULA, UPA y UCA, teórico y simulado.

### IRF de arreglos de gran apertura ULA

En la Fig. 23, se aprecia el inverso del Factor de Reducción de Interferencia para un arreglo de gran apertura uniforme lineal en relación al número de antenas de 1 hasta 1000, con una separación entre antenas de  $d = \frac{\lambda_c}{2}$  en un escenario de dos dimensiones.

Para realizar la simulación de ULA representada en la Fig. 23, se utilizó la ecuación teórica descrita en (2.21) la cual es comparada con la ecuación simulada definida por el valor medio del patrón de radiación al cuadrado.



En la Fig. 23, se puede apreciar que, a medida que el número de antenas incrementa, también aumenta el IRF, esto acontece debido a que, con un mayor número de antenas, se puede lograr una mayor directividad como se demostró en el comportamiento del patrón de radiación de las Fig. 13-16 y con esto, una mayor reducción de la interferencia entre usuarios, además con una separación de  $d = \frac{\lambda_c}{2}$  se garantiza que no exista correlación entre antenas.

### ***IRF de arreglos de gran apertura UPA***

En la Fig. 23 se puede apreciar el inverso del Factor de Reducción de Interferencia para un arreglo de gran apertura planar uniforme en relación al número de antenas de 1 a 1000 con la separación entre las antenas de  $d = \frac{\lambda_c}{2}$ .

Para la realización de la simulación, se utilizó la ecuación teórica en (2.22 que, de igual forma, se compara con la ecuación simulada.

En la Fig. 23 se observa que el IRF de arreglos planares tienen similar comportamiento que los arreglos lineales en el sentido que se puede obtener una ganancia en el IRF a medida que se aumenta el número de antenas.

En contraste con el arreglo lineal analizado, se determina que un arreglo lineal reduce significativamente la interferencia a medida que aumenta el número de antenas que el de un arreglo planar debido a la directividad del arreglo lineal el cual fue analizado en las Fig. 13-16. El patrón de radiación en el arreglo lineal concentra más energía hacia una dirección específica lo que significa que es más directivo y estrecho

que el arreglo planar, dado que, este dispersa la energía en un margen de dirección más amplio resultando un IRF menor.

### ***IRF de arreglos de gran apertura UCA***

Finalmente, en la Fig. 23 se visualiza el Factor de Reducción de Interferencia para un arreglo de gran apertura circular uniforme en relación al número de antenas de 1 a 1000 con la separación entre las antenas de  $d = \frac{\lambda_c}{2}$ .

Lo que se muestra en la Fig. 23, es la simulación UCA utilizando la ecuación simulada, dando como resultado una reducción de interferencia mejor que el arreglo planar UPA y bajo del arreglo ULA, determinando que, el arreglo de gran apertura en 2 dimensiones, el arreglo lineal ULA se comporta de mejor manera para reducir la interferencia a medida que incrementa el número de antenas. La complejidad matemática no permitió obtener una expresión cerrada.

### **Propuesta de arreglos de gran apertura en fachadas de edificios**

Para verificar el comportamiento de los arreglos de antenas, se ha trabajado en una simulación de arreglos de apertura extremadamente grandes (Extremely Large Aperture Arrays ELAA) en las fachadas de edificios, semejando a las nuevas tendencias de telecomunicaciones puesto que los espacios físicos en terrazas y torres para la instalación de sistemas de antenas, se tornan reducidos y limitados. A esto se suma, la verificación del comportamiento en un entorno real mediante el análisis de los datos utilizando el banco de prueba M-MIMO de la Universidad KU-Leuven descrito en

(Guevara, Chen, & Pollin, 2018) y (Departamento de Electrónica de KU Leuven, 2019).

La propuesta presenta como primera parte, la distribución de antenas en la cara de un edificio, como, por ejemplo, el edificio central y el coliseo de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, para al final, mediante cálculos descritos en la teoría, obtener el IRF entre usuarios de un sistema M-MIMO. La segunda parte consiste en el análisis del experimento de M-MIMO distribuido realizado por la Universidad KULeuven MaMIMO de Bélgica (Guevara, Chen, & Pollin, 2018) donde se efectuó el análisis respectivo.

### ***Descripción del simulador ELAA para calcular el IRF en fachadas de edificios***

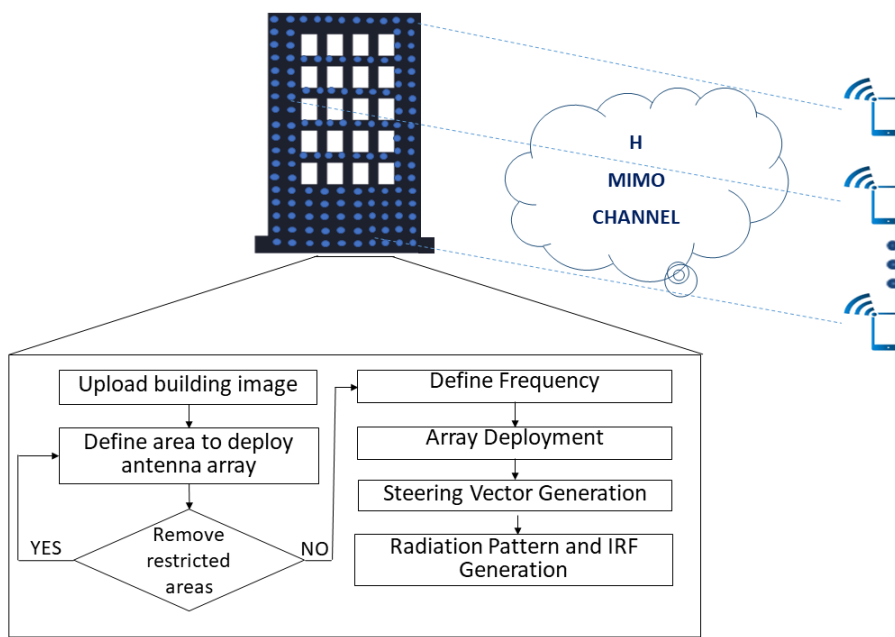
Se propone el desarrollo de un simulador M-MIMO basado en Matlab para diseñar arreglos de apertura extremadamente grandes (ELAA) en las fachadas de edificios, el cual es validado con el modelo matemático del sistema. Como es conocido, el espacio físico en los edificios se vuelve limitado para acomodar una variedad de estaciones bases tradicionales lo cual limita la explotación de los beneficios de la tecnología M-MIMO. Por lo que una estrategia es aprovechar los espacios reducidos mediante la implementación de antenas sobre paredes, techos, entre otros. El simulador presenta un enfoque considerando un canal de línea de visión uniforme aleatorio donde los terminales de usuario (UT) están ubicados uniformemente distribuidos en el área servida por el conjunto de antenas BS desplegado en la fachada del edificio donde se realiza el análisis del patrón de radiación e IRF.

De forma general, la simulación propuesta es desarrollada basada en una metodología sistemática que inicia con la selección de la imagen que puede estar en formato .png o .jpeg, posteriormente, se determina el área donde se desplegarán los arreglos de antenas, así como, mediante una condición, el código permite eliminar las áreas consideradas restringidas donde no se desplegarán las antenas; luego, se define la frecuencia portadora para calcular la longitud de onda y definir la distancia entre antenas para la simulación, la distancia mínima recomendada entre antenas en la que se minimiza la interferencia es  $d = \frac{\lambda_c}{2}$ ; después, con los datos previamente definidos, la simulación ejecuta el proceso de despliegue de antenas en la fachada del edificio; una vez desplegadas las antenas en el edificio de fachada se genera el vector de dirección según el modelo de canal; finalmente, se calcula el patrón de radiación y el IRF.

La Fig. 24 presenta el diagrama de flujo del simulador implementado y cada fase se detalla a continuación:

**Figura 24**

Diagrama de flujo del simulador ELAA desarrollado



*Nota.* La figura ilustra el diagrama de flujo del simulador ELAA propuesto.

#### a. Selección del edificio

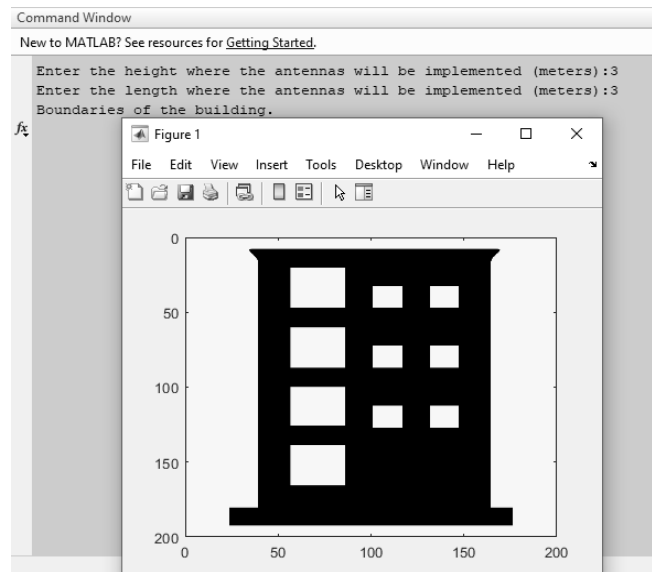
Usando el código de Matlab, la imagen del edificio seleccionado se carga a través de la función *imread* (nombre de archivo.png). En este aspecto, se puede seleccionar y cargar la imagen de cualquier edificio donde se pueda implementar las antenas; esto puede ser en caras de edificios con infraestructuras lisas, columnas, entre otros. Para la presente simulación, se utilizó el edificio central de la Universidad Central de Fuerzas Armadas ESPE.

Se debe especificar el formato del archivo, en .png o .jpeg., el peso y la resolución de la imagen no requieren ser ingresados. A seguir, el programa le pedirá al usuario que ingrese la altura y la longitud del edificio en metros, lo cual es útil para el despliegue de antenas considerando un escenario real.

Luego, una nueva ventana muestra la versión a escala del edificio donde se desplegarán las antenas, como se muestra en la Fig. 25. Para nuestra simulación, la altura y la longitud del edificio seleccionado donde se desplegarán las antenas es de 3 x 3 metros.

### Figura 25

*Imagen cargada con altura y longitud definida.*



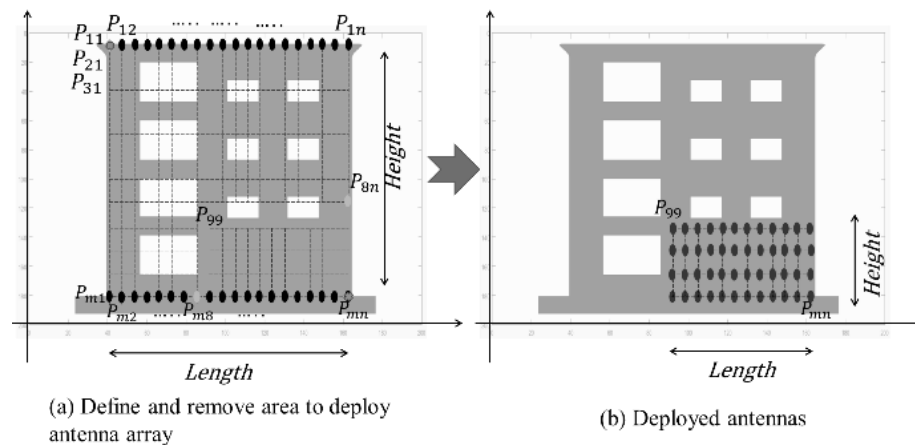
*Nota.* La figura ilustra el edificio cargada en el programa Matlab.

### b. Definición del área donde se desplegarán las antenas

A continuación, en la Fig. 26, dando clic con el ratón sobre el edificio, el usuario debe elegir el punto superior e inferior donde le gustaría desplegar las antenas. Para el ejemplo, se ha elegido los puntos  $P_{11}$  y  $P_{mn}$  como se muestra en la Fig. 26a, obteniendo un área entre estos dos puntos.

**Figura 26**

*Selección de los puntos  $P_{11}$  y  $P_{mn}$ .*



*Nota.* La figura ilustra el proceso de selección y eliminación de antenas conforme el requerimiento del usuario.

Seguido, el usuario tiene la condición (sí o no) de retirar las áreas donde no se requieran las antenas en el área previamente seleccionada en el párrafo anterior. Si la respuesta del usuario a través de la ventana de comandos de Matlab es negativa, el programa interpreta que las antenas se desplegarán en la zona seleccionada y continúa con la selección de la frecuencia de la portadora.

Por el contrario, si la respuesta del usuario es positiva, el usuario debe elegir el punto superior e inferior donde le gustaría quitar las antenas. En este paso, el usuario es libre de seleccionar los puntos que le gustaría eliminar, desplegar las antenas y diseñar conjuntos de antenas planas o lineales uniformes o no uniformes, de acuerdo con sus requisitos.

Para el ejemplo, se debe eliminar las áreas donde las antenas no son requeridas o permitidas, por ejemplo, en las ventanas. Por lo tanto, se eliminará las áreas entre los puntos  $P_{11}$  con  $P_{8n}$  y luego  $P_{11}$  con  $P_{m8}$  como se muestra en la Fig. 26a, es decir con un clic, se debe elegir el punto superior ( $P_{11}$ ) y otro clic, el punto inferior ( $P_{m8}$ ) y luego, el punto superior ( $P_{11}$ ) con el punto inferior ( $P_{m8}$ ), obteniendo como resultado, la remoción del área como se muestra en la Fig. 26a. Al final de este procedimiento, tenemos un área seleccionada entre los puntos  $P_{99}$  con  $P_{mn}$  donde se desplegarán las antenas, como se muestra en la Fig. 26b.

### c. Definición de la frecuencia portadora

Continuando con el flujo de trabajo, se necesita definir la frecuencia portadora  $f_c$  y luego calcular la longitud de onda portadora  $\lambda_c$  a partir de la relación  $\lambda_c = \frac{c}{f_c}$ , donde  $c \simeq 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  es la velocidad de la luz. Para la simulación, hemos definido el uso de un espectro de frecuencia media que se utiliza para cobertura de área amplia y penetración en edificios y estructuras, es decir,  $f_c = 1,9 \text{ GHz}$  (banda 2) (Li & al., 2022), obteniendo los siguientes parámetros:



**Tabla 1***Características de la simulación realizada*

PARÁMETRO	VALORES
Frecuencia	1,9 GHz
$\lambda_c$	15,78 cm
Distancia entre antenas	$\frac{\lambda_c}{2}$
	7,89 cm

*Nota.* La tabla ilustra las consideraciones técnicas necesarias para la simulación propuesta.

Utilizando la longitud de onda portadora  $\lambda_c$  calculada, la separación de antena entre antenas  $d$  (en cualquier eje: X, Y o Z), se puede definir mediante  $d \approx \frac{\lambda_c}{2}$ , es decir, para una frecuencia portadora  $f_c = 1,9$  GHz, utilizando la expresión  $d \approx \frac{\lambda_c}{2}$ , la distancia entre antenas es  $d = 7,89$  cm.

#### **d. Despliegue de antenas**

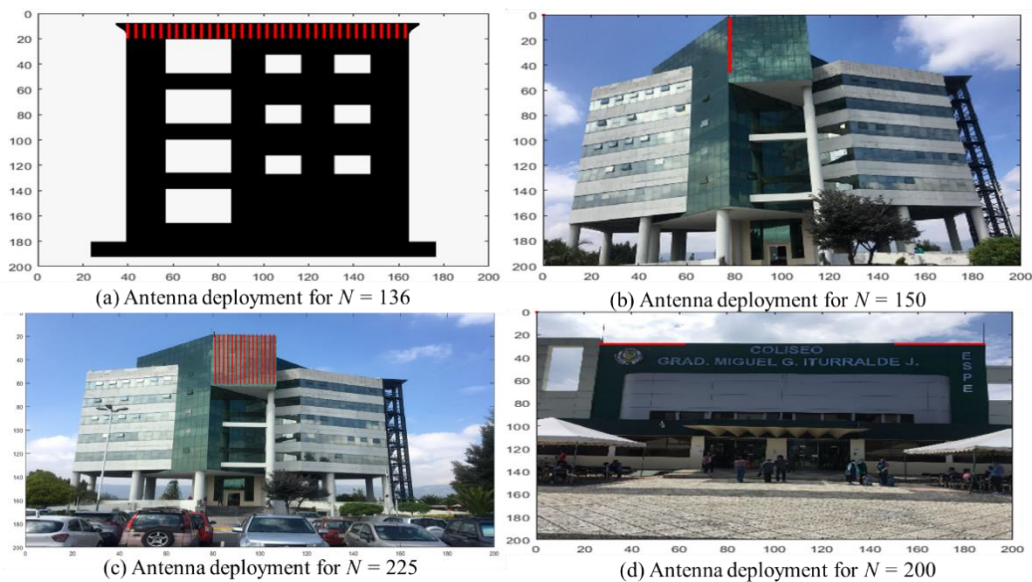
Una vez definida la frecuencia portadora, el simulador a través de las ventanas de comandos de Matlab, le pedirá al usuario que defina el eje o plano donde se desplegarán las antenas, es decir, sobre los ejes de coordenadas en el espacio tridimensional y en un entorno real, puede desplegar las antenas en los ejes Y o Z (simulando un arreglo lineal) o en los planos YZ o XY (simulando un arreglo plano).

A continuación, el simulador ejecuta las operaciones matemáticas para calcular el número de antenas a desplegar según los datos introducidos y la frecuencia portadora definida en el apartado anterior. Finalmente, realiza y considera el despliegue de una matriz de apertura extremadamente grande, es decir, un arreglo de antenas M-MIMO donde el desafío es implementar cientos o miles de antenas para brindar servicios de comunicación a múltiples usuarios.

Por tanto, en una nueva ventana, el programa muestra gráficos con puntos de color rojo, el edificio y las  $N$  antenas desplegadas en la fachada del edificio, similares a los escenarios de ejemplo en la Fig. 27.

**Figura 27**

*Escenarios simulados*



*Nota.* La figuras ilustran diferentes escenarios de despliegue de antenas, los puntos rojos representan las antenas desplegadas en la fachada del edificio.

En efecto, el programa coloca las antenas en cada posición sobre el área seleccionada considerando la distancia entre antenas  $d$ . Por lo tanto, la simulación permite la creación de diferentes escenarios como se muestra en la Fig. 27, como, por ejemplo:

En la Fig. 27a, se visualiza la implementación de arreglo de antenas de tipo planar sobre el eje YZ de  $34 \times 4$  es decir  $N = 136$  antenas distribuidos a una distancia  $d \approx \frac{\lambda_c}{2}$  con frecuencia de 1,9 GHz, dando una separación entre antenas de 7,89 centímetros.

En la Fig. 27b se visualiza el despliegue de un conjunto de antenas lineales uniformes en el eje Z de  $N = 150$  antenas.

En la Fig. 27c, se aprecia el despliegue de un arreglo uniforme de  $15 \times 15$  antenas en el plano YZ, obteniendo un total de  $N=225$  antenas.

Y, en la Fig. 27d, se despliega un total de  $N=200$  antenas distribuidas de forma no uniforme, es decir,  $N=100$  antenas en el lado izquierdo y  $N=100$  antenas en el lado derecho en línea recta, dejando un espacio hueco en el centro. Este escenario simula el despliegue de antenas conforme a las necesidades del usuario de tal forma que, se discrimine puertas, ventanas, techos, entre otros. Por tanto, el simulador también permite considerar arreglos no uniformes puesto que se puede discriminar áreas donde no se requiere implementar antenas.

### e. Generación de vector de direcciones (steering vector)

A continuación, se determina el vector de direcciones el cual representa el conjunto de retardos de fase experimentados por una onda plana cuando llega a cada elemento en un conjunto de antenas, lo que explica que el vector de direcciones depende de la frecuencia, la dirección de propagación y la geometría del ángulo y su orientación del conjunto de antenas que depende de  $\phi$ . Es un vector que describe la dirección de una señal que se propaga en el espacio.

Para la presente simulación, se utiliza la matriz lineal uniforme (ULA), matriz lineal no uniforme (NULA), matriz plana uniforme (UPA) y matriz plana no uniforme descritos en el capítulo anterior. Estos arreglos se utilizan porque son opciones populares para la instalación en fachadas de edificios debido a que brindan una buena eficiencia espectral, son estéticamente agradables y ahorran espacio (Ngo, Larsson, & Marzetta, 2013), (Amadid, Boulouird, & Riadi, 2022) y (Marzetta & Yang., 2016). Asimismo, se utilizarán como referencia para comparar los resultados obtenidos.

Las expresiones matemáticas que se utilizarán en la simulación para analizar el patrón de radiación y el IRF en arreglos lineales corresponden a los vectores de direcciones descritas en (2.4), (2.5) y (2.6).

Para el análisis del patrón de radiación y el IFR de arreglos planares, los vectores de direcciones utilizadas corresponden a las ecuaciones descritas en (2.7), (2.8) y (2.9).

## f. Patrón de radiación y generación IRF

Considerando (Altamirano D. , 2021), el patrón de radiación tiene relación directa que depende del arreglo geométrico aplicado, por tal razón, en la simulación propuesta, se aplicó arreglos de gran apertura lineales y planares.

Una consideración utilizada en la simulación dado a la existencia de matrices no uniformes es la multiplicación de los vectores de direcciones obtenidos  $\mathbf{h}_{k,xy}$  ó  $\mathbf{h}_{j,xy}$ , por la posición de cada antena conforme a lo siguiente:

$$\mathbf{h}_{k,xy} = \mathbf{h}_{k,xy} \cdot \textit{estado} \quad (3,2)$$

$$\mathbf{h}_{j,xy} = \mathbf{h}_{j,xy} \cdot \textit{estado} \quad (3,3)$$

Donde, la variable *estado*, se refiere al producto elemento por elemento de la posición de cada antena desplegada en la simulación donde va a existir o no antenas.

Finalmente, para el modelo propuesto, el patrón de radiación normalizado propuesto es 3-D campo cercano descrito en la expresión (2.18).

Por otro lado, para la evaluación del desempeño del sistema implementado con múltiples antenas, se generó el IRF definido por el promedio del patrón de radiación normalizado al cuadrado descrito en la expresión (2.16).

De forma similar, el IRF se puede calcular con una expresión matemática que involucra integrales del patrón de radiación normalizado de la expresión (2.16) con respecto al ángulo de llegada  $\phi$  y el ángulo de elevación  $\theta$  con límites de integración entre  $(2\pi, 0)$  y  $(\frac{\pi}{2}, \pi)$  respectivamente, dadas por la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{1}{N^2} \int_0^{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} \int_0^{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} \sin^2(\theta_k) \sin^2(\theta_j) |\mathbf{h}_j^H \mathbf{h}_k|^2 \dots$$

$$p(\phi_k)p(\theta_k)p(\phi_j)p(\theta_j)d(\theta_k)d(\phi_k)d(\theta_j)d(\phi_j) \quad (3.4)$$

Donde  $\frac{\sin^2(\theta_k)\sin^2(\theta_j)|\mathbf{h}_j^H \mathbf{h}_k|^2}{N^2}$  es el cuadrado normalizado del patrón de radiación  $R$  de cada posición.  $p(\phi_k)$  y  $p(\phi_j)$  corresponden al ángulo de arribo de la PDFs y  $p(\theta_k)$  y  $p(\theta_j)$ , corresponden al ángulo de elevación de PDFs.

Asimismo, se utilizaron expresiones cerradas para calcular el IRF, los cuales permitieron hacer la comparación con los datos obtenidos en la simulación, estas expresiones refieren a las descritas en las ecuaciones: (2.19) y (2.21) para arreglos lineales; y, (2.22) y (2.23) para arreglos planares.

A continuación, se mostrarán los resultados de la simulación en los ejes Y o Z (simulando una matriz lineal) y en los planos YZ o XY (simulando una matriz plana) ya que estas configuraciones se usan comúnmente en entornos y aplicaciones del mundo real. En un sistema de comunicación inalámbrica, las antenas suelen estar ubicadas horizontalmente (eje X o eje Y) sobre edificios o torres de comunicación. Por lo tanto,

simular antenas en estos ejes o planos, permitirá analizar su desempeño y optimizar su diseño en un entorno virtual antes de que se construyan y prueben físicamente.

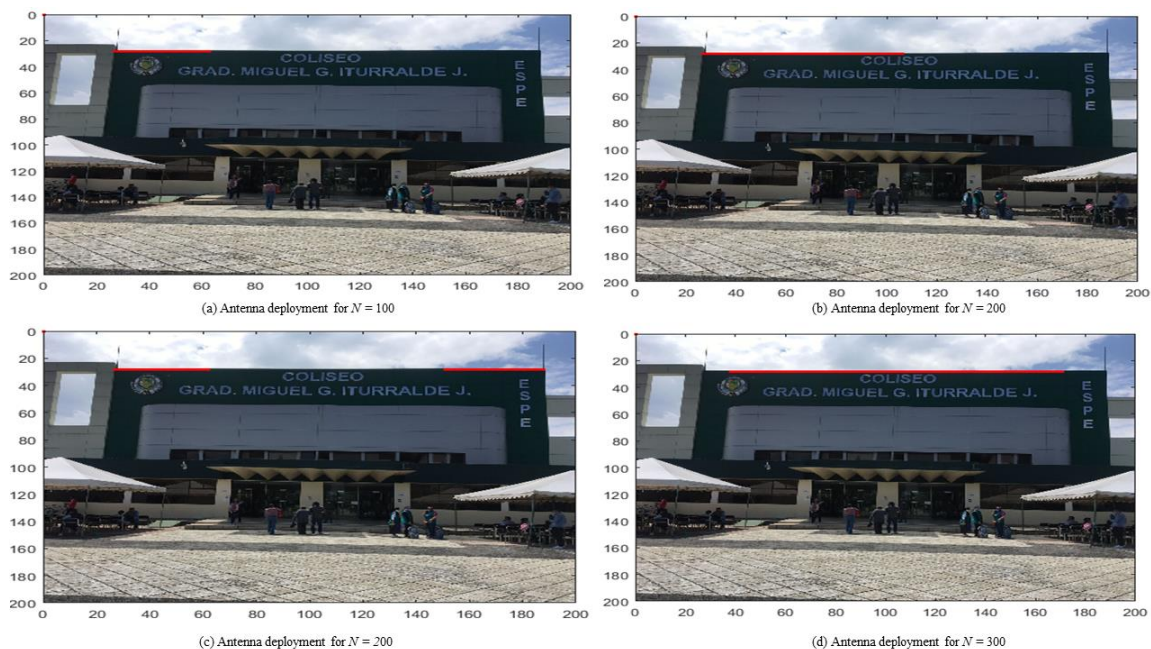
#### **g. Resultados de la simulación ULA eje Y**

En este ítem, se ilustró el desempeño y los resultados de la simulación ELAA bajo los escenarios estudiados y conforme a los parámetros descritos en la Tabla 1. Además, se han considerado algunos edificios de la Universidad ESPE como se muestra en la Fig. 27, y el uso de arreglos ULA y NULA como se describió en el capítulo 2.

Para obtener los primeros resultados de la simulación en el eje Y, las antenas se desplegaron en la parte alta del coliseo universitario ESPE que tiene una distancia total de 30 metros, como se muestra en la Fig. 28. Así, el número de antenas seleccionadas en la simulación permitió analizar el desempeño del sistema y está de acuerdo con la distancia real del edificio para implementar antenas en forma horizontal, siendo estas,  $N=100$ ,  $N=200$  y  $N=300$  antenas. A continuación, se detalla cada escenario analizado.

**Figura 28**

*Escenarios de ELAA con ULA eje Y*



*Nota.* Las figuras ilustran 4 diferentes escenarios del despliegue de antenas sobre el eje Y, con arreglo lineal uniforme y no uniforme.

En la Fig. 28a, se muestra ELAA simulado ULA con un total de  $N=100$  antenas que se encuentran distribuidos de forma horizontal sobre la parte superior de la estructura seleccionada (Coliseo de la Universidad), los cuales se encuentran separados a 7,89 centímetros entre antenas, teniendo una distancia total utilizada de 7,89 metros.

En la Fig. 28b, se muestra ELAA simulado ULA con un total de  $N=200$  antenas desplegadas horizontalmente en la misma infraestructura seleccionada, utilizando una distancia total de 15,78 metros.

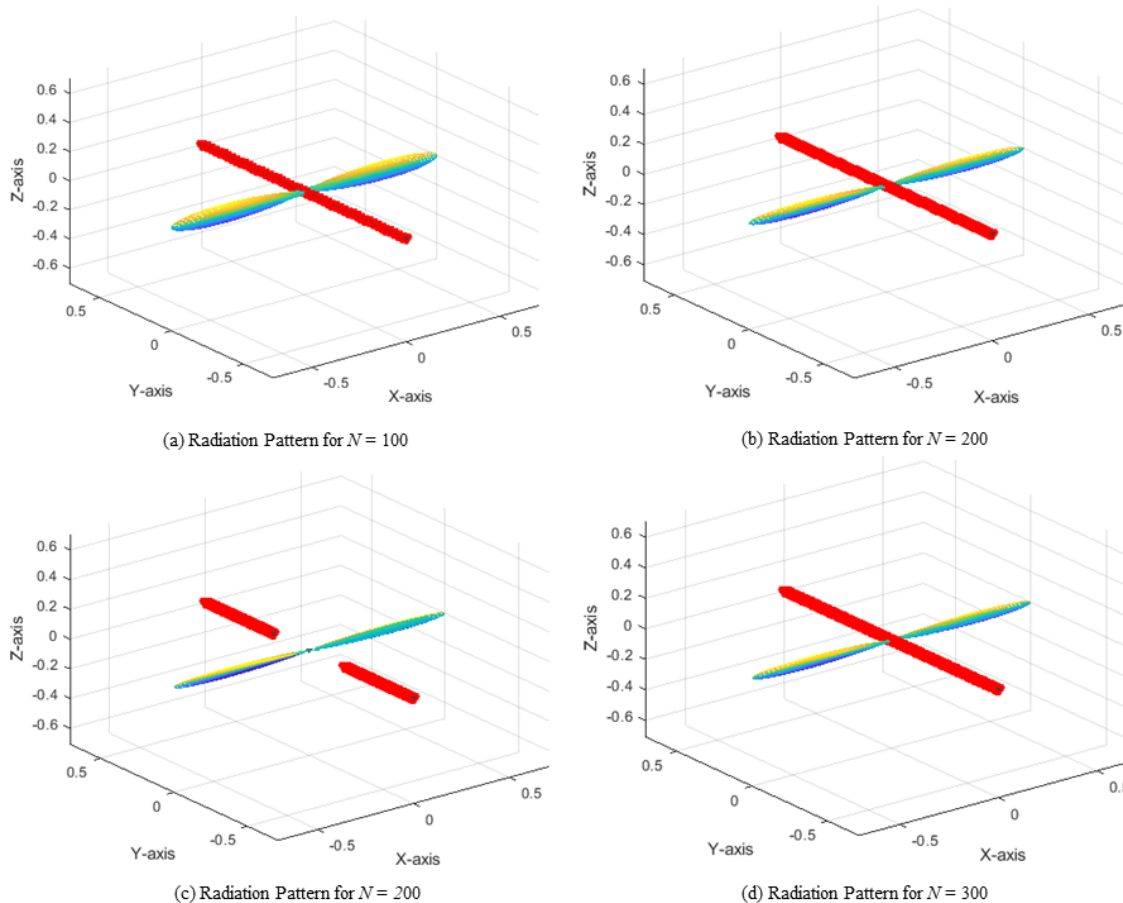


En la Fig. 28c, se aprecia el despliegue total de antenas igual a lo desarrollado en la Fig 28b, es decir,  $N=200$  antenas, con la particularidad de que no se encuentran desplegadas de forma uniforme, es decir, se dividió un total de  $N=100$  antenas en la parte superior izquierda y  $N=100$  antenas en la parte superior derecha, este escenario fue creado con la finalidad de analizar el IRF teniendo un arreglo de gran apertura considerado no uniforme (NULA). Para realizar este escenario, se desplegó inicialmente un arreglo de  $N=300$  antenas, en el cual se eliminaron  $N=100$  antenas correspondiente al centro, creando este escenario para analizar la IRF en ELAA considerada no uniforme.

Finalmente, en la Fig. 28d, se muestra el despliegue de ULA de  $N=300$  antenas distribuidas de forma horizontal con una distancia total de 23,67 metros cual es el mismo espacio utilizado para el despliegue de  $N=200$  antenas NULA descritas en la Fig. 28c.

**Figura 29**

*Patrón de radiación de ELAA en el eje Y*



*Nota.* Las figuras ilustran los diagramas de radiación de los 4 escenarios anteriormente analizados.

Como primera parte de los resultados obtenidos, en la Fig. 29 se aprecia los diagramas de radiación en una posición UT de  $\phi_k = 0^\circ$  acorde a cada escenario propuesto anteriormente, es decir,  $N=100$ ,  $N=200$  (*uniforme y no uniforme*) y  $N=300$  antenas distribuidas en el eje Y respectivamente. El cambio de posición de UT  $\phi_k = 45^\circ$ ,  $\phi_k = 90^\circ$  u otro valor, afecta la dirección de los lóbulos principal y secundario del patrón de radiación del sistema propuesto.

Observe que el lóbulo de radiación se maximiza en la dirección de  $k$ th UT. A medida que aumenta el número de antenas, el patrón de radiación es más direccional hacia la UT. Por ejemplo, el lóbulo simulado con  $N = 100$  antenas, es más ancho que el lóbulo simulado con  $N = 200$  y  $N = 300$  antenas por varias razones como: el factor de matriz que depende de la geometría utilizada, la separación de las antenas en la matriz; y, al controlar el ángulo de fase, la cual permite dirigir la dirección del lóbulo principal del patrón de radiación.

También se muestra el patrón de radiación del arreglo de antenas uniforme y no uniforme de  $N=200$  antenas de las Fig. 29b y Fig. 29c donde se observa que el arreglo de antenas no uniforme tiene mayor alcance debido a la variación de espaciamiento entre los elementos radiantes, logrando: mitigar los efectos de la correlación espacial entre antenas por otras antenas cercanas, minimizar la interferencia entre antenas, maximizar la ganancia en la dirección deseada y mejorar el desempeño del sistema. En general, el resultado nos permite descuidar los lugares donde no se requiere el despliegue de antenas sin afectar el desempeño del sistema.

En la Tabla 2 se muestra los resultados obtenidos de la inversa de la teórica y la IRF simulada calculado en función del número de antenas simuladas en la Fig. 28 a-d.

**Tabla 2**

*Resultados de la simulación, Eje Y*

<b>Número de antenas</b>	<b>Distancia total utilizada (metros)</b>	<b>IRF teórico</b>	<b>IRF simulado</b>
<i>(a) 100 (ULA)</i>	7.89	214.399	214.390
<i>(b) 200 (ULA)</i>	15.78	428.684	428.681
<i>(c) 200 (NULA)</i>	23.67	428.684	428.679
<i>(d) 300 (ULA)</i>	23.67	642.970	642.967

*Nota.* La tabla muestra el IRF teórico y simulado relacionado al número de antenas desplegadas en los 4 escenarios descritos anteriormente.

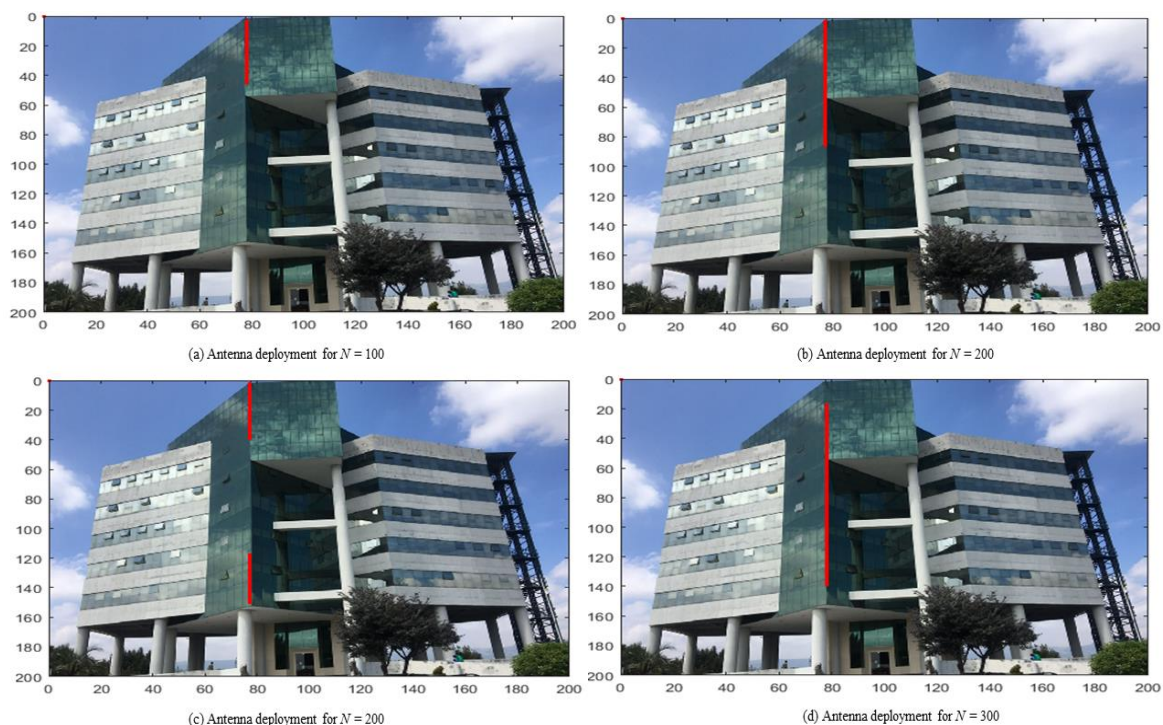
Un resultado muy interesante es que en el despliegue de  $N = 200$  antenas uniformes y no uniformes, como se muestra en la Fig. 28b y la Fig. 28c respectivamente, el IRF obtenido es similar en los dos escenarios, determinándose que, la interferencia no se reduce a pesar de utilizar una mayor distancia para el despliegue de  $N = 200$  antenas no uniformes de la Fig. 28c.

#### **h. Resultados de la simulación ULA eje Z**

El siguiente escenario que se simulará, es el despliegue de antenas en el eje Z, tal y como se muestra en la Fig. 30, con una frecuencia de 1,9 GHz y con una separación entre antenas de  $d = \frac{\lambda_c}{2}$  descritas en la Tabla 1.

### Figura 30

#### Escenarios de ELAA con ULA eje Z



*Nota.* Las figuras ilustran 4 diferentes escenarios del despliegue de antenas sobre el eje Z, con arreglo lineal uniforme y no uniforme.

En la Fig. 30a, se visualiza un total de  $N = 100$  antenas distribuidas de forma vertical en la parte superior del edificio seleccionado, teniendo una separación entre antenas de 7,89 centímetros, dando una distancia total utilizada del edificio de 7,89 metros.

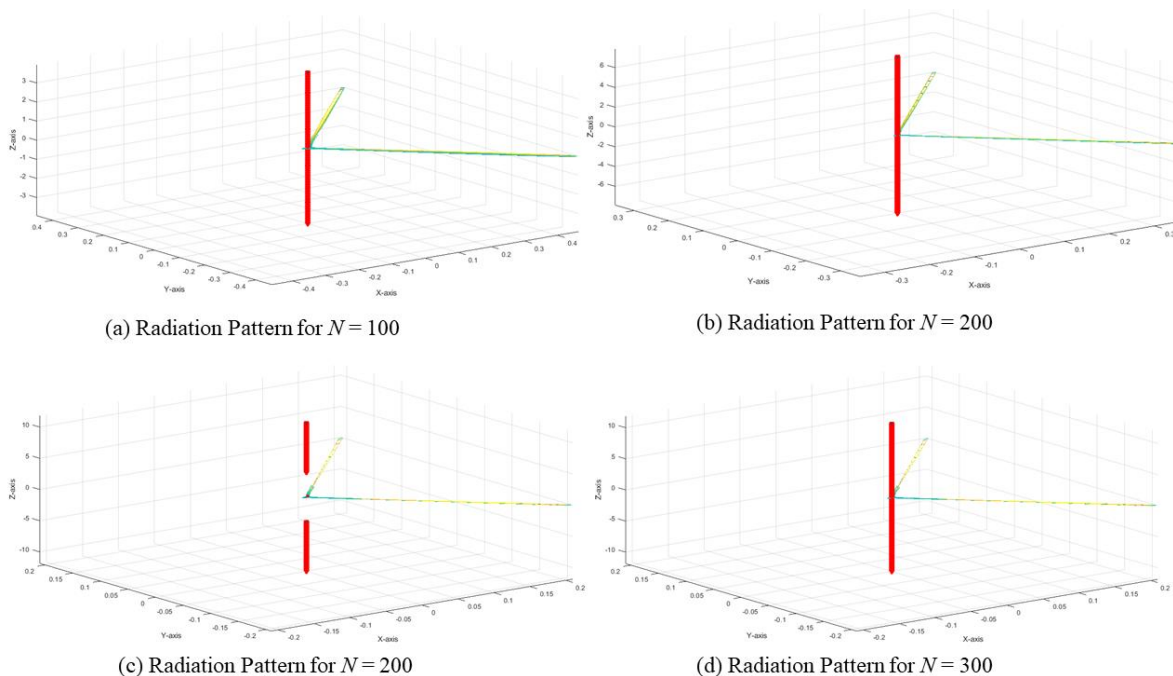
En la Fig. 30b, se muestra ELAA simulado con un total de  $N = 200$  antenas distribuidas verticalmente a una distancia total utilizada de 15,78 metros. Mientras que, en la Fig 30c se muestra el mismo número de antenas verticalmente distribuidas que en la Fig. 30b, es decir,  $N = 200$  antenas con la diferencia de que  $N = 100$  de las antenas

se desplegaron desde el lado superior de la fachada del edificio y  $N = 100$  antenas se desplegaron desde la parte inferior del edificio. Similar a la subsección anterior, para simular este escenario de  $N = 200$  antenas de la Fig. 30c,  $N = 300$  antenas se desplegaron y se retiraron  $N = 100$  antenas, obteniendo  $N = 200$  antenas teniendo una distancia total utilizada de 23,67 metros.

Finalmente, en la Fig. 30d se muestra el despliegue de  $N = 300$  antenas distribuidas en la parte superior del edificio con una distancia total de 23,67 metros que es el mismo espacio utilizado por la última matriz no uniforme de  $N = 200$  antenas.

### Figura 31

*Patrón de radiación de ELAA en el eje Z*



*Nota.* Las figuras ilustran los diagramas de radiación de los 4 escenarios anteriormente analizados.

En la Fig. 31 se muestra el patrón de radiación con ELAA simulado según el despliegue de antenas de la Fig. 30, es decir,  $N = 100$ ,  $N = 200$  (dos escenarios) y  $N = 300$  antenas distribuidas en el eje Z respectivamente a un UT en la posición  $\phi_k = 45^\circ$ .

Al igual que los escenarios ELAA del eje Y, el lóbulo de radiación se maximiza en la dirección de la k-ésima UT, a medida que aumenta el número de antenas debido al factor de matriz y el ángulo de fase descritos anteriormente. El lóbulo de radiación es más direccional.

De manera similar, en la Fig. 31b y la Fig. 31c se muestra el patrón de radiación del arreglo de antenas uniforme y no uniforme de  $N=200$  antenas en el plano vertical, donde se observa que, el arreglo de antenas no uniforme tiene mayor alcance debido a la variación en el espaciamiento entre las antenas radiantes.

En la Tabla 3 se muestra la inversa de la IRF en función del número de antenas desplegadas para ULA. Esto muestra el despliegue de ELAA resultando en un IRF similar a la ULA teórica.

**Tabla 3***Resultados de la simulación, Eje Z*

Número de antenas	Distancia		IRF simulado
	total utilizada (metros)	IRF teórico	
(a) 100 (ULA)	7.89	95.139	95.129
(b) 200 (ULA)	15.78	189.004	189.002
(c) 200 (NULA)	23.67	189.004	189.000
(d) 300 (ULA)	23.67	282.823	282.820

*Nota.* La tabla muestra el IRF teórico y simulado relacionado al número de antenas desplegadas en los 4 escenarios descritos anteriormente.

Comparando el IRF de la simulación del eje Y (horizontal) con el eje Z (vertical) de las Tablas 2 y 3, la reducción de interferencia en el eje Y es mayor que la del eje Z, debido al patrón de antena asimétrico y la configuración geométrica. de la matriz, es decir, para una matriz lineal orientada a lo largo del eje Z, el lóbulo principal del patrón de radiación está al mismo sentido la matriz, perpendicular al eje Z (ver Fig. 31) cuando la radiación se concentra principalmente en el plano XY y puede ser más difícil suprimir la interferencia en el plano YZ ya que el lóbulo principal del patrón de radiación no es perpendicular a ese plano, por lo tanto, las antenas desplegadas en el eje Y (horizontal) reducen más interferencia que las arreglos desplegados en el eje Z (vertical). Asimismo, en un sistema de comunicación inalámbrica, las antenas suelen estar ubicadas horizontalmente (X-eje o Y-eje) en los edificios o torres de comunicación, por lo que la transmisión de la señal se ve menos afectada por obstáculos en comparación con el eje



Z, lo que garantiza una mejor reducción de interferencias como se muestra en los resultados.

Haciendo referencia a la simulación de N=200 conjuntos de antenas uniformes y no uniformes de las Fig. 30b y 30c, la IRF es similar en los dos escenarios y la interferencia no se reduce a pesar de utilizar una distancia mayor para el despliegue de N=200 antenas no uniformes, lo que permite determinar que se puede descuidar los lugares donde no se requiere el despliegue de antenas sin afectar el desempeño del sistema.

#### **i. Resultados de la simulación UPA plano YZ**

El siguiente escenario a simular es ELAA sobre el plano YZ como se puede apreciar en la Fig. 32, esto de forma uniforme como no uniforme. El número de antenas seleccionadas en la simulación que permitió analizar el desempeño del sistema implementado fue N=400 y N=900 antenas en arreglos planos UPA y NUPA con una separación entre antenas de  $d_x = d_y = d_z = \frac{\lambda_c}{2}$ .

Un aspecto muy importante es que, con un arreglo planar, se aprovecha mucho mejor los espacios reducidos de un edificio, a diferencia de un arreglo lineal ULA.

## Figura 32

### Escenarios de ELAA con UPA en el plano YZ



*Nota.* Las figuras ilustran 4 diferentes escenarios del despliegue de antenas sobre el plano YZ, con arreglo planar uniforme y no uniforme.

En la Fig. 32a se visualiza un ELAA simulado de una matriz plana uniforme con un total de antenas  $N = 400$  (matriz  $20 \times 20$ ) distribuidas en el plano YZ con separación entre antenas de 7,89 centímetros, por lo tanto, la distancia total utilizada en el eje Y y en el eje Z es de 1.578 metros, obteniendo un área útil del edificio a utilizar de  $2,49 \text{ m}^2$ .

En la Fig. 32b se visualiza un ELAA simulado de una matriz plana no uniforme con  $N = 400$  antenas donde, no se considera el centro del área seleccionada, emulando un área que no es interés para el despliegue por parte del usuario. Para desarrollar esta simulación, desplegamos una cantidad total de

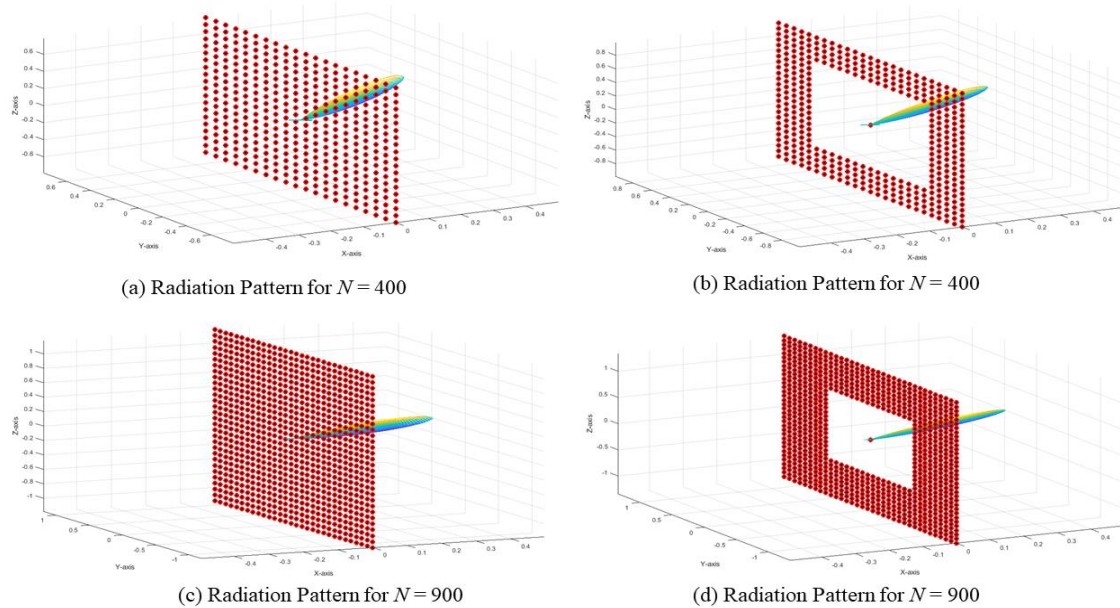
$N = 625$  antenas en una matriz de  $25 \times 25$ , para posteriormente, eliminar  $N = 225$  antena (matriz  $15 \times 15$ ), obteniendo un total de antenas desplegadas de  $N = 400$  como se muestra en la Fig. 32b. La distancia total utilizada en el eje Y y el eje Z es de 1,9725 metros, obteniendo un área del edificio utilizada de  $3,89 \text{ m}^2$ .

En la Fig. 32c se observa el despliegue de  $N = 900$  antenas (matriz de  $30 \times 30$ ) correspondiente a un arreglo planar uniforme con una distancia total utilizada en el eje Y y el eje Z de 2.367 metros, obteniendo un área total del edificio simulado de  $5.602 \text{ m}^2$ .

Y, finalmente, en la Fig. 32d se visualiza el mismo número de antenas desplegadas  $N = 900$  en forma no uniforme, simulando que, en el centro, no se despliega antenas. La distancia utilizada en el edificio de 2,6826 metros por eje, obteniendo un área útil del edificio de  $7.196 \text{ m}^2$ . Asimismo, para obtener  $N = 900$  antenas, se eliminó las antenas donde no se requerían, por lo que, inicialmente se desplegaron  $N = 1156$  antenas en una matriz de  $34 \times 34$ , de tal forma que se elimine  $N = 256$  antenas (matriz  $16 \times 16$ ), quedando un total de  $N = 900$  antenas.

**Figura 33**

*Patrón de radiación de ELAA en el plano YZ*



*Nota.* Las figuras ilustran los diagramas de radiación de los 4 escenarios anteriormente analizados.

En la Fig. 33, se observa el patrón de radiación con ELAA simulado acorde al despliegue de antenas de la Fig. 32 destinado a un UT en la posición  $\phi_k = 45^\circ$ .

Los resultados de la simulación muestran que el patrón de radiación de una matriz plana no uniforme en la Fig. 33b y la Fig. 33d es más directiva que la matriz plana uniforme en la Fig. 32a y la Fig. 32c porque tiene un espacio no uniforme entre los elementos de la antena. NUPA puede lograr un patrón de radiación altamente direccional con un ancho de haz estrecho. Esto da como resultado el uso efectivo de NUPA en las fachadas de edificios con un alto

desempeño del sistema que UPA, ya que en UPA no se podría discriminar la instalación de antenas en ventanas, puertas, techos y más.

En la Tabla 4 se muestra la inversa de la IRF en función del número de antenas desplegadas para UPA YZ tanto uniforme, como no uniforme. Los resultados determinaron que, el planar no uniforme ELA tiene una mayor reducción de interferencia que el planar uniforme ELAA, pero no es considerable.

Esto puede darse debido a que se utiliza un área mucho mayor para el despliegue de antenas de tipo no uniforme, de tal forma que no exista mucha interferencia entre antenas.

**Tabla 4**

*Resultados de la simulación, Plano YZ*

Número de antenas	Total		
	área utilizada ( $m^2$ )	IRF teórico	IRF simulado
(a) 400 (UPA)	2.49	296.353	296.351
(b) 400 (NUPA)	3.89	296.353	302.623
(c) 900 (UPA)	5.602	616.805	616.804
(d) 900 (NUPA)	7.196	616.805	622.893

*Nota.* La tabla muestra el IRF teórico y simulado relacionado al número de antenas desplegadas en los 4 escenarios descritos anteriormente.

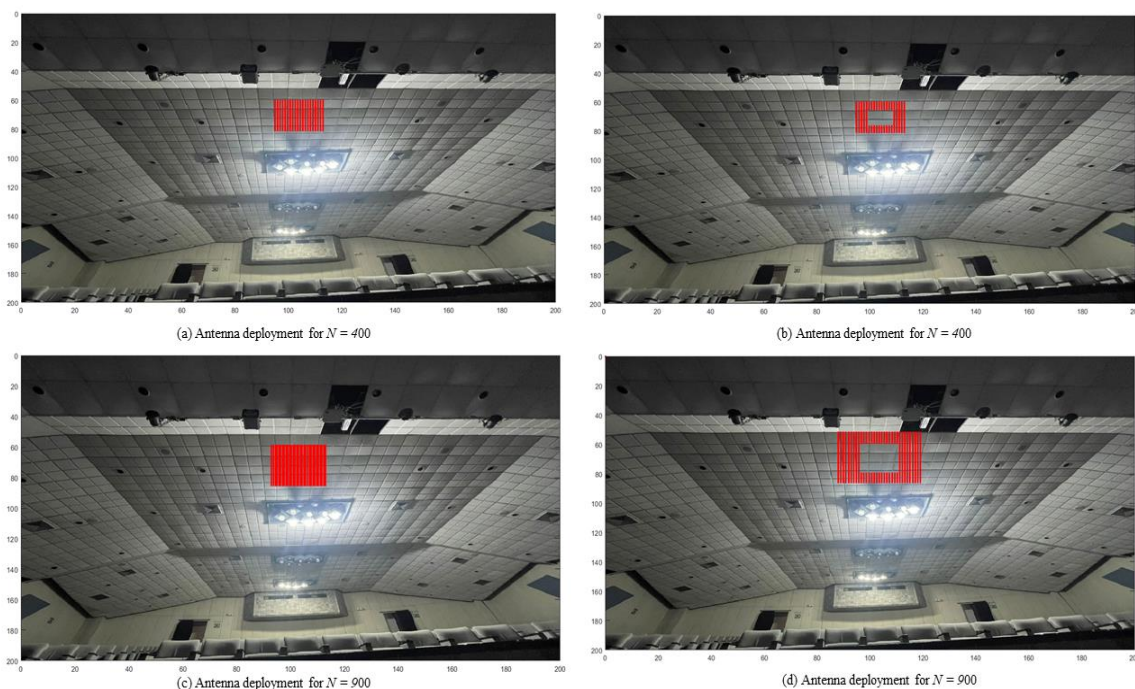
Un resultado interesante de la Tabla 4 es que  $N=400$  y  $N=900$  en un conjunto NUPA, la IRF se reduce más que UPA con el mismo número de antenas desplegadas, esto se debe a que NUPA puede usar un espaciado de antena irregular o no uniforme para reducir lóbulos de rejilla y mejorar la reducción de la interferencia, lo que permite un control más flexible de los patrones de radiación de la antena y el espaciado de la antena.

#### **j. Resultados de la simulación UPA plano XY**

Como último escenario de simulación, se realizó el despliegue de antenas en el interior de un auditorio como resultado de una simulación sobre el plano XY. Similar a la subsección anterior sobre los escenarios de simulación en el plano UPA YZ. El número de antenas seleccionadas en la simulación permitió analizar el desempeño del sistema, es decir  $N=400$  y  $N=900$  antenas en arreglos planos UPA y NUPA con una separación entre antenas de  $d = \frac{\lambda_c}{2}$ .

## Figura 34

### Escenarios de ELAA con UPA en el plano XY



*Nota.* Las figuras ilustran 4 diferentes escenarios del despliegue de antenas sobre el plano XY, con arreglo planar uniforme y no uniforme.

En la Fig. 34a se visualiza un ELAA simulado de una matriz plana uniforme con un total de antenas  $N = 400$  (matriz 20 X 20) distribuidas en el plano XY con separación entre antenas de 7,89 centímetros, por lo tanto, la distancia total utilizada en el eje X y en el eje Y es de 1.578 metros, obteniendo un área útil del edificio a utilizar de  $2,49 \text{ m}^2$ .

En la Fig. 34b se visualiza un ELAA simulado de una matriz plana no uniforme con  $N = 400$  antenas donde, no se considera el centro del área seleccionada, emulando un área que no es interés para el despliegue por parte

del usuario. Para desarrollar esta simulación, desplegamos una cantidad total de  $N = 625$  antenas en una matriz de  $25 \times 25$ , para posteriormente, eliminar  $N = 225$  antena (matriz  $15 \times 15$ ), obteniendo un total de antenas desplegadas de  $N = 400$  como se muestra en la Fig. 34b. La distancia total utilizada en el eje Y y el eje Z es de 1,9725 metros, obteniendo un área del edificio utilizada de  $3,89 \text{ m}^2$ .

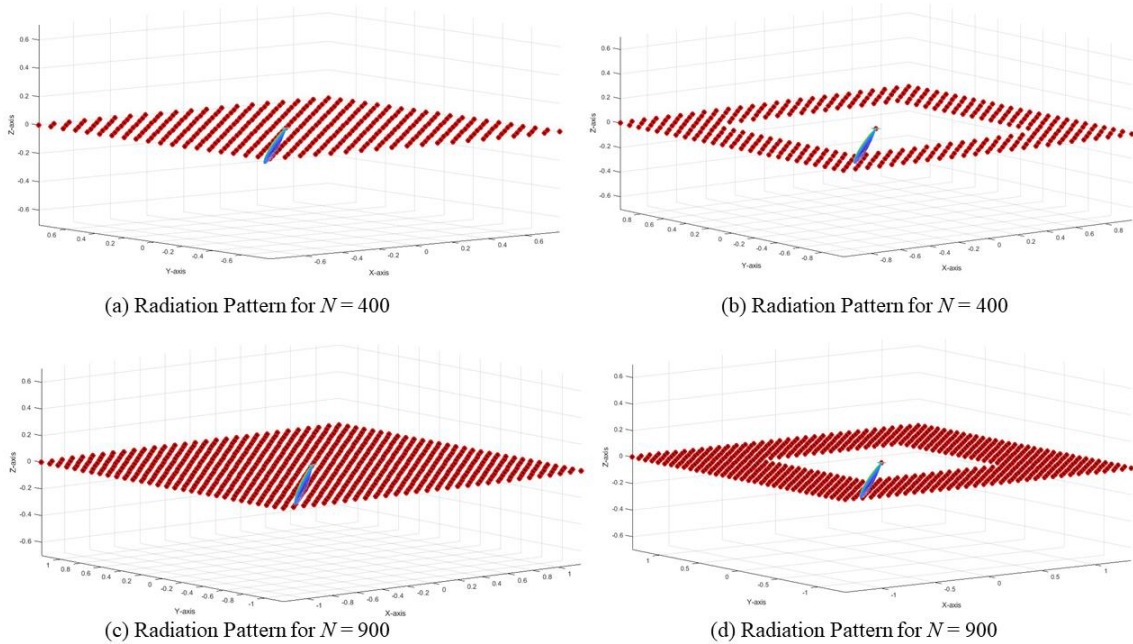
En la Fig. 34c se observa el despliegue de  $N = 900$  antenas (matriz de  $30 \times 30$ ) correspondiente a un arreglo planar uniforme con una distancia total utilizada en el eje Y y el eje Z de 2.367 metros, dando un área total del edificio simulado de  $5.602 \text{ m}^2$ .

Y, por último, en la Fig. 34d se visualiza el mismo número de antenas desplegadas  $N = 900$  en forma no uniforme, simulando que, en el centro, no se despliega antenas. La distancia utilizada en el edificio de 2,6826 metros por eje, obteniendo un área útil del edificio de  $7.196 \text{ m}^2$ . Asimismo, para obtener  $N = 900$  antenas, se eliminó las antenas donde no se requerían, por lo que, inicialmente se desplegaron  $N = 1156$  antenas en una matriz de  $34 \times 34$ , de tal forma que se elimine  $N = 256$  antenas (matriz  $16 \times 16$ ), quedando un total de  $N = 900$  antenas.



**Figura 35**

*Patrón de radiación de ELAA en el plano XY*



*Nota.* Las figuras ilustran los diagramas de radiación de los 4 escenarios anteriormente analizados.

En la Fig. 35 se observa el patrón de radiación con ELAA simulado según el despliegue de antenas de la Fig. 34 destinado a un UT en la posición  $\phi_k = 45^\circ$ .

Los resultados concoritan al despliegue de antenas del plano YZ donde el patrón de radiación es más directivo al aumentar el número de antenas, además, se aprecia que el despliegue de antenas no uniforme, se tiene una mayor directividad con un haz mucho más estrecho que el despliegue de antenas de forma uniforme, determinando que, el despliegue de antenas NUPA

mejora el desempeño del sistema implementado y es útil para ser implementado en fachadas de edificios.

**Tabla 5**

*Resultados de la simulación, Plano XY*

Número de antenas	Total		
	área utilizada ( $m^2$ )	IRF teórico	IRF simulado
(a) 400 (UPA)	2.49	395.338	395.337
(b) 400 (NUPA)	3.89	393.338	399.187
(c) 900 (UPA)	5.602	803.754	803.753
(d) 900 (NUPA)	7.196	803.754	807.987

*Nota.* La tabla muestra el IRF teórico y simulado relacionado al número de antenas desplegadas en los 4 escenarios descritos anteriormente.

Finalmente, la Tabla 5 se muestra los resultados obtenidos de la inversa de la IRF en función del número de antenas desplegadas para el plano UPA XY tanto uniforme como no uniforme.

Los resultados determinar que, comparando el IRF de la Tabla 5 en el plano XY (horizontal) la reducción de la interferencia es mayor que la del plano YZ (vertical) de la Tabla 4, debido a la propagación de las ondas de radio que se ve menos afectada por los obstáculos y la ubicación de antenas en un entorno típico de comunicaciones inalámbricas, además, el plano ELAA XY no

uniforme tiene una mejor IRF que el plano ELAA uniforme con un número similar de antenas desplegadas.

### ***M-MIMO en escenario real***

En esta sección se calcula el IRF considerando medidas reales a partir del experimento de campo de M-MIMO distribuido realizado por los autores de (Guevara, Chen, & Pollin, 2018) con el banco de pruebas de la Universidad de KU Leuven de M-MIMO basado en LTE-TDD (Duplexación por división de tiempo) con las siguientes características.

El banco de pruebas que utilizaron tiene dos componentes:

- El primer componente son las estaciones bases que tiene 64 antenas distribuidas en 2 arreglos, es decir, 32 antenas en cada arreglo, los cuales están conectados por pares de 32 periféricos de USRP-2942R.
  
- El segundo componente son los usuarios con una antena dipolo que se conecta a un amplificador de potencia externo con una ganancia de 13 dBm que fueron implementados en pares en un único USRP. Como se aprecia en la Fig. 36. Cada USRP ejecuta un par de usuarios fueron implementados en un área de cuadrícula de 18 ubicaciones, con una separación de 2 metros de largo y ancho, dando un total de 36 equipos de usuario UE.

El escenario a analizar es el sistema de M-MIMO distribuido como se muestra en la Fig. 36, donde se considera dos estaciones bases BS que están perfectamente sincronizadas y comparten el espectro y la infraestructura. En este escenario, las dos BS cooperan para proporcionar un ancho de banda total de 20 MHz a todos los usuarios simultáneamente.

### Figura 36

*Dos BS dan servicio a todos los UE*



*Nota.* La figura muestra el escenario implementado con el banco de pruebas de la Universidad de KU Leuven de M-MIMO basado en LTE-TDD (Duplexación por división de tiempo). Tomado de (Guevara, Chen, & Pollin, 2018).

Los resultados obtenidos por los autores citados en (Guevara, Chen, & Pollin, 2018) y (KU Leuven, 2019) determinan que, la eficiencia espectral por celda es alto cuando se utiliza la técnica para minimizar el error en la transmisión de datos denominado Error Mínimo Medio Cuadrático (MMSE, por sus siglas en inglés)

mediante el uso de técnicas de procesamiento de señales adaptativas y el ajuste de los pesos de las antenas transmisoras y receptoras.

El presente trabajo utiliza los coeficientes de canal estimados en el experimento, que forma un sistema M-MIMO con matriz de canal de dimensión  $64 \times 32$ . La matriz de canal se divide en 32 steering vector con dimensión  $1 \times 64$ , equivalente al número de antenas receptoras. Usando estos steering vector se puede calcular el IRF.

### **Reducción de interferencia del experimento KU-Leuven**

El cálculo se lo realiza considerando el producto punto par a par de los steering vector y se los normaliza para el número de antenas  $N=64$ . Posteriormente, se calcula el IRF computando la media de la multiplicación por elemento del patrón de radiación y su complejo conjugado. El resultado obtenido se lo observa en la Tabla 6, adicionalmente se muestra el IRF para un sistema UPA de 64 antenas en similar configuración. También se muestra el IRF óptimo en caso de un canal Rayleigh que es 64 (Altamirano D. , 2021).

Se observa que el IRF experimental es mayor que los otros casos. Sin embargo, no se pudo tener acceso a información adicional sobre el experimento, por lo que una posible causa del desvío en el IRF real puede ser una ganancia generada por la estimación de canal o por otras características que surgen del campo cercano que no son consideradas en la simulación ni en los valores teóricos. Este análisis se deja para un trabajo futuro.

**Tabla 6**

*Resultados de la simulación, M-MIMO en escenario real KU Leuven*

Número de antenas	IRF teórico (UPA)	IRF Óptimo	IRF calculado
64	55.523	64	86.531

*Nota.* La figura muestra el escenario implementado con el banco de pruebas de la Universidad de KU

## Capítulo IV

### Conclusiones y recomendaciones

El presente trabajo de investigación analizó el factor de reducción de interferencia de arreglos de antenas lineales, planares y circulares con sus características como arreglos de antenas extremadamente grandes o de gran apertura para sistemas M-MIMO. Ante lo cual, se identificó las capacidades y limitaciones de los arreglos ULA, UPA y UCA mediante la simulación en Matlab de cada uno de estos arreglos con el fin de obtener el patrón de radiación y el IRF a partir de la modificación del número de antenas en diferentes ejes X, Y y Z.

La implementación de esta simulación demostró que el arreglo de antenas ULA, resulta en un patrón de radiación más estrecho y con mayor ganancia a medida que aumenta el número de antenas, sin embargo, esta configuración presenta una desventaja la cual es la generación de un lóbulo reflejado con la misma ganancia que el lóbulo principal lo que significa en una disminución de su eficiencia en comparación con otros arreglos analizados. Por el contrario, UPA no presenta este inconveniente de lóbulo reflejado, aunque es menos estrecho ante un despliegue de antenas similar a la de su contraparte ULA, por lo que la directividad y ganancia de UPA se incrementa a medida que aumenta el número de antenas. Finalmente, UCA es una buena opción de despliegue para obtener una directividad deseada, no obstante, presenta una diversidad de lóbulos secundarios hacia la dirección deseada que podrían afectar al desempeño del sistema, además debido a su configuración ocupa un gran espacio físico.

También se demostró que en arreglos ULA, el IRF aumenta cada vez que se incrementa el número de antenas logrando una mayor directividad como se demuestra en el comportamiento del patrón de radiación. En contraste con un arreglo UPA, la energía se dispersa en un margen de dirección más amplio dado al comportamiento del patrón de radiación, resultando un IRF menor. Y, en arreglos UCA se determina que se tiene una mayor reducción de interferencia que UPA y menor que ULA.

El uso de ULA, UPA o UCA dependerá de la aplicación y caso específico a analizar. Por ejemplo, los resultados demostraron que ULA es simple y fácil de implementar, tanto en escenario de simulación y para escenarios reales, lo que lo convierte en una opción popular para muchas aplicaciones. UCA, por otro lado, tiene el potencial de proporcionar mayor directividad y ganancia en comparación con UPA. UPA, a su vez, puede proporcionar un mayor grado de flexibilidad en el proceso de formación de haces, lo que permite un control espacial más preciso, en especial para ser implementado en fachadas de edificios.

Sobre la base de los resultados obtenidos y consideraciones técnicas de cada uno de los arreglos analizados, se implementó un simulador de sistema M-MIMO que considere escenarios prácticos para el despliegue de ELAA mediante la implementación de un gran número de antenas en la fachada de los edificios. El simulador integra los conceptos de una matriz geométrica como lineal y plana uniforme y no uniforme. Se proporcionan cuatro ejemplos de aplicación para mostrar y evaluar las capacidades del simulador en entornos de simulación.



El simulador ELAA muestra que el despliegue de antenas en edificios se optimiza mediante el uso de un arreglo planar, especialmente, en un arreglo planar no uniforme, siendo estos más eficientes que un arreglo lineal debido a que un arreglo planar puede tener una mayor directividad que una matriz lineal debido al hecho de que irradia energía tanto en dirección horizontal como vertical; los UPA permiten acomodar un mayor número de antenas que ULA en fachadas de edificios; y un arreglo plano es más flexible para este escenario en comparación con una ULA. Además, podemos determinar que NUPA ofrece un mejor desempeño del sistema considerando el despliegue de antenas en las fachadas de los edificios discriminando puertas, ventanas y más.

Las simulaciones mostraron que desplegar la misma cantidad de antenas en un conjunto uniforme y no uniforme producirá un IRF mejor en no uniforme, de hecho, esto se debe a que la interferencia entre antenas es menor cuando se usa una distancia o área mayor que el utilizado en la matriz uniforme. También se determina que el patrón de radiación de un arreglo no uniforme tiene mayor alcance debido a la variación en el espaciamiento entre los elementos radiantes, logrando mitigar los efectos de correlación espacial entre antenas por otras antenas cercanas, minimizando la interferencia entre antenas, maximizando la ganancia en la dirección deseada.

Se realizó un cálculo de IRF con medidas reales a partir del experimento de campo de M-MIMO distribuido con el banco de pruebas de la Universidad de KU Leuven de M-MIMO basado en LTE-TDD (Duplexación por división de tiempo) mediante el despliegue de 64 antenas, dando como resultado, un IRF experimental mayor que el arreglo planar analizado anteriormente, esto posiblemente a una ganancia generada por

la estimación de canal o por características que surgen en el campo cercano que no son consideradas en la simulación ni en los valores teóricos dado a las limitaciones que se tuvo para obtener información adicional sobre el experimento, quedando abierta la investigación en esta área por el gran potencial que tiene para transformar el diseño de redes inalámbricas.

Para trabajos futuros, se deben considerar los efectos del campo cercano u otros modelos de canal que son significativos y que no formaron parte de la presente investigación, incluido el desvanecimiento espacial en la amplitud y fase de la señal recibida, que puede reducir la calidad de la señal y afectar la capacidad del sistema, la polarización cruzada porque las antenas pueden recibir señales no deseadas de otras antenas cercanas; y diferentes respuestas de canal debido a la variación en el campo cercano alrededor de cada antena.

## Bibliografía

- Alonso González, P. (2020). *Caracterización del Canal MIMO Masivo en Interiores Mediante Trazado de Rayos para Comunicaciones 5G*. Cantabria: Unican.
- Altamirano, C., & De Almeida, C. (2016). Inter-user interference reduction factor for 3-d massive MIMO systems. *8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)* , p. 1-5.
- Altamirano, D. (2021). *Performance of massive MIMO Under Interference Reduction and Imperfect Channel Estimation*. Campinas: Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación.
- Amadid, J., Boulouird, M., & Riadi, A. (2022). Channel estimation in massive MIMO-based wireless network using spatially correlated channel-based three-dimensional array. . *Telecommunication Systems*, vol. 79, no 3, p. 323-340.
- Anguís H, J. J. (2008). *Redes de Área Local Inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College*. Sevilla-España: Tesis doctoral para obtener el Título de Ingeniero de las Telecomunicaciones.
- Anzaldo Navarrete, C. A. (2019). *Coordinación de potencia consciente de la interferencia para redes 5G ultra densas (UDN)*. Universidad Autónoma de Baja California: Mexicali.
- Balanis, C. A. (2015). *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons.
- Barnett, T. J., & Khurana, T. (2018). Cisco visual networking index (vni) complete forecast update, 2017–2022. . *Americas/EMEAR Cisco Knowledge Network (CKN) Presentation*, , p. 1-30.

- Björnson, E. S., & Marzetta, T. L. (2019). Massive MIMO is a reality—What is next?: Five promising research directions for antenna arrays. *Digital Signal Processing*, 94, 3-20.
- Blanco Murga, I. R. (2018). MIMO Masivo en 5G: de la teoría a la realidad. *Tono, Revista Técnica De La Empresa De Telecomunicaciones De Cuba S.A.*, 14(2), 35-44.
- Chataut, R., & Akl, R. (2020). Massive MIMO systems for 5G and beyond networks—overview, recent trends, challenges, and future research direction. *Sensors*, 20(10), 2753.
- Chen, X., Zhang, S., & Li, Q. (2018). A review of mutual coupling in MIMO systems. *IEEE Access*, vol. 6, p. 24706-24719.
- Chimeh, J. D. (2020). A New Architecture for Massive MIMO Testbed Laboratory in 5G. *10th International Symposium on Telecommunications (IST)*, pp. 15-19, doi: 10.1109/IST50524.2020.9345868.
- Chung, H., Joo, J., & Kim, S. (2020). Off-grid DoA estimation on non-uniform linear array using constrained hermitian matrix. *Energies*, vol. 13, no 21, p. 5775.
- Cuevas, E. (2017). *Propuesta de aplicación de la tecnología MIMO masivo a las comunicaciones móviles 5G*. Madrid-España: E.T.S.I. Telecomunicación (UPM).
- Datta, T., Srinidhi, N., Chockalingam, A., & Rajan, B. S. (2010). Randomrestart reactive tabu search algorithm for detection in large-MIMO systems. *IEEE Communications Letters*, 14(12), 1107-1109.
- Departamento de Electrónica de KU Leuven. (Febrero de 2019). *Outdoor Collocated/Distributed Experiment massive mimo*. Obtenido de <https://www.esat.kuleuven.be/telemic/research/NetworkedSystems/projects/outdoor-collocated-distributed-experiment>

- Dorize, C., Guerrier, S., Awwad, E., Nwakamma, P. A., Mardoyan, H., & Renaudier, J. (2021). An OFDM-MIMO distributed acoustic sensing over deployed telecom fibers. *In 2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, IEEE. p. 1-3.
- Feng, C. (2023). Near-Field Modelling and Performance Analysis for Extremely Large-Scale IRS Communications. *arXiv preprint arXiv:2303.00459*.
- Frisanco, T., Tafertshofer, P., Lurin, P., & Ang, R. (2008). Infrastructure sharing and shared operations for mobile network operators From a deployment and operations view. *NOMS 2008 - 2008 IEEE Network Operations and Management Symposium*, pp. 129-136.
- Guevara, A. P., Chen, C. M., & Pollin, S. (2018). Hardware and spectrum sharing for distributed massive MIMO. *In 2018 52nd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, (pp. 619-623). IEEE.
- Guo, Y., Zhang, Y., Pang, L., Huang, X., Wu, Y., & Chen, Y. (2023). Optimizing Antenna Topology for Massive MIMO Planar Arrays With Line-of-Sight Deterministic Channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- ITU. (Junio de 2020). *ITU: Comprometida para conectar al mundo*. Obtenido de Reglamento de Radiocomunicaciones: <https://www.itu.int/es/publications/ITU-R/pages/publications.aspx?parent=R-REG-RR-2020&media=electronic>
- Kamel, M., Hamouda, W., & Youssef, A. (2016). Ultra-Dense Networks: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(4), 2522–2545.  
doi:10.1109/comst.2016.2571730.
- Kiomi Teshima, S., & De Almeida, C. (2000). Lower bound on normalised interference mean and standard deviation for CDMA systems using antenna arrays. *Electronics Letters*, 36(21):1761.

- KU Leuven. (28 de Febrero de 2019). *Outdoor Collocated/Distributed Experiment*.  
Obtenido de  
<https://www.esat.kuleuven.be/telemic/research/NetworkedSystems/projects/outdoor-collocated-distributed-experiment>
- Li, X., & al., e. (2022). Modular Extremely Large-Scale Array Communication: Near-Field Modelling and Performance Analysis. *arXiv preprint arXiv:2208.05691*.
- Marzetta, T. L., & Yang., H. (2016). *Fundamentals of Massive MIMO*. Cambridge University Press.
- Méndez, G., Jojoa, P., & Almenar, V. (Julio, 2015). Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para la 5G inalámbrica. *Entramado.*, vol. 11, no. 2, p. 250-261, <http://dx.doi.org/10.18041/entramado.2015v11n2.22240>.
- Monachesi, E., Frenzel, A. M., & Carrasco, G. C. (2011). Conceptos generales de Antenas. *Recuperado de: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/wlan\\_frt/antenas.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/wlan_frt/antenas.pdf)*, p. 20.
- Morales, J. W., Morales, J. C., & Quiñónez, B. C. (2020). La tecnología 5G en el Ecuador. Un análisis desde los requerimientos 5G. . *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, vol. 5, no 2, p. 805-822.
- Motta Vargas, L., & Tejada Vera, X. A. (2018). *Evaluación del desempeño de un sistema híbrido MIMO-beamforming para la cancelación de interferencia*. Neiva-Surcolombia: Tesis Doctoral. Universidad Surcolombiana.
- Ngo, H. Q., Larsson, E. G., & Marzetta, T. L. (2013). Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems. . *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no 4, p. 1436-1449.
- Ngo, H., Larsson, E., & Marzetta, T. (2014). Aspects of favorable propagation in Massive MIMO. *In 2014 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, p. 76-80.

- Nguyen, N. T., & Lee, K. (2020). Deep Learning-Aided Tabu Search Detection for Large MIMO Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19(6), 4262–4275. doi:10.1109/twc.2020.2981919.
- Nguyen, N. T., & Lee., K. (2019). Groupwise Neighbor Examination for Tabu Search Detection in Large MIMO systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(1), 1136-1140.
- Orozco Bermúdez, H. F. (2013). Efectos en la impedancia de entrada de un arreglo lineal uniforme de dipolos de microcinta en presencia de elementos parásitos. *Scientia et technica*, 18(3), 463-470.
- Temiz, M. A., & Zhang, Y. (2020). On the Impact of Antenna Array Geometry on Indoor Wideband Massive MIMO Networks. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*., 1–1. doi:10.1109/tap.2020.3008662.
- Trujillo, P., & Quishpe, L. (2022). Características y ventajas existentes en la conexión inalámbrica y fibra óptica. Una revisión bibliográfica. *E-IDEA Journal of Engineering Science*, vol. 4, no 9, p. 14-25.
- Tse, D., & Viswanath, P. (2005). *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge university press.
- Wu, X., Beaulieu, & Liu, D. (2017). On favorable propagation in massive MIMO systems and different antenna configurations. *IEEE Access*, 5, 5578-5593.