



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIA APLICADAS

GENERACIÓN DE DIAGRAMAS DE RADIACIÓN PARA ARREGLOS DE
ANTENAS CÚBICAS USADAS EN MIMO-3D

AUTOR

ESTEBAN ESPINOSA

AÑO

2020



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

GENERACIÓN DE DIAGRAMAS DE RADIACIÓN PARA ARREGLOS DE
ANTENAS CÚBICAS USADAS EN MIMO-3D.

TRABAJO DE TITULACIÓN PRESENTADO EN CONFORMIDAD CON LOS
REQUISITOS ESTABLECIDOS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
EN REDES Y TELECOMUNICACIONES.

PROFESOR GUIA:

Henry Ramiro Carvajal Mora

AUTOR:

Esteban Salomón Espinosa Delgado

AÑO:

2020

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUIA

“Declaro haber dirigido el trabajo, Generación de diagramas de radiación para arreglos de antenas cúbicas usadas en MIMO-3D, a través de reuniones periódicas con el estudiante Espinosa Delgado Esteban Salomón, en el semestre 202020, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.



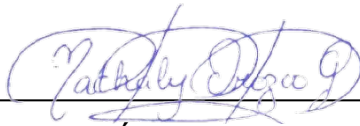
HENRY RAMIRO CARVAJAL MORA

Doctor en Ingeniería Eléctrica en el Área de
Telecomunicaciones y Telemática

CI: 1721327862

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

Declaro haber revisado este trabajo, Generación de diagramas de radiación para arreglos de antenas cúbicas usadas en MIMO-3D, del estudiante Espinosa Delgado Esteban Salomón en el semestre 202020, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación



NATHALY VERÓNICA OROZCO GARZÓN

Doctora en Ingeniería Eléctrica en el Área de
Telecomunicaciones y Telemática

CI: 1720938586

DECLARACIÓN DE AUTORIA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.



ESTEBAN SALOMÓN ESPINOSA DELGADO

CI: 1717911299

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos cercanos que siempre
estuvieron a mi lado animándome en cada
paso de mi formación como profesional.
Por su infinito amor y por su incondicionalidad.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi padre que realiza mucho esfuerzo diariamente por mí y mis hermanos y en especial, lo dedico a mi madre que en paz descansa, que en lugar que se encuentre de seguro está muy orgullosa de la persona y profesional que soy y llegaré a ser.

RESUMEN

Actualmente, con el surgimiento de los sistemas móviles de quinta generación (5G) se espera un cambio significativo en el impacto que la tecnología le ha dado a nuestro diario vivir. Para garantizar una adecuada confiabilidad en los sistemas de telecomunicaciones inalámbricos y aumentar las velocidades de transmisión se han presentado varias técnicas, entre estas destacan los arreglos de antenas. Para 5G se propone el denominado MIMO masivo configurado en arreglos tridimensionales de antenas. Existen varias técnicas de detección cuando se emplean arreglos de antenas. La técnica de detección que presenta un mejor compromiso entre complejidad de implementación y desempeño se conoce como *beamforming*, con la cual el haz de radiación del arreglo de antenas puede ser apuntado en una dirección específica. Para una mejor comprensión del comportamiento de esta técnica de detección y su importancia en las redes futuras de quinta generación, en este trabajo graficamos diagramas de radiación para antenas dispuestas en un arreglo tridimensional. Para esto implementamos un algoritmo en Matlab y analizamos la estructura geométrica de una de las caras del arreglo de antenas. Se encontró una expresión matemática para determinar el vector *beam-steering* de esta cara. Utilizando Matlab generamos los diagramas de radiación en diferentes escenarios y se observó que cuando se aumenta el número de antenas el haz de radiación aumenta su directividad, mientras más antenas, más directivo. Esto quiere decir que elimina de mejor manera la interferencia de usuarios cercanos.

ABSTRACT

Currently, with the emergence of fifth generation (5G) mobile systems, a significant change is expected in the impact that technology has given our daily lives. In order to guarantee adequate reliability in wireless telecommunications systems and to increase transmission speeds, several techniques have been presented, among which are antenna arrangements. For 5G we propose the so-called massive MIMO configured in three-dimensional antenna arrays. There are several detection techniques when using antenna arrays. The detection technique that presents a better compromise between implementation complexity and performance is known as beamforming, with which the radiation beam from the antenna array can be pointed in a specific direction. For a better understanding of the behavior of this detection technique and its importance in future fifth generation networks, in this work we plot radiation diagrams for antennas arranged in a three-dimensional arrangement. For this we implement an algorithm in Matlab and analyze the geometric structure of one of the faces of the antenna array. A mathematical expression was found to determine the beam-steering vector of this face. Using Matlab, we generated the radiation diagrams in different scenarios and it was observed that when the number of antennas is increased, the radiation beam increases its directivity, the more antennas, the more directive. This means that interference is better eliminated.

ÍNDICE

1.	CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Antecedentes.....	1
1.2.	Alcance	2
1.3.	Justificación	2
1.4.	Objetivos.....	3
1.4.1.	General.....	3
1.4.2.	Específicos.....	3
2.	CAPÍTULO II. CONCEPTOS BÁSICOS	4
2.1.	Introducción.....	4
2.2.	Antenas.....	5
2.2.1.	Definición	5
2.2.2.	Patrón de Radiación	5
2.2.3.	Ganancia Directiva	8
2.2.4.	Directividad	8
2.2.5.	Tipos de Antenas.....	9
2.2.5.1.	Isotrópica.....	9
2.2.5.2.	Dipolo de Media Onda	10
2.3.	Interferencia	11
2.4.	Técnicas de Detección.....	13
2.4.1.	Detección de un Solo Usuario.....	13
2.4.2.	Detección Multiusuario.....	15
2.5.	Arreglos de Antenas.....	16
3.	CAPITULO III. TÉCNICAS DE DETECCIÓN PARA UN ARREGLO DE ANTENAS.....	19
3.1.	Introducción.....	19

3.2. <i>Beamforming</i>	20
3.3. Cancelación de Interferencia	23
3.4. Escenario de Aplicación	24
3.4.1. Escenario 1	24
3.4.2. Escenario 2	29
3.4.3. Escenario 3	32
4. CAPITULO IV. DIAGRAMAS DE RADIACIÓN	35
4.1. Introducción	35
4.2. <i>Steering Vector</i> para una Cara del Arreglo Cúbico de Antenas	36
4.3. Algoritmo en Matlab	40
4.4. Diagramas de Radiación	42
5. CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
5.1. Conclusiones	56
5.2. Recomendaciones	57
5.3. Trabajos Futuros	58
Bibliografía	59

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Los sistemas móviles de quinta generación (5G) están siendo investigados, desarrollados e implementados en la actualidad. Con esta nueva tecnología, se espera que se cree un ecosistema que se denomina el internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés, Internet of Things). Este ecosistema dará apertura para que las redes puedan satisfacer las necesidades de millones de dispositivos conectados a internet con mejores características de velocidad, latencia y costo que su antecesor, la cuarta generación (4G) de redes móviles. Para estas redes, el salto tecnológico hacia el 5G significa un aumento considerable en la velocidad de transmisión de datos hasta los Gigabits por segundo (Gbps) (Gopal & Kuppusamy, 2015).

Una de las tecnologías habilitadoras para 5G es la denominada técnica de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) que implica el uso de arreglos de antenas. Una propuesta que permitirá aumentar la eficiencia espectral pues varios usuarios compartirán un mismo recurso de radio. Por otra parte, un arreglo de antenas también permite direccionar el haz de radiación. Así, para 5G se plantea emplear el denominado MIMO-3D (Multiple Input Multiple Output) que permite direccionar el haz de radiación del arreglo no solo en el eje horizontal (azimut) sino también en el eje vertical (elevación). Esta técnica se conoce como *beamforming*. Para esto se investiga arreglos de antenas configuradas en forma de cubos y otras estructuras geométricas (Mumtaz, Rodriguez, & Dai, 2017).

El arreglo de antenas tiene un patrón o diagrama de radiación propio que depende de la configuración de las antenas y del tipo de detector utilizado. De manera específica, uno de los más utilizados es la técnica *beamforming* que se caracteriza porque el diagrama de radiación del arreglo se orienta en una dirección deseada.

1.2. Alcance

El presente estudio pretende obtener los diagramas de radiación de las antenas cúbicas usadas en MIMO-3D utilizando el software de simulación Matlab. Se considerará la técnica *beamforming* para determinar el comportamiento del arreglo de antenas. Como resultado se obtendrán los diagramas de radiación en diferentes escenarios. Específicamente, utilizaremos diferente número de antenas y diferentes configuraciones del cubo realizado.

1.3. Justificación

El inminente despliegue de redes móviles 5G se justifica de sobre manera que las técnicas asociadas se investiguen y analicen. Por lo tanto, el estudio propuesto será de gran utilidad para entender el comportamiento mediante los diagramas de radiación formados por arreglos cúbicos. Así, se puede determinar como la interferencia puede ser mitigada cuando varios dispositivos se encuentran conectados en la misma estación radio base. Con el conocimiento generado a partir de la investigación se puede obtener muchos datos de configuración de las antenas que se usarán para la tecnología 5G y así, optimizar su funcionamiento.

Los algoritmos generados en Matlab serán un insumo para la materia de telefonía celular, pues en esta materia se aborda la temática de arreglos de antenas para redes móviles. De igual manera, es un aporte para la comunidad científica y académica pues se aborda un tópico del estado del arte que está siendo investigado para el desarrollo de redes móviles futuras.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Generar diagramas de radiación para arreglos de antenas cúbicas usadas en MIMO-3D usando la herramienta de simulación MATLAB.

1.4.2. Específicos

Entender el funcionamiento de un arreglo de antenas con respecto a las técnicas utilizadas para mitigar las interferencias.

Analizar las características que hacen que la configuración cúbica del arreglo de antenas sea idónea para su uso dentro de la aplicación de la tecnología de quinta generación (5G).

Simular el arreglo de antenas cúbico en el software MATLAB para visualizar los diagramas de radiación usando diferentes configuraciones de recepción.

2. CAPÍTULO II. CONCEPTOS BÁSICOS

2.1. Introducción

Las comunicaciones inalámbricas, hoy por hoy, conectan el mundo. Millones de personas se comunican diariamente a través del uso de estas redes. Actualmente, la mayoría de los negocios y servicios dependen de las comunicaciones inalámbricas. Por esta misma razón, durante los últimos años la demanda de los servicios inalámbricos por parte de los consumidores ha aumentado exponencialmente. Con el objetivo de satisfacer las necesidades de los consumidores, las tecnologías inalámbricas han evolucionado enormemente. Entre las tecnologías altamente investigadas se encuentra la banda ancha móvil que se refiere a la tecnología emergente de quinta generación (5G) (Maniewicz, 2019).

Uno de los principales problemas en las comunicaciones inalámbricas es la interferencia. Interferencia es todo aquello que modifica una señal durante su camino hacia el receptor desde el transmisor. Existen muchos tipos de interferencia que se generan durante el proceso de transmisión de una señal, tanto en los equipos de transmisión y recepción como en el medio de transmisión (Carvajal Mora, 2018). Con el uso de arreglos de antenas y la aplicación de técnicas de detección, se logra mitigar gran cantidad de los efectos de la interferencia en la señal original ya que se apunta un haz directivo hacia el usuario de interés.

Este capítulo tiene como objetivo mostrar los conceptos básicos que serán de utilidad para entender el análisis realizado en los siguientes capítulos. En la Sección 2.2 se presenta el concepto de antena, sus tipos y características, en la Sección 2.3

se explican el concepto de interferencia y sus diferentes tipos, en la Sección 2.4 se presentan las técnicas de detección y los diferentes métodos, y, por último, en la Sección 2.5 se explican las características de los arreglos de antenas.

2.2. Antenas

2.2.1. Definición

Se puede definir una antena como un conductor o un conjunto de conductores usados ya sea para el envío de energía electromagnética o para la recepción de la misma (Balanis, 2011). El término antena también se define como la parte de un sistema transmisor o receptor diseñada específicamente para radiar o recibir ondas electromagnéticas (IEEE Standards Association, 2013). Con estas definiciones se puede inferir que la antena es una parte fundamental de un sistema de comunicaciones inalámbricas.

Las antenas tienen varios parámetros de funcionamiento importantes que se deben conocer. A continuación, se explicarán cada una de ellas.

2.2.2. Patrón de Radiación

Es una representación gráfica de la forma en que la antena irradia potencia en función de las distintas direcciones del espacio tomando en cuenta una distancia fija (Murillo Fuentes, 2013).

El diagrama de radiación se representa con un gráfico en tres dimensiones. Como se puede observar en la *Figura. 1* se presenta un diagrama de radiación en 3D de una antena dipolo. La *Figura. 2* muestra el diagrama de radiación considerando un corte horizontal (ángulo azimut) y la *Figura. 3* considera un corte vertical del diagrama de radiación (ángulo de elevación).

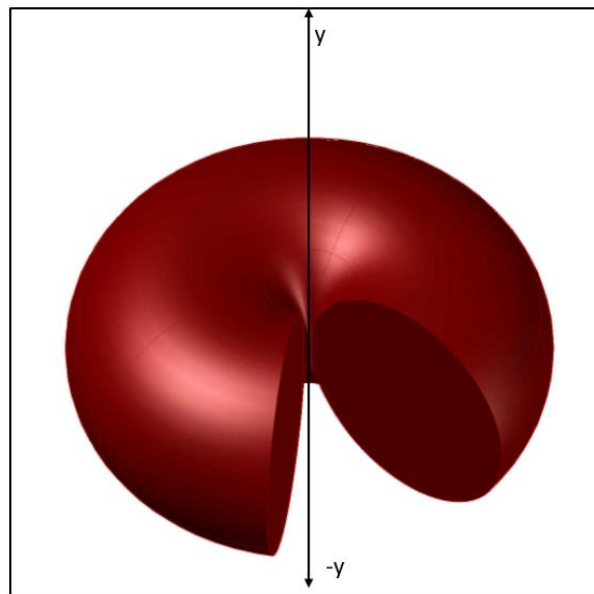


Figura. 1 Diagrama de radiación 3D de una antena dipolo

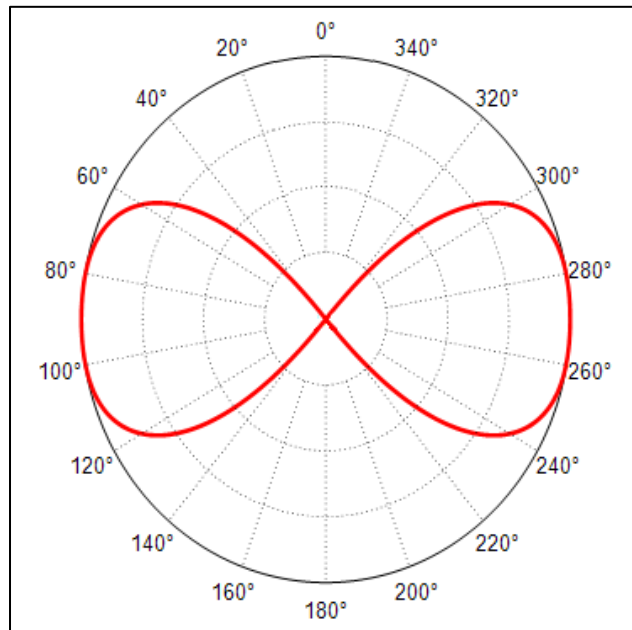


Figura. 2 Diagrama de radiación del plano horizontal de una antena dipolo

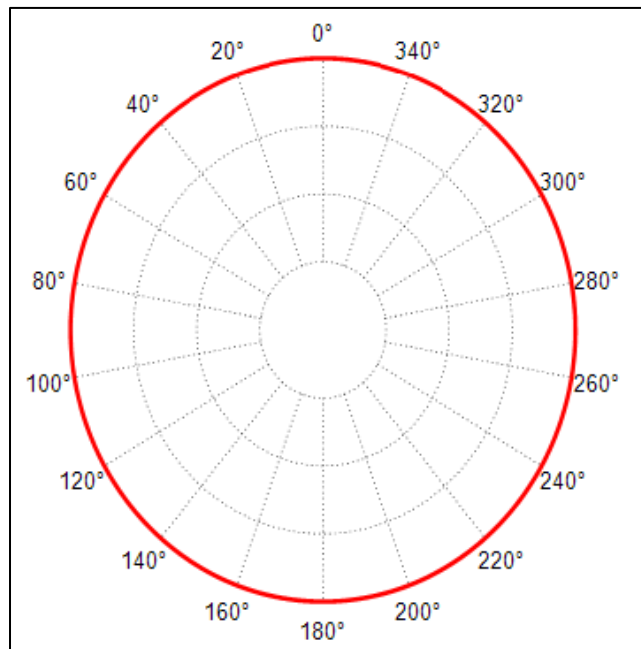


Figura. 3 Diagrama de radiación del plano vertical de una antena dipolo

2.2.3. Ganancia Directiva

La ganancia directiva describe cómo la antena reparte la potencia que se irradia hacia el espacio. Se toma como patrón la antena isotrópica la cual irradia la potencia de igual forma en todas las direcciones. De esta manera, la ganancia directiva proporciona, para cada dirección o ángulo, la ganancia de potencia con respecto a una antena isotrópica que irradie la misma potencia. La ganancia de una antena se mide en dBi (Murillo Fuentes, 2013).

El punto P en la *Figura. 4* es la densidad de potencia de la antena directiva. La ganancia directiva es la relación que existe entre la densidad de potencia de la antena directiva y la densidad de potencia de la antena isotrópica

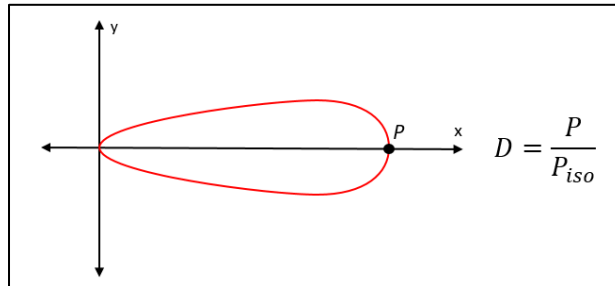


Figura. 4 Representación de la ganancia directiva junto con su ecuación

2.2.4. Directividad

Se define como la relación que hay entre la máxima intensidad de radiación de una antena y la intensidad de radiación de una antena isotrópica. La directividad de una antena se mide también en dBi, lo cual indica los dB respecto a la antena isotrópica (UIT-R, 1998).

Para entender el concepto de directividad de mejor manera, se puede decir que la directividad es un parámetro que indica la cantidad de energía que llega a un determinado punto.

2.2.5. Tipos de Antenas

Existe una gran variedad de tipos de antenas según el uso que se le quiera dar a la misma, por ejemplo, la antena yagi, antenas parabólicas, antenas tipo corneta, entre otras. En algunos casos, se busca que la antena sea directiva, por ejemplo, las antenas parabólicas. En otro caso por ejemplo se busca que la antena irradie en todos los sentidos como en el caso de los routers WiFi empleados en el hogar. A continuación, se presenta los tipos de antenas que se van a utilizar en el presente trabajo.

2.2.5.1. Isotrópica

Es un concepto de antena hipotético e idealizado. Es una antena sin pérdidas que irradia la misma potencia en todas las direcciones (IEEE Standards Association, 2013). Sirve como base de referencia para evaluar parámetros como la directividad en antenas reales y las pérdidas por propagación en espacio libre. Su diagrama de radiación es una esfera (Huidobro, 2013). La *Figura. 5* muestra un corte transversal del diagrama de radiación de la antena isotrópica.

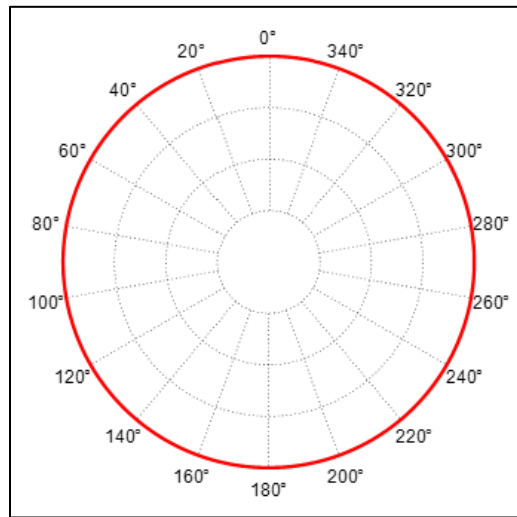


Figura. 5 Diagrama de radiación horizontal o vertical de una antena isotrópica.

2.2.5.2. Dipolo de Media Onda

Es una antena lineal constituida por un hilo conductor, cuya longitud total es $\lambda/2$, es decir, la mitad de su longitud de onda, es una antena que se usa mucho debido a que tiene una impedancia de radiación adecuada y emite radiación en forma omnidireccional, es decir, irradia hacia todas las direcciones del plano horizontal (Murillo Fuentes, 2013). La representación gráfica de este dipolo se muestra en la *Figura. 6*. Por otra parte, el corte transversal horizontal, o diagrama de radiación horizontal se muestra en la *Figura. 7*.

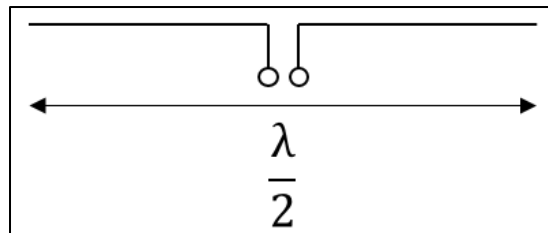


Figura. 6 Representación gráfica del dipolo de media onda.

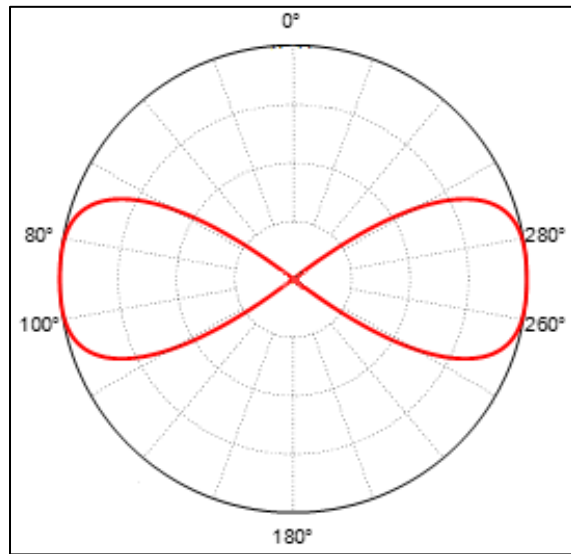


Figura. 7 Diagrama de radiación de un dipolo de media onda

2.3. Interferencia

Es toda señal no deseada que llega al receptor y puede ser considerada como la principal limitante en la capacidad de los sistemas inalámbricos. En la arquitectura celular, la interferencia se puede producir de varias maneras. Primeramente, la interferencia se puede producir en la misma célula. Segundo, se puede producir durante una llamada en progreso en una célula adyacente, otras radio-bases cercanas operando en la misma frecuencia. Por último, la interferencia es posible que se origine por cualquier otro sistema no necesariamente celular que intervenga en la misma banda de frecuencia (Rappaport, 2001). En el canal ascendente (*uplink*) la interferencia es producida por otros usuarios conectados a la misma célula o en las co-células que emplean los mismos recursos de radio que un usuario de interés. Para el canal descendente (*downlink*), la interferencia es producida por las estaciones base en las co-células. Generalmente, la interferencia que afecta al canal ascendente es mayor que la que afecta al canal descendente. (Daoud Yacoub, 2001)

La interferencia de co-canal o interferencia de las co-células (CCI) se produce en células que utilizan los mismos recursos de radio como se observa en la *Figura. 8*. Este tipo de interferencia no se mitiga aumentando la relación señal ruido (SNR), como si se contrarresta al ruido térmico. La interferencia de co-canal debe ser mitigada de diferente manera que al ruido térmico ya que, si se aumenta la potencia de transmisión, entonces también aumenta la interferencia que se genera en las co-células. Para reducir la CCI se debe separar físicamente las células a una distancia suficiente para que se propague las señales transmitidas y estas se atenúen al viajar una determinada distancia (Rappaport, 2001). No obstante, el utilizar arreglos de antenas que permitan mitigar los niveles de interferencia es también una interesante solución.

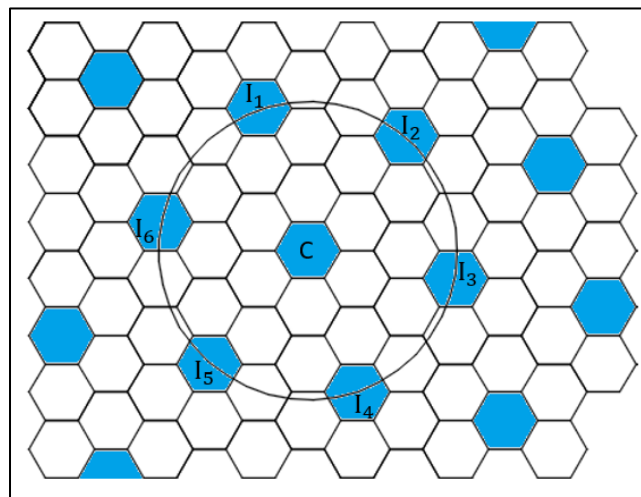


Figura. 8 Malla de células. Célula de referencia tiene 6 células interferentes.

La interferencia de múltiple acceso (MAI) se produce por otros usuarios conectados a la misma célula. Esta interferencia es propia del diseño del sistema y puede ser mitigada usando detectores multiusuario y/o arreglos de antenas. No obstante, si esta interferencia no es mitigada, la misma puede reducir considerablemente la capacidad del sistema e incrementar la tasa de error de bit (BER). Por lo tanto,

reducir esta interferencia es muy importante para el desempeño del sistema (Mahmood, Asad, Moinuddin, Zerguine, & Cheded, 2016).

2.4. Técnicas de Detección

Las técnicas de detección de datos se clasifican en detección de un solo usuario (SUD, del inglés: *single user detector*) y detección multiusuario (MUD, del inglés: *multiuser detector*). La técnica SUD se enfoca en detectar a un usuario de interés sin tomar en cuenta la interferencia de múltiple acceso. Si no existe interferencia de múltiple acceso, SUD se considera una técnica óptima. En el caso de que exista interferencia de múltiple acceso, la técnica MUD tiene un mejor desempeño (Carvajal Mora, 2018).

2.4.1. Detección de un Solo Usuario

En este tipo de técnica se usa las llamadas técnicas de diversidad. Las técnicas de diversidad permiten descomponer a una señal en réplicas de la misma y transmitirla por distintos canales. Si estos canales varían independientemente, la probabilidad de que se dé un desvanecimiento simultáneamente en todos los canales es baja. En la práctica, los canales no suelen ser totalmente independientes, sin embargo, con un índice de correlación bajo se puede disminuir la relación señal a ruido (SNR) media y de esta manera alcanzar una probabilidad mínima de indisponibilidad. La clasificación de la diversidad depende del parámetro en el que se esté interesado. Se clasifican de la siguiente forma. Primeramente, según el extremo del sistema en que se implementen, donde se tiene a la diversidad en recepción y la diversidad en transmisión. Segundo, según el fenómeno físico que se usa para diferenciar las réplicas de la señal original donde se tiene la diversidad de espacio, la diversidad de frecuencia, la diversidad de tiempo y la diversidad de polarización. Por último,

según la forma en que se usan las réplicas de la señal donde se tiene a la diversidad por selección, diversidad por realimentación diversidad por combinación de razón máxima (MRC, del inglés: Maximal Ratio Combining) y la diversidad por ganancia constante (EGC). (Proakis & Salehi, 2008)

La *Figura. 9* muestra el diagrama de bloques del combinador MRC, en el cual, cada una de las señales recibidas se multiplica por una ganancia que es proporcional a su relación señal-ruido instantánea. Ya que las señales se suman coherentemente, es necesario un circuito de compensación de fase ubicado antes de la etapa de combinación. Por lo tanto, cada señal se multiplica por un factor $\alpha_l \exp(-i\phi_l)$, donde α_l y ϕ_l son la amplitud del desvanecimiento¹ y la fase del canal que afecta a la réplica l –ésima de la señal.. En la *Figura. 9* se considera un número L de ramas de diversidad. La muestra en la salida del combinador o antes de la etapa del *Demapper* puede escribirse de la siguiente manera (Carvajal Mora, 2018).

$$z = \frac{h^H y}{h^H h}$$

(Ecuación 1)

Donde $(.)^H$ denota la transpuesta Hermitiana, $y = (y_1, y_2, \dots, y_L)^T$ es el vector de la señal recibida, $h = (G_1, G_2, \dots, G_L)^T$ es el vector que contiene las ganancias de los canales, por consiguiente, $G_l = \alpha_l \exp(i\phi_l)$. Además, el resultado es normalizado por $h^H h$, donde permite a la constelación usada en el *Demapper* a ser igual a la usada en el *mapper*, es decir, la constelación usada para estimar el símbolo recibido no debe ser modificada debido a los desvanecimientos en la amplitud.

¹ Desvanecimiento es una atenuación producida por el canal inalámbrico en las señales transmitidas y que se genera por el fenómeno de propagación en múltiples trayectos.

Desafortunadamente, la técnica MRC presenta un muy mal desempeño cuando existe presencia de interferencia. Específicamente, en su afán de maximizar la relación señal a ruido, el detector también maximiza la potencia de la interferencia, lo que implica un bajo desempeño del sistema (Shah & Haimovich, 2000).

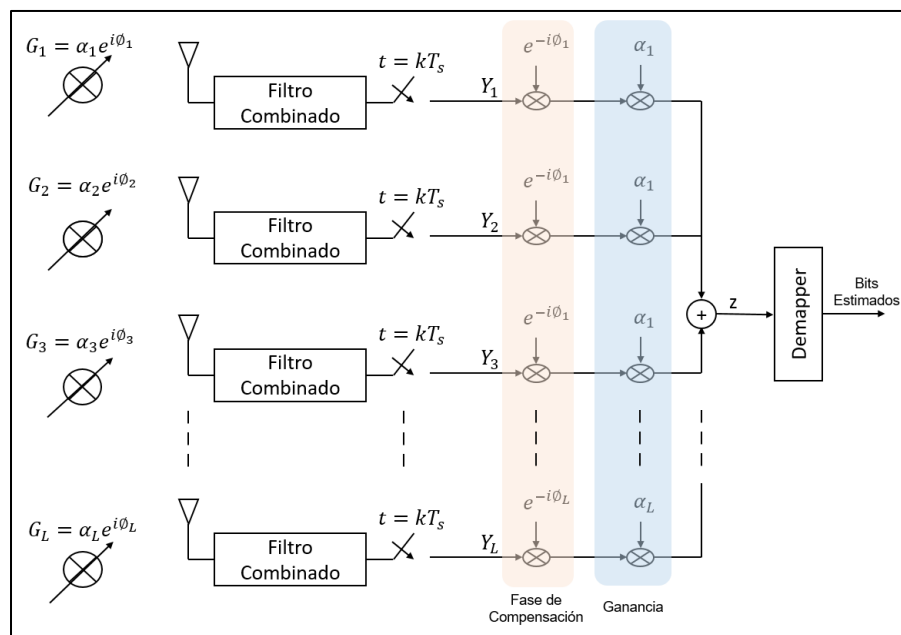


Figura. 9 Diagrama de bloques *Maximal Ratio Combining*

2.4.2. Detección Multiusuario

La detección multiusuario aprovecha la estructura de la transmisión multiusuario para poder incrementar la capacidad de los canales de radio empleados, es decir, la detección multiusuario permite que múltiples usuarios utilicen el mismo canal o múltiples canales de forma simultánea. Generalmente, en un escenario multiusuario donde las técnicas de diversidad son consideradas, las señales recibidas pueden ser descritas en una matriz de la forma

$$y = \sum_{l=1}^u h_l s_l + n$$

(Ecuación 2)

$$y = H_s + n$$

(Ecuación 3)

Donde “u” es el número de usuarios que están transmitiendo, $H = (h_1, h_2, \dots, h_u)$, donde $h_l = (G_{1,l}, G_{2,l}, \dots, G_{L,l})^T$ es el vector que contiene la ganancia de los canales el usuario l-ésimo. Además, $s = (s_1, s_2, \dots, s_u)^T$, donde s_l es el símbolo transmitido por el usuario l-ésimo. Finalmente, $n = (n_1, n_2, \dots, n_u)^T$ es el vector del ruido y sus elementos tiene una varianza de σ_n^2 . Por lo tanto, el objetivo de la detección multiusuario es el de recuperar el vector del símbolo “s” para minimizar la tasa de error de bit media.

El objetivo principal de la detección multiusuario es la de minimizar la tasa de error de bit, pues permite mitigar o eliminar la interferencia. Las técnicas más usadas son: *beamforming*, *maximal ratio combining* y cancelación de interferencia. En este trabajo nos enfocamos en técnicas de detección que se utilizan junto con arreglos de antenas. Sin embargo, estas técnicas se describirán en el siguiente capítulo con mayor detalle.

2.5. Arreglos de Antenas

Un arreglo de antenas es una agrupación de Y antenas que se usan para transmitir y/o recibir señales electromagnéticas. Las antenas se distribuyen espacialmente en

patrones geométricos. El arreglo lineal y el circular son los patrones geométricos más usados. Su forma de distribución se observa en la *Figura. 10*. En el arreglo lineal, las antenas son ubicadas sobre una misma línea recta y las antenas se separan de forma equidistante. Por otra parte, en el arreglo circular, las antenas son colocadas en el perímetro de una circunferencia y separadas equidistantemente. (Huidobro, 2013)

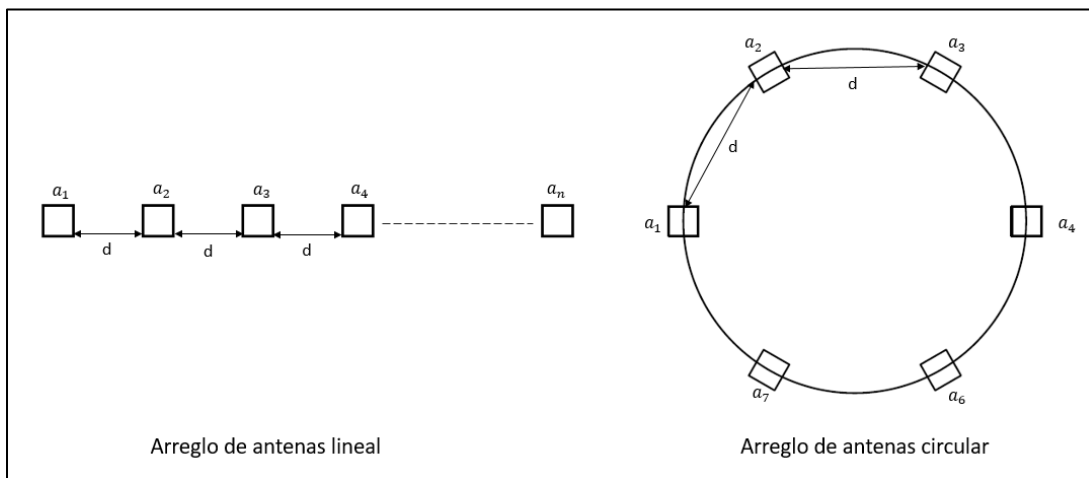


Figura. 10 Arreglos de antenas más usados

Las señales recibidas en el arreglo de antenas mantienen una relación de amplitud y fase, las cuales dependen del patrón geométrico que se utilice. Una agrupación de antenas ayuda a incrementar la directividad en una dirección específica y, por lo tanto, permite disminuir los niveles de interferencia. A continuación, consideramos un arreglo lineal de antenas, el cual es paralelo al eje horizontal.

Como se puede observar en la *Figura. 11* la d es la distancia que existe entre antenas adyacentes. Se considera que la señal llega desde un usuario k -ésimo, considerado como el usuario de interés, que está localizado en un ángulo θ con respecto al eje de las ordenadas. (Carvajal Mora, 2018)

Si la señal viaja una distancia igual a la longitud de onda de la portadora λ , la fase cambia 2π radianes. Entonces, la diferencia de fase entre señales que llegan a dos antenas adyacentes se puede representar matemáticamente como

$$\gamma_k = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin\theta_k,$$

(Ecuación 4)

Usando geometría básica se puede establecer que la diferencia de fase entre dos señales que llegan a la a -ésima antena y a la primera antena está dado por

$$\Delta_{Y_k,a} = (a - 1)Y_k, \quad a \in \{1, 2, \dots, Y\},$$

(Ecuación 5)

La ecuación 5 puede ser escrita como un vector el cual se lo llama *steering vector* y se lo representa de la siguiente manera

$$a_k = \{1, \exp(i\Delta Y_{k,1}), \exp(i\Delta Y_{k,2}), \dots, \exp(i\Delta Y_{k,Y})\}^T,$$

(Ecuación 6)

En la *Figura. 11*, se puede observar que se usa una etapa combinatoria, donde cada señal recibida es ponderada por un peso complejo w_a , donde $a \in \{1, 2, \dots, Y\}$. Se muestra que el haz del arreglo de antenas se puede dirigir hacia la ubicación del usuario objetivo (*beam-steering*) o el haz se puede emplear para cancelar las señales transmitidas por los interferentes (cancelación de interferencia) ya que el vector de peso $w = (w_1, w_2, \dots, w_Y)^T$ esta adecuadamente seleccionado. (Carvajal Mora, 2018)

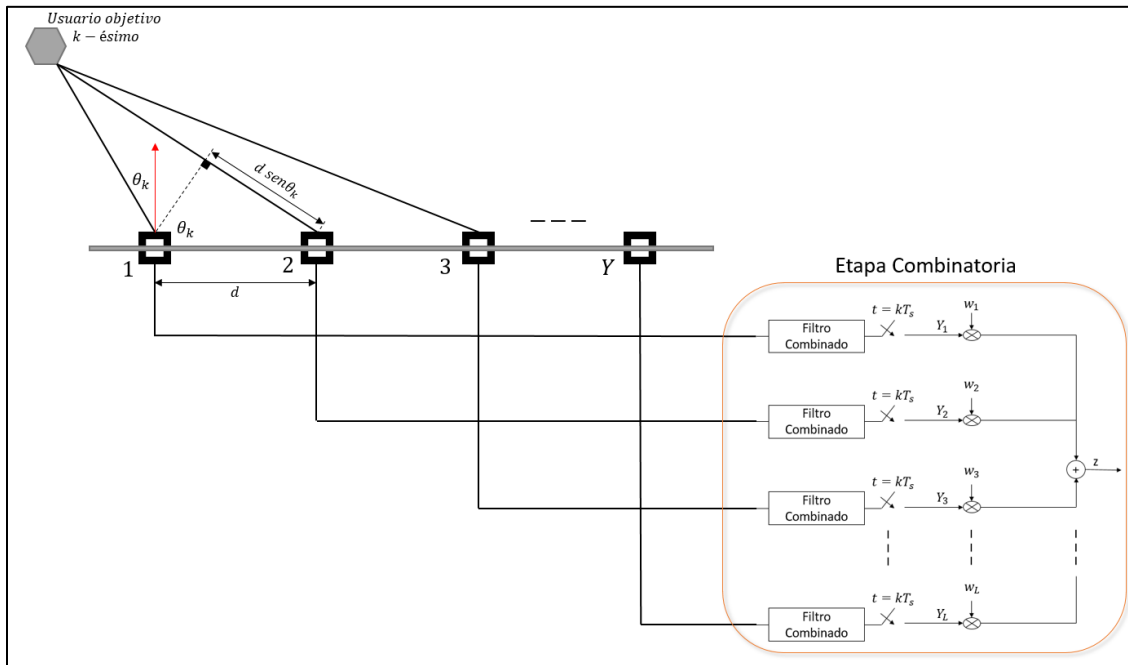


Figura. 11 Arreglo de antenas horizontal

El haz de radiación del arreglo de antenas puede ser dirigido hacia la ubicación del usuario objetivo, lo que permiten también cancelar o disminuir las señales interferentes (Carvajal Mora, 2018). Esto se logra con técnicas de detección que serán explicadas en el siguiente capítulo.

3. CAPITULO III. TÉCNICAS DE DETECCIÓN PARA UN ARREGLO DE ANTENAS

3.1. Introducción

Los arreglos de antenas son de gran importancia en los sistemas de comunicaciones inalámbricas. Con estos arreglos se puede controlar, ajustar o modificar electrónicamente la potencia de la corriente y la fase de cada señal

irradiada en cada antena de forma individual y de esta forma se cambia la forma del patrón de radiación.

Con la introducción de nuevas tecnologías en comunicaciones móviles, se buscan nuevas maneras de aumentar la capacidad de conexión para múltiples usuarios. (Huidobro, 2013). Entre estas técnicas tenemos el *beamforming* (también conocida como *beam-steering*) y la técnica de cancelación de interferencia. *Beamforming* es la tecnología que se busca usar en las redes móviles 5G que apunta el diagrama de radiación del arreglo en una dirección deseada, es decir, ayuda a disminuir la interferencia producida por usuarios cercanos al usuario de interés (Nordrum & Clark, 2017).

En este capítulo se describen los principales mecanismos de detección utilizados en arreglos de antenas. Específicamente nos centramos en las estas técnicas *beamforming* y de cancelación de interferencia. En la sección 3.2. se explica la técnica de detección *beamforming*, su funcionamiento y características. En la sección 3.3. se detalla la técnica de detección multiusuario de cancelación de interferencia, su comportamiento y características. Finalmente, en la sección 3.4. se muestran varios ejemplos para entender de mejor manera el funcionamiento de estas técnicas de detección y varios diagramas de radiación aplicando estas técnicas.

3.2. *Beamforming*

Es una técnica que se utiliza en arreglos de antenas que puede tener cualquier tipo de geometría. *Beamforming* es una solución que ayuda a la formación de haces de

radiación más directivos que apuntan hacia los usuarios de interés del sistema (Nordrum & Clark, 2017). A continuación, se explica el funcionamiento de esta técnica.

Se considera un escenario de banda base libre de ruido para el análisis. Usando la ecuación 5 y la ecuación 6, la señal en la salida del combinador para el usuario k -ésimo puede escribirse como se muestra a continuación. La ecuación 7 y ecuación 8 fueron tomadas de (Barry, Lee, & Messerschmitt, 2004).

$$Z_k = \sum_{a=1}^Y w_a y_{a,k},$$

(Ecuación 7)

$$Z_k = S_k \sum_{a=1}^Y w_a \exp[i(a-1)\varphi_k],$$

(Ecuación 8)

dónde la sumatoria $\sum_{a=1}^Y w_a \exp[i(a-1)\varphi_k]$ se representa de aquí en adelante por $A(\theta_k)$. En la *Ecuación 8*, S_k es el símbolo transmitido por el usuario k -ésimo, es decir, el usuario de interés y $y_{a,k}$ es la muestra de la señal recibida en la antena a -ésima desde el usuario k -ésimo. Note que $A(\theta_k)$ establece la relación entre las señales de salida y de entrada en el arreglo de antenas.

Para poder dirigir el haz, $A(\theta_k)$ debe ser maximizado en la dirección que se desea, pero dado que este factor es un número complejo, se debe maximizar el módulo de este, es decir, $|A(\theta_k)|$. En el caso de que $w_a = \exp[i(a-1)\varphi_0]$, entonces $A(\theta_k)$ puede describirse de la siguiente manera. La ecuación 9 y ecuación 10 fueron tomadas de (Barry, Lee, & Messerschmitt, 2004).

$$A(\theta_k) = \sum_{a=1}^Y \exp[i(a-1)(\varphi_k - \varphi_0)],$$

(Ecuación 9)

$$A(\theta_k) = \sum_{a=1}^Y \exp \left[i \frac{2\pi d}{\lambda} (a-1) (\sin \theta_k - \sin \theta_0) \right],$$

(Ecuación 10)

Usando la desigualdad $|\sum_a x_a| \leq \sum_a |x_a|$, entonces se determina que $|A(\theta_k)| \leq Y$ Por lo tanto, Y es el máximo valor que el módulo del factor del vector va a poder alcanzar. Por lo tanto, el patrón de radiación del vector es dirigido hacia la dirección del ángulo θ_k cuando los pesos de la etapa de combinación están descritos por $w_a = \exp \left[-i \frac{2\pi d}{\lambda_w} (a-1) \sin \theta_0 \right]$, para $a \in \{1, 2, \dots, Y\}$. El vector del patrón de radiación va dirigido hacia la dirección del usuario de interés si el vector de pesos utilizado en el combinador (véase *Figura. 11*) es escrito de la siguiente manera. La ecuación 11 fue tomada de (Barry, Lee, & Messerschmitt, 2004).

$$w = \left\{ 1, \exp \left[-i \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_k \right], \exp \left[-i \frac{4\pi d}{\lambda} \sin \theta_k \right], \dots, \exp \left[-i \frac{2\pi d}{\lambda} (Y-1) \sin \theta_k \right] \right\}^T = a_k^*,$$

(Ecuación 11)

En donde $(.)^*$ indica conjugado y a_k es el *steering vector* dado por la Ecuación 6. Cada elemento muestra la diferencia de fase que existe entre cada antena con respecto a la primera antena en el arreglo. Para clarificar el concepto, se puede decir que el primer elemento considera la diferencia de fase que existe con respecto a la primera antena, es decir, a sí misma. Es por este motivo que este valor es igual a 1, pues la diferencia de fases aparece en el exponente y cualquier valor elevado a 0 es 1. El exponente del segundo elemento del vector $a_2 = \exp \left[-i \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_k \right]$ contiene la diferencia de fase que existe entre la segunda y la primera antena. El exponente del tercer elemento del vector $a_3 = \exp \left[-i \frac{4\pi d}{\lambda} \sin \theta_k \right]$ muestra la diferencia de fase que existe entre la primera y la tercera antena y así sucesivamente.

La muestra del símbolo del usuario de interés a la salida del combinador se puede escribir como se muestra a continuación. La ecuación 12 fue tomada de (Barry, Lee, & Messerschmitt, 2004).

$$Z_k = \frac{w^H y}{w^H w} = \frac{1}{Y} a_k^H,$$

(Ecuación 12)

Donde $y = (y_1, y_2, \dots, y_Y)^T$ es el vector de recepción que contiene todas las señales recibidas en el arreglo. El patrón de radiación del vector puede expresarse como $R(\theta) = |a^H a(\theta)|$ (Barry, Lee, & Messerschmitt, 2004).

3.3. Cancelación de Interferencia

Esta técnica se basa en la creación de un patrón de radiación que es igual a cero en las posiciones (ángulos) de los interferentes y es usada también junto con arreglos de antenas. Para cualquier arreglo de Y antenas es posible eliminar hasta $Y-1$ señales interferentes. Para un arreglo de antenas lineal uniforme con Y antenas y la existencia de N número de usuarios. El vector de pesos debe ser seleccionado de manera que la potencia recibida por el usuario de interés sea maximizada y la potencia recibida por la interferencia sea cancelada como se muestra a continuación. La ecuación 13 fue tomada de (Carvajal Mora, 2018).

$$w^H A = C_k,$$

(Ecuación 13)

Donde $A = (a_1, a_2, \dots, a_N)$ es una matriz de orden $Y \times N$ que cuya k -ésima columna es el *steering vector* para el usuario k -ésimo, para $k = 1, 2, \dots, N$ usuarios y C_k es un vector columna N -dimensional en el que su k -ésimo elemento es 1 y los demás

elementos son 0. Entonces, considerando que el k-ésimo usuario es el usuario de interés, la solución de la Ecuación 10 puede mostrarse de la siguiente manera. La ecuación 14 fue tomada de (Carvajal Mora, 2018).

$$w = (AA^H)^{-1}a_k,$$

(Ecuación 14)

Con lo que finalmente el patrón de radiación del arreglo está dado por $R(\theta) = |w^H a(\theta)|$. (Carvajal Mora, 2018).

3.4. Escenario de Aplicación

En esta sección presentamos algunos escenarios en los que mostramos los diagramas de radiación obtenidos con las técnicas antes indicadas.

3.4.1. Escenario 1

Considere un arreglo lineal con $Y = 2$ antenas de transmisión. Como se muestra en la *Figura. 12*, en el sistema existe la presencia de un usuario de interés y un usuario interferente. La señal transmitida por el usuario de interés llega al arreglo con un ángulo de 30° y es atenuada por un factor de 0,7. Además, una réplica de la señal llega al arreglo con un ángulo de 45° y es atenuada por un factor de 0,3. En adición, la señal transmitida por el interferente llega al arreglo con un ángulo de 60° y es atenuada por un factor de 0,5. Bajo estos valores se calculan los siguientes parámetros:

- El steering vector del arreglo de antenas considerando que la distancia entre antenas es $d = \lambda/2$.
- La ganancia del canal para cada usuario en forma de vector.
- Para la técnica beam-steering, el peso del vector empleado en el combinador
- Para la técnica de cancelación de interferencia, el peso del vector usado en el combinador
- Para la técnica MRC, el peso del vector usado en el combinador

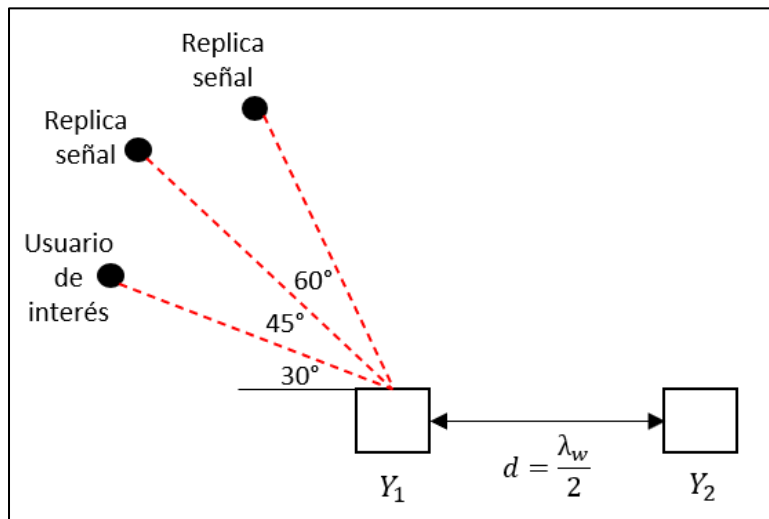


Figura. 12 Representación gráfica del escenario 1

Datos:

$$Y = 2$$

$$\text{Usuario de interés: } \sphericalangle 30^\circ; \alpha_{1,1} = 0,7 \quad \sphericalangle 45^\circ; \alpha_{1,2} = 0,3$$

$$\text{Usuario interferente: } \sphericalangle 60^\circ; \alpha_2 = 0,5$$

- Si $d = \frac{\lambda}{2}$, entonces el steering vector es igual a:

Usando la ecuación 6, se obtiene la siguiente expresión,

$$\mathbf{a}(\theta) = \{1, \exp(j\pi \sin \theta)\}^T.$$

(Ecuación 15)

b. Para el usuario de interés:

Usando la ecuación 3 donde se tiene el vector “h”, reemplazando los valores en la matriz, se obtiene la siguiente expresión para h_1 y h_2 ,

$$h_1 = \alpha_{1,1}a(30^\circ) + \alpha_{1,2}a(45^\circ),$$

$$h_1 = 0,7 \left(e^{j\pi \sin 30^\circ} \right) + 0,3 \left(e^{j\pi \sin 45^\circ} \right),$$

Usando la fórmula de Euler se obtiene

$$h_1 = 0,7 \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix} + 0,3 \begin{pmatrix} 1 \\ -0,61 + j0,80 \end{pmatrix},$$

Resolviendo las operaciones matriciales se obtiene

$$\mathbf{h}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -0,18 + j0,94 \end{pmatrix}.$$

(Ecuación 16)

Para el usuario interferente:

$$h_2 = \alpha_2 a(60^\circ),$$

$$h_2 = 0,5 \left(e^{j\pi \sin 60^\circ} \right),$$

$$h_2 = 0,5 \begin{pmatrix} 1 \\ -0,91 + j0,41 \end{pmatrix},$$

$$h_2 = \begin{pmatrix} 0,5 \\ -0,455 + j0,205 \end{pmatrix}.$$

(Ecuación 17)

h_1 y h_2 son los vectores de ganancia de canal para cada usuario

c. $w = a_k^*$ Para beam-steering

Para el usuario de interés, el steering vector es:

$$a_1(30^\circ) = \begin{pmatrix} 1 \\ e^{j\pi \sin 30^\circ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix},$$

Por lo tanto

Sacando la transpuesta, se obtiene el vector de peso usado en el combinador

$$w = a_1^* = \begin{pmatrix} 1 \\ -j \end{pmatrix}.$$

(Ecuación 18)

d. Para la cancelación de interferencia:

Usando la ecuación 14, se obtiene

$$w = (A A^H)^{-1} a_k,$$

En este caso, como existe un canal con ganancias, el vector de pesos es igual a:

$$w = (H H^H)^{-1} h_k,$$

Donde:

- k es el usuario de interés (k=1)
- El vector de ganancia de canal es

$$H = (h_1 \quad h_2) = \begin{pmatrix} 1 & 0,5 \\ 0,18 + j0,94 & 0,455 + j0,205 \end{pmatrix},$$

Por lo tanto, usando la Ecuación 14 se obtiene:

$$w = (H H^H)^{-1} h_1,$$

$$w = \begin{pmatrix} 5,7265 + j0 & 2,0029 + j5,1241 \\ 2,0029 - j5,1241 & 6,1440 + j0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -0,18 + j0,94 \end{pmatrix},$$

$$w = \begin{pmatrix} \mathbf{0,5493 + j0,9604} \\ \mathbf{0,897 + j0,6513} \end{pmatrix}.$$

(Ecuación 19)

e. Para MRC:

Por el concepto explicado en la sección 2.5 sobre el uso de vector de peso el *Maximal Ratio Combining*, se obtiene

$$w = h_1,$$

$$w = \begin{pmatrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{-0,18 + j0,94} \end{pmatrix}.$$

(Ecuación 20)

3.4.2. Escenario 2

En el escenario anterior, suponga que el usuario de interés transmite un símbolo $s_1 = +1$ y el usuario interferente transmite un símbolo $s_1 = -1$. Adicionalmente, la señal que recibe cada antena es afectada por un ruido blanco Gaussiano aditivo (AWGN). Específicamente, el ruido añadido a la señal llega a la primera antena es $n_1 = 0,1$ y el ruido añadido a la señal llega a la segunda antena es $n_2 = -0,25$. Bajo estos valores se calculan los siguientes parámetros:

- Las señales en la entrada del combinador
- El símbolo por el cual el receptor decide cuando la técnica de *beam-steering* es empleada.
- El símbolo por el cual el receptor decide cuando la técnica de cancelación de interferencia es empleada.
- El símbolo por el cual el receptor decide cuando la técnica de MRC es empleada.

DATOS

$$s = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$n = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,1 \\ -0,25 \end{pmatrix}$$

Del ejercicio anterior $H = \begin{pmatrix} 1 & 0,5 \\ -0,18 + j0,94 & -0,455 + j0,205 \end{pmatrix}$,

- Usando la ecuación 2, se obtiene

$$y = H_s + n,$$

Reemplazando los valores obtenidos en el ejercicio anterior del vector de ganancia de canal y el vector de ruido dado por el escenario 2, se obtiene

$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0.5 \\ -0,18 + j0,944 & -0,455 + j0,205 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0,1 \\ -0,25 \end{pmatrix},$$

$$y = \begin{pmatrix} 0,6 \\ 0,025 + j0,735 \end{pmatrix}.$$

(Ecuación 21)

Dónde:

- “0.6” es la señal en la primera entrada del combinador.
- “0.025+j0.735” es la señal en la segunda entrada del combinador.

b. Para la salida del combinador para el k-ésimo usuario con *beam-steering*

$$Z_k = \frac{1}{r} a_k^H y,$$

$$Z_k = \frac{1}{r} a_1^H y,$$

$$Z_k = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix}^H \begin{pmatrix} 0,6 \\ 0,025 + j0,735 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} (1 \quad -j) \begin{pmatrix} 0,6 \\ 0,025 + j0,735 \end{pmatrix},$$

$$Z_1 = 0,6675 - j0,0125,$$

Como los símbolos transmitidos son reales:

$$\mathbf{Re}\{Z_1\} = \mathbf{0,6675}.$$

(Ecuación 22)

Por el criterio de distancia mínima, el receptor decide por el símbolo +1

c.

- El k-ésimo usuario (usuario de interés)

Se usa la Ecuación 12, donde la muestra del símbolo del usuario de interés a la salida del combinador es

$$Z_k = \frac{w^H y}{w^H w},$$

- Vector de pesos para cancelamiento de la interferencia del ejercicio anterior

$$w = \begin{pmatrix} 0,5493 + j0,9604 \\ 0,897 + j0,6513 \end{pmatrix},$$

$$Z_1 = \frac{\begin{pmatrix} 0,5493+j0,9604 \\ 0,897+j0,6513 \end{pmatrix}^H \begin{pmatrix} 0,6 \\ 0,025+j0,735 \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} 0,5493+j0,9604 \\ 0,897+j0,6513 \end{pmatrix}^H \begin{pmatrix} 0,5493+j0,9604 \\ 0,897+j0,6513 \end{pmatrix}},$$

$$Z_1 = \frac{0,8307+j0,0668}{2,4529},$$

$$Z_1 = 0,3387 + j0,0272,$$

Como los símbolos transmitidos son reales

$$\mathbf{Re}\{Z_1\} = \mathbf{0,3387}.$$

(Ecuación 23)

Por el criterio de distancia mínima el receptor decide por el símbolo +1

- d. Por el concepto explicado en la sección 2.5 sobre el uso de vector de peso el *Maximal Ratio Combining*, se obtiene

$$w = h_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ -0,18 + j0,94 \end{pmatrix},$$

$$Z_1 = \frac{h_1^H y}{h_1^H h_1} = 0,6714 - j0,0813,$$

Como los símbolos transmitidos son reales

$$\mathbf{Re}\{Z_1\} = \mathbf{0,6714}.$$

(Ecuación 24)

Por el criterio de distancia mínima, el receptor decide por el símbolo +1.

3.4.3. Escenario 3

En este escenario se grafican los diagramas de radiación para las técnicas de *beam-steering*, cancelación de interferencia y MRC, que fue descrito en la sección 2.4. Para el ejemplo descrito en el Escenario 1. Adicionalmente, los resultados se muestran modificando el número de antenas.

En la *Figura. 13*, *Figura. 14* y *Figura. 15* se observan los diagramas de radiación para los detectores *beam-steering*, cancelación de interferencia y MRC, respectivamente. Los diagramas de radiación muestran que cuando el número de antenas aumenta, el haz de radiación se hace más directivo para *beam-steering*. Para el detector de cancelación de interferencia se observa que el diagrama de radiación presenta nulos en las posiciones de los interferentes. Finalmente, para MRC, cuando el número de antenas es bajo, el diagrama de radiación no apunta de forma adecuada a la posición del usuario de interés lo que puede hacer que señales interferentes sean amplificadas. No obstante, cuando el número de antenas aumenta, entonces el detector MRC tienen un comportamiento parecido a la del

detector *beam-steering*. Esta es una de las claves de la técnica MIMO Masivo, en la cual es posible utilizar un número grande de antenas en las estaciones radio base.

BEAM-STEERING

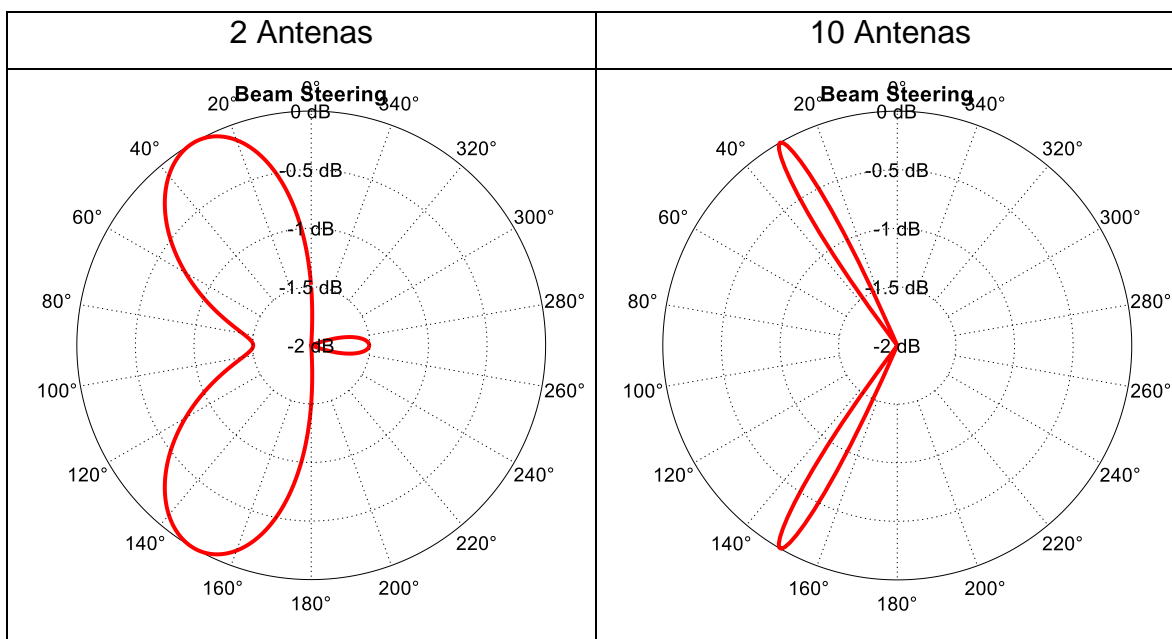


Figura. 13 Diagramas de radiación para la técnica *beam-steering* para 2 y 10 antenas.

CANCELACIÓN DE INTERFERENCIA

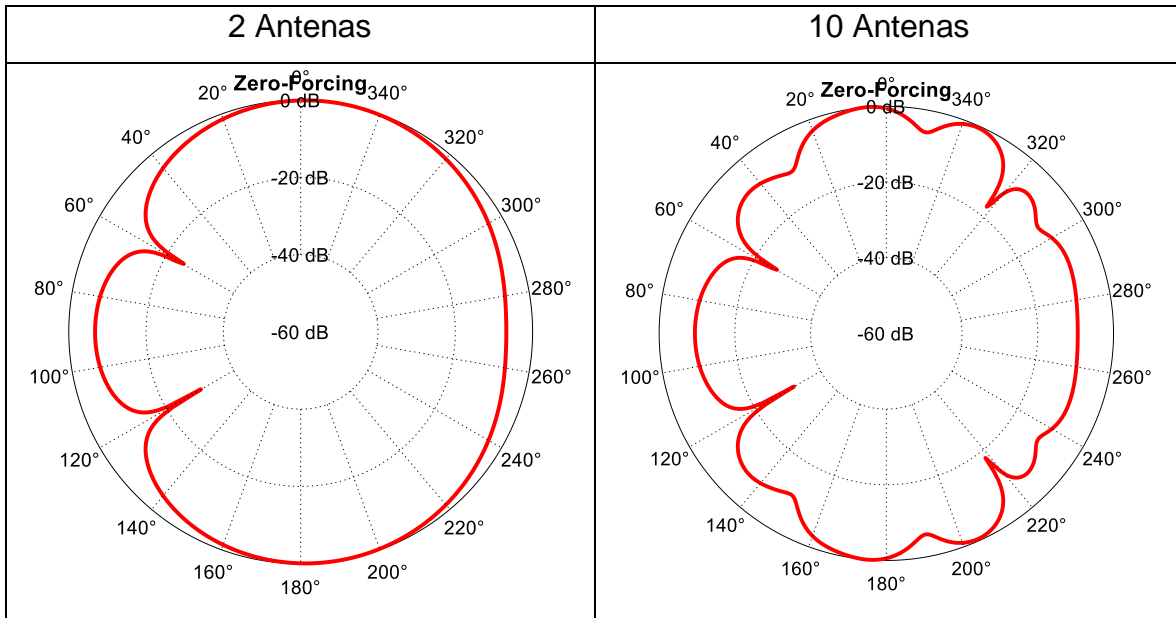


Figura. 14 Diagramas de radiación para la técnica de cancelación de interferencia para 2 y 10 antenas.

MAXIMAL RATIO COMBINING

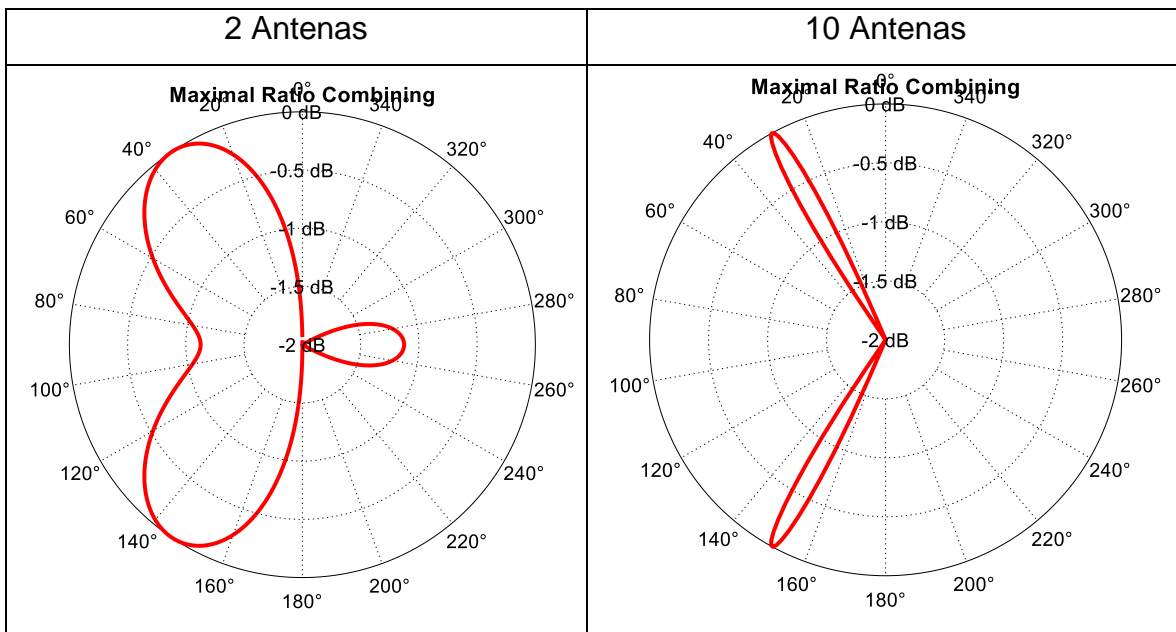


Figura. 15 Diagramas de radiación para la técnica de *Maximal ratio combining* para 2 y 10 antenas.

4. CAPITULO IV. DIAGRAMAS DE RADIACIÓN

4.1. Introducción

Las tecnologías 5G están diseñadas para conectar a un gran número de dispositivos terminales lo que permitirá el despliegue del internet de las cosas. Para esto, 5G debe garantizar una capacidad mucho mayor a la que se tiene con sistemas móviles de cuarta generación (4G). (Agredo Méndez, Jojoa Gómez, & Almenar Terré, 2015). Es por esto que los sistemas como MIMO masivo brinda un entorno ideal para alcanzar las velocidades de transmisión que se requieren. Además, estos sistemas MIMO masivo aumentan la eficiencia energética significativamente ya que redirigen su haz de energía hacia el usuario de interés en lugar de transmitir su señal hacia todas las direcciones. (Wu, Wang, Aggoune, Alwakeel, & He, 2014). La configuración de antenas MIMO masivo tiene como gran ventaja el incremento en la capacidad de la red, la alta tasa de transmisión de bits y la gran cantidad de usuarios que se pueden conectar sin perder calidad de la señal (Shukair, 2019). Con la tecnología 5G se proyecta un crecimiento de volumen en datos móviles 1000 veces más que lo que se tiene actualmente, la velocidad del usuario en 100 veces, la duración de las baterías de los dispositivos de internet de las cosas en 10 veces y el número de dispositivos conectados en 100 veces (Agredo Méndez, Jojoa Gómez, & Almenar Terré, 2015).

En este capítulo se describen y analizan los elementos que forman parte de la simulación y como se usan para llegar a obtener los diagramas de radiación para un arreglo de antenas tridimensional (3D). En la sección 4.2. se describe el proceso matemático para obtener el *steering vector* para su posterior aplicación en el software de simulación. En la sección 4.3. se explica el algoritmo desarrollado. En

la sección 4.4. se muestran los diagramas de radiación obtenidos y se analizan sus características.

4.2. *Steering Vector* para una Cara del Arreglo Cúbico de Antenas

El *steering vector* representa las diferencias de fase de cada antena del arreglo en relación a una antena en particular, generalmente la primera antena. A continuación, se muestra el proceso matemático que se realiza para obtener este vector para una de las caras de un arreglo cúbico de antenas.

La *Figura. 16* se muestra un arreglo de antenas en forma cúbica y, además, un usuario de interés. Por simplicidad, se escogió una sola cara del cubo para analizar el comportamiento de las señales recibidas al grupo de antenas que conforman el arreglo. Este escenario se muestra en la *Figura. 17*, en el cual para cada fila de antenas existe un número Y_h de antenas y cada columna de antenas tiene un número Y_v de antenas con sus respectivos ángulos; el ángulo de azimut está representado por θ y el ángulo de elevación está representado por ϕ .

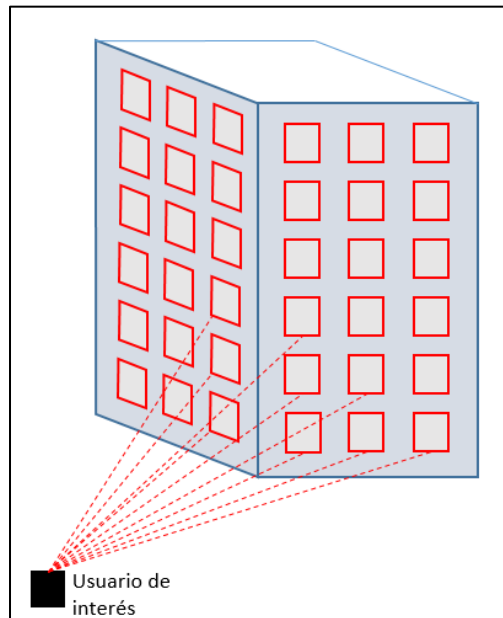


Figura. 16 Arreglo cúbico de antenas y el usuario de interés.

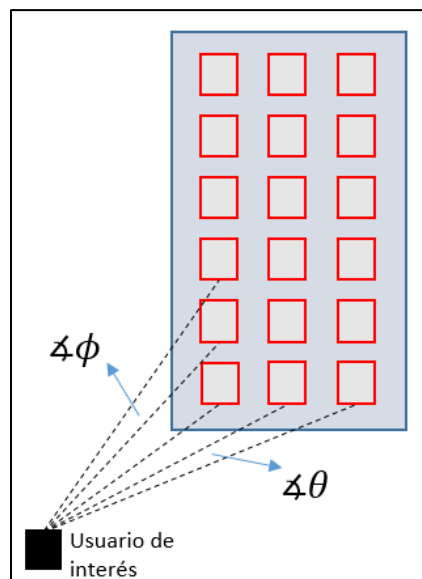


Figura. 17 Una cara del arreglo cúbico de antenas y el usuario de interés

Para analizar el arreglo de antenas, el análisis se realiza en término de filas y columnas. Primeramente, como se muestra en la *Figura. 18*, consideramos una fila de antenas de una cara del arreglo cúbico.

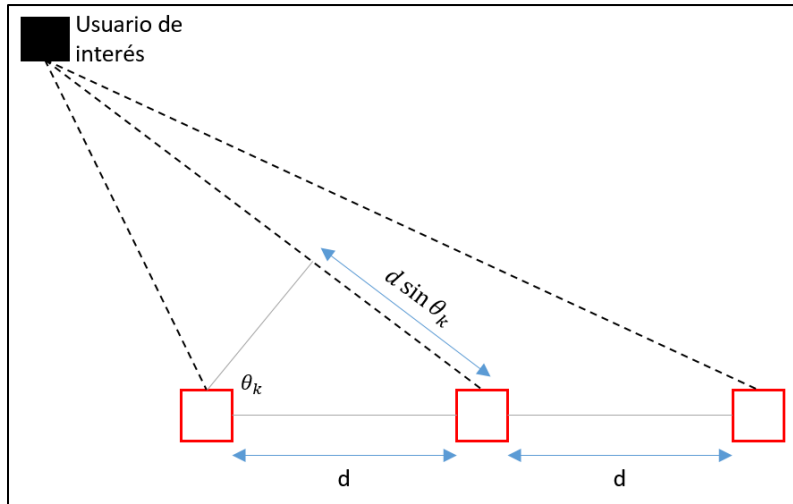


Figura. 18 Una fila de la agrupación de antenas y su conexión hacia el usuario de interés

A continuación, se determina la diferencia de fase $\Delta\varphi_k$ que se tiene entre las antenas de esta fila, entonces, se tiene una regla de tres donde 2π es a λ , entonces la diferencia de fase φ_H es a $d \sin \theta_k$. Resolviendo la regla de tres se tiene que

$$\varphi_H = \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda},$$

(Ecuación 25)

donde la distancia efectiva que debe existir entre antenas es de $d = \frac{\lambda}{2}$ (Barry, Lee, & Messerschmitt, 2004), por lo tanto, se determina que el factor de la diferencia de fase entre antenas es

$$\varphi_H = \pi \sin \theta.$$

(Ecuación 26)

Una vez obtenida la diferencia de fase entre señales adyacentes, se debe determinar la diferencia de fase de cada antena con relación a la primera antena de la fila horizontal seleccionada. Para esto procedemos de la siguiente manera

$$\Delta\varphi_H = (a - 1)\varphi_H ; a \in \{1,2,3, \dots Yh\},$$

(Ecuación 27)

donde a es el número de antena. De esta manera, se tiene que la diferencia de fases es

$$\Delta\varphi_k = \{0, \pi \sin \theta, 2\pi \sin \theta, \dots, (a - 1)\pi \sin \theta \}.$$

(Ecuación 28)

Ahora, aplicando la fórmula de la diferencia de fases en el *steering vector*, se tiene que:

$$a(\theta) = \{e^{j0}, e^{j\pi \sin \theta}, e^{j2\pi \sin \theta}, \dots, e^{j(a-1)\pi \sin \theta}\}^T,$$

(Ecuación 29)

$$a(\theta) = \{1, e^{j\pi \sin \theta}, e^{j2\pi \sin \theta}, \dots, e^{j(a-1)\pi \sin \theta}\}^T.$$

(Ecuación 30)

El vector mostrado en la ecuación 30 es el *steering vector* obtenido de las filas del arreglo de antenas. De la misma manera, se tiene que obtener el *steering vector* para las columnas y unir ambos vectores de manera que se pueda obtener la diferencia de fases total para cada antena del arreglo. Se tiene entonces que el *steering vector* para las columnas es:

$$a(\theta) = \{1, e^{j\pi \sin \phi}, e^{j2\pi \sin \phi}, \dots, e^{j(a-1)\pi \sin \phi}\} \text{ para } a = \{1,2, \dots Yv\}.$$

(Ecuación 31)

Para determinar el *steering vector* total, se suman los cambios de fase obtenidos para el ángulo de azimut y de elevación de la siguiente manera

$$a(\theta, \phi) = \{1, e^{j\pi(\sin \theta + \sin \phi)}, e^{j2\pi(\sin \theta + \sin \phi)}, \dots, e^{j(a-1)\pi(\sin \theta + \sin \phi)}\}.$$

(Ecuación 32)

El *steering vector* obtenido se utiliza en el software de simulación desarrollado, el cual se presenta y explica en la siguiente sección.

4.3. Algoritmo en Matlab

El programa de simulación fue desarrollado en el software Matlab. Para esto se crearon 3 scripts, los cuales se explican a continuación.

Primeramente, se creó un script donde se solicita se ingresen determinados parámetros de entrada como el ángulo de elevación, el ángulo horizontal (azimut), el número de antenas horizontales y el número de antenas verticales. Además, debido a que se solicita que los ángulos se ingresen en grados, se realiza una transformación de los mismos a radianes, las líneas de código asociadas se muestran en la *Figura. 19*.

```

Azimut=input('Inserte el angulo horizontal(azimut): ');
Elev=input('Inserte el angulo vertical(elevacion): ');
Ah=input('Inserte el numero de antenas horizontales: ');
Av=input('Inserte el numero de antenas verticales: ');
Theta=Azimut*pi/180;
Phi=Elev*pi/180;

```

Figura. 19 Ingreso de parámetros de entrada para el algoritmo.

Los datos ingresados se envían a otra función denominada *Steering_Vector_MIMO* para crear el *steering vector*. Específicamente, se genera una matriz que contiene los diferentes *steering vector* para las diferentes filas y columnas del arreglo. Por lo tanto, el tamaño de esta matriz dependerá de la cantidad de antenas horizontales y verticales que se ingresen al principio del programa. La matriz se representa como $E(m,n)$ siendo m el índice que representa a las antenas horizontales y n del índice que representa a las antenas verticales. Luego, esos datos se almacenan en forma de vector con el comando `Vector=E(:)`. Este proceso se muestra en la *Figura. 20*.

```

function [Vector] = Steering_Vector_MIMO(Theta,Phi,Ah,Av)
E = zeros(Ah,Av);
for m=1:Ah
    for n=1:Av
        E(m,n) = exp(1i*pi*( (m-1)*sin(Theta) + (n-1)*sin(Phi) ));
    end
end
Vector = E(:);

```

Figura. 20 Función del *steering vector*.

El vector generado en el proceso anterior “Vector” se envía al programa principal y se lo guarda en la variable “c” para posteriormente incluirlo en la función “Response” donde se realiza la conjugada transpuesta de la función y se lo multiplica por la misma función variando los ángulos de azimut y elevación entre 0 y 2π respectivamente. Esto permite generar los diagramas de radiación. Luego, a estos valores obtenidos se los normaliza en la función “*Response_Norm*”, es decir, hacemos que su valor máximo sea igual a 1 como se muestra en la *Figura. 21*.

```

c = Steering_Vector_MIMO(Theta,Phi,Ah,Av);
conta = 1;
Response = zeros(1,length(0:0.01:2*pi));
for kk = 2*pi:-0.01:0
    Response(conta) = (1/(Ah+Av))*abs(c'*Steering_Vector_MIMO(kk, kk, Ah, Av));
    conta = conta + 1;
end
Response_Norm = Response/max(Response);

```

Figura. 21 Variación de valores en los ángulos.

A continuación, en la *Figura. 22*, se definen los parámetros que permitirán graficar los diagramas de radiación en forma polar. El valor de “rangedb” representa el valor mínimo en decibeles que tendrá el radio de la circunferencia en relación al valor de 0 dB. El valor de “increments” es la variación de decibeles que se graficarán hacia el centro de la circunferencia, desde 0 dB hasta el valor de “rangedb”. El valor de “rays” es el número de ángulos que tendrá la gráfica del diagrama de radiación.

Finalmente, La función “polar_dB” se encarga de graficar el diagrama de radiación con los parámetros anteriormente establecidos. Dentro de esta función es posible aumentar varios parámetros relacionados con el color del fondo de la figura, el tipo de línea, y el color de las líneas del diagrama de radiación.

```

rangedb = 2;
increments = 0.5;
rays = 18;
figure(1)
polar_dB(0:0.01:2*pi,Response_Norm,rangedb,increments,rays,'white','-','r'); hold on;

```

Figura. 22 Definición de valores para gráfica polar de diagramas de radiación.

4.4. Diagramas de Radiación

Para graficar los diagramas de radiación, se consideró el diagrama de radiación horizontal para todos los casos, pues el mismo permite visualizar de manera

adecuada el comportamiento del arreglo de antenas. Esto permite ver el comportamiento del arreglo con respecto al azimut o el plano horizontal. A continuación, se muestran varios diagramas de radiación parametrizados por el número de antenas que el arreglo tiene. Así, se varía el número de antenas horizontales y verticales para ver sus efectos en el haz del arreglo.

La *Figura. 23* muestra los diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 45° , 1 fila de antenas y la variación de columnas de antenas en el arreglo. En el primer diagrama se observa que una sola antena actúa como una antena omnidireccional, irradiando a todas direcciones. Mientras se aumentan las antenas en las columnas, se visualiza en el segundo y tercer diagrama que los lóbulos principales apuntan al ángulo establecido y el lóbulo secundario desaparece

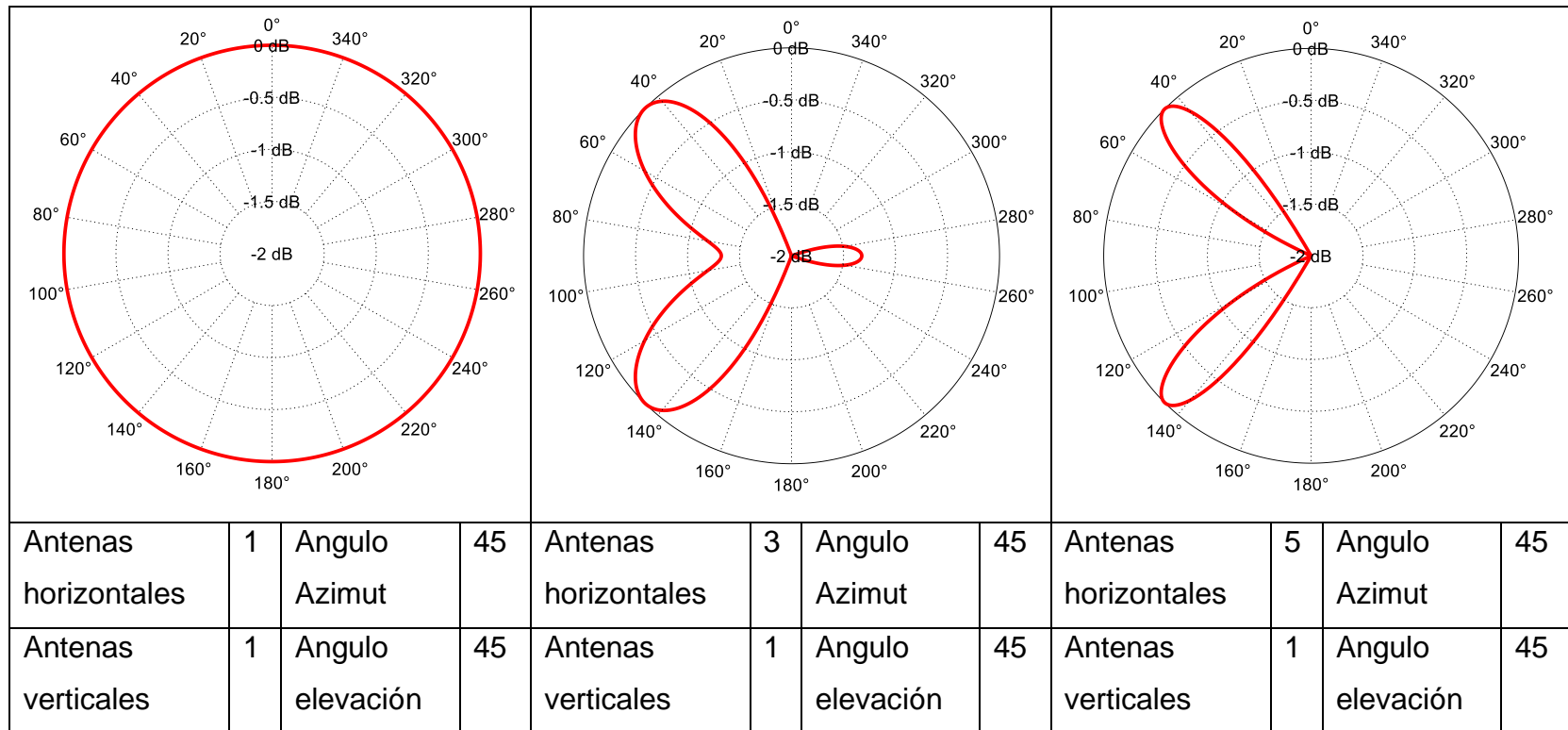


Figura. 23 Diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 45° con 1 fila de antenas y 1, 3 y 5 columnas de antenas.

La *Figura. 24* muestra los diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 45° , 3 filas de antenas y la variación del número de columnas de antenas en el arreglo. Semejante al escenario anterior, se observa que los lóbulos principales se vuelven más directivos a medida que aumenta el número de antenas. En el primer diagrama se tiene un lóbulo secundario que según aumenta el número de antenas en el arreglo, este desaparece como se puede observar en los demás diagramas.

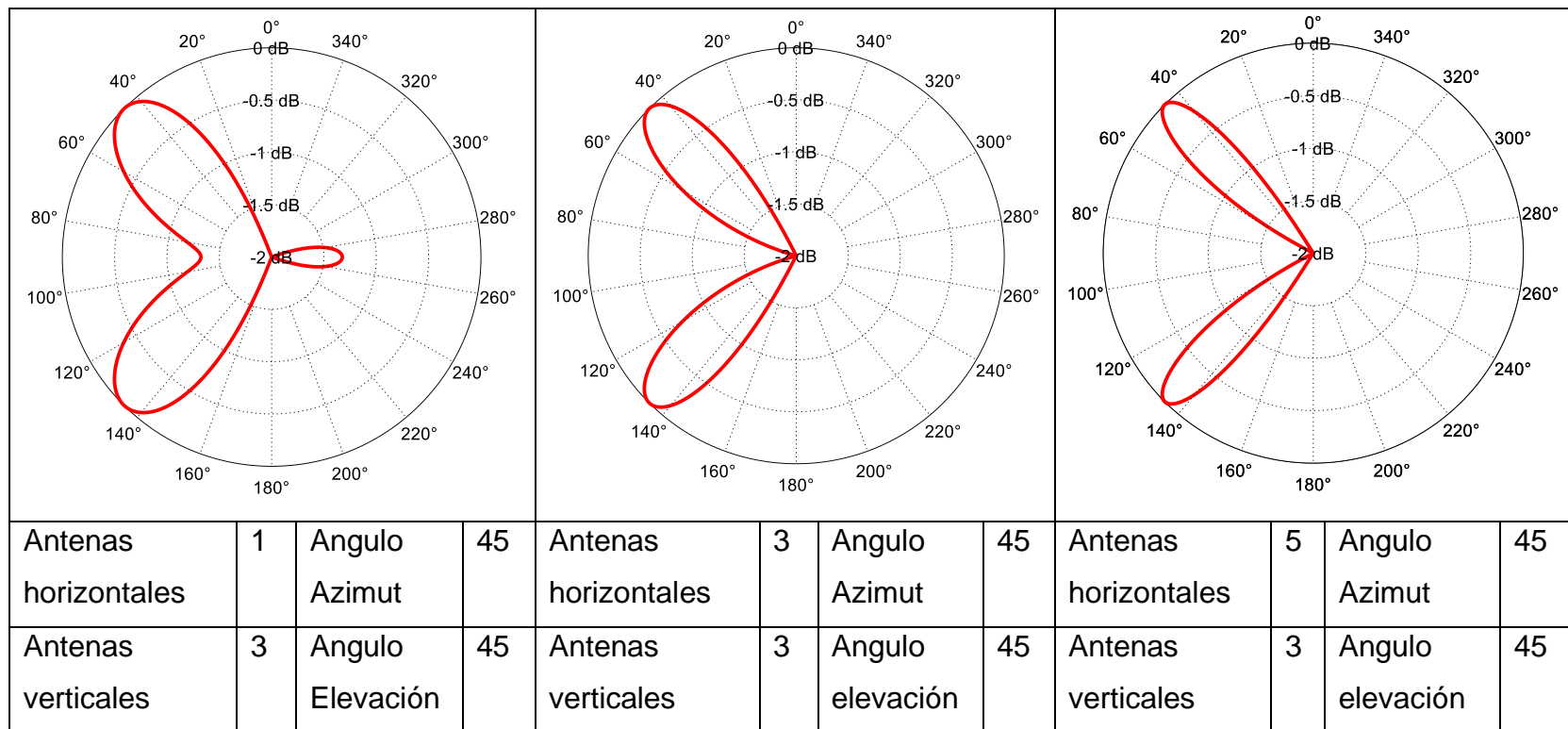


Figura. 24 Diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 45° con 3 filas de antenas y 1, 3 y 5 columnas de antenas.

En la *Figura. 25* se puede observar que para un ángulo de azimut y elevación de 45° , 5 filas de antenas y la variación en el número de antenas en las columnas del arreglo, los lóbulos principales se vuelven cada vez más directivos según aumenta el número de antenas, es decir, el ancho del ángulo del haz de media potencia se reduce, lo que implica una mayor directividad sin dejar de apuntar al ángulo determinado.

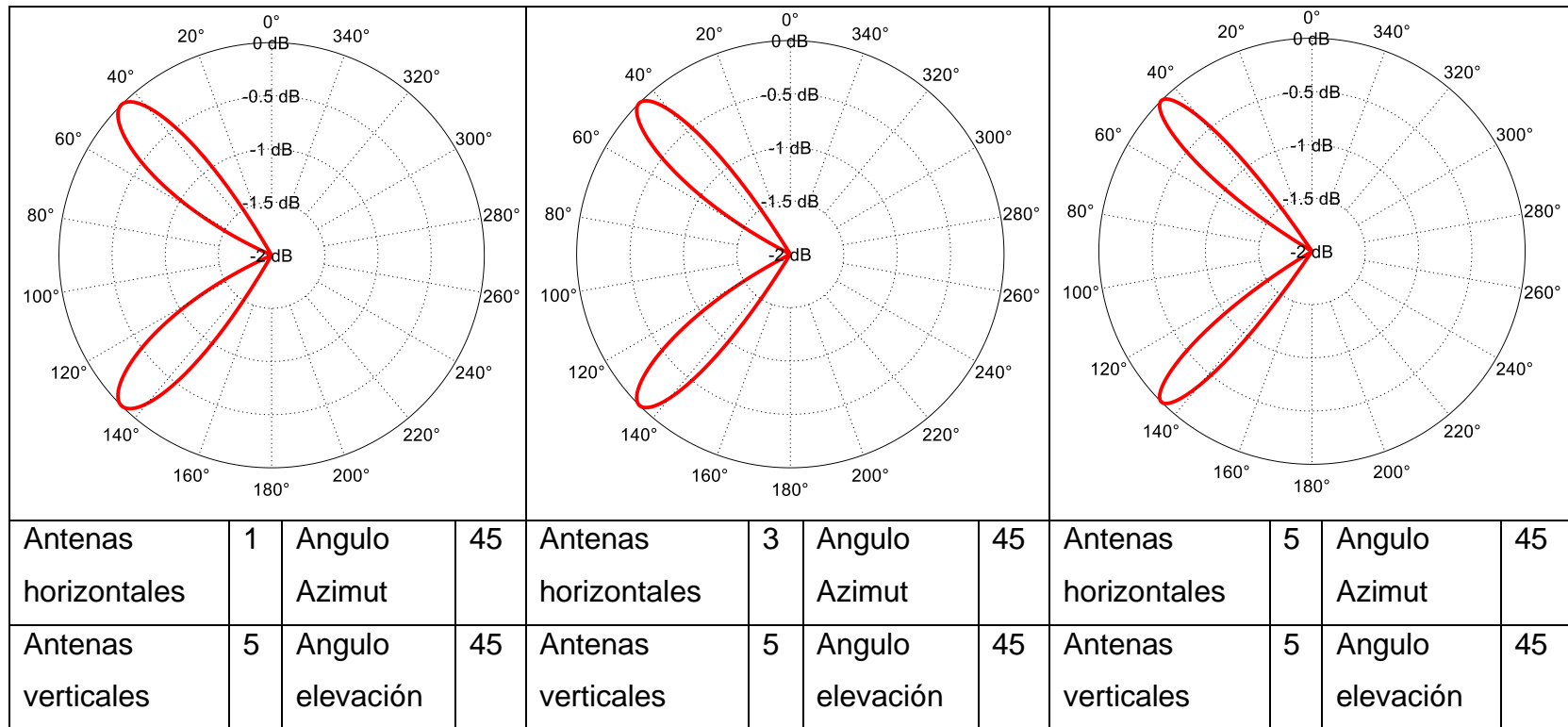


Figura. 25 Diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 45° con 5 filas de antenas y 1, 3 y 5 columnas de antenas.

La *Figura. 26* muestra los diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 90° , 1 fila de antenas y la variación la columna de antenas en el arreglo. Considerando un ángulo de 90° en ambos ángulos, el ángulo de azimut de elevación. Observe en el primer diagrama que, con 1 sola antena, se comporta como una antena omnidireccional. Según aumentan las columnas, las antenas apuntan a 90° y 180° . Por lo tanto, si bien se puede eliminar la interferencia también se puede captar un alto nivel de interferencia en caso de que un interferente este en el ángulo de 180° .

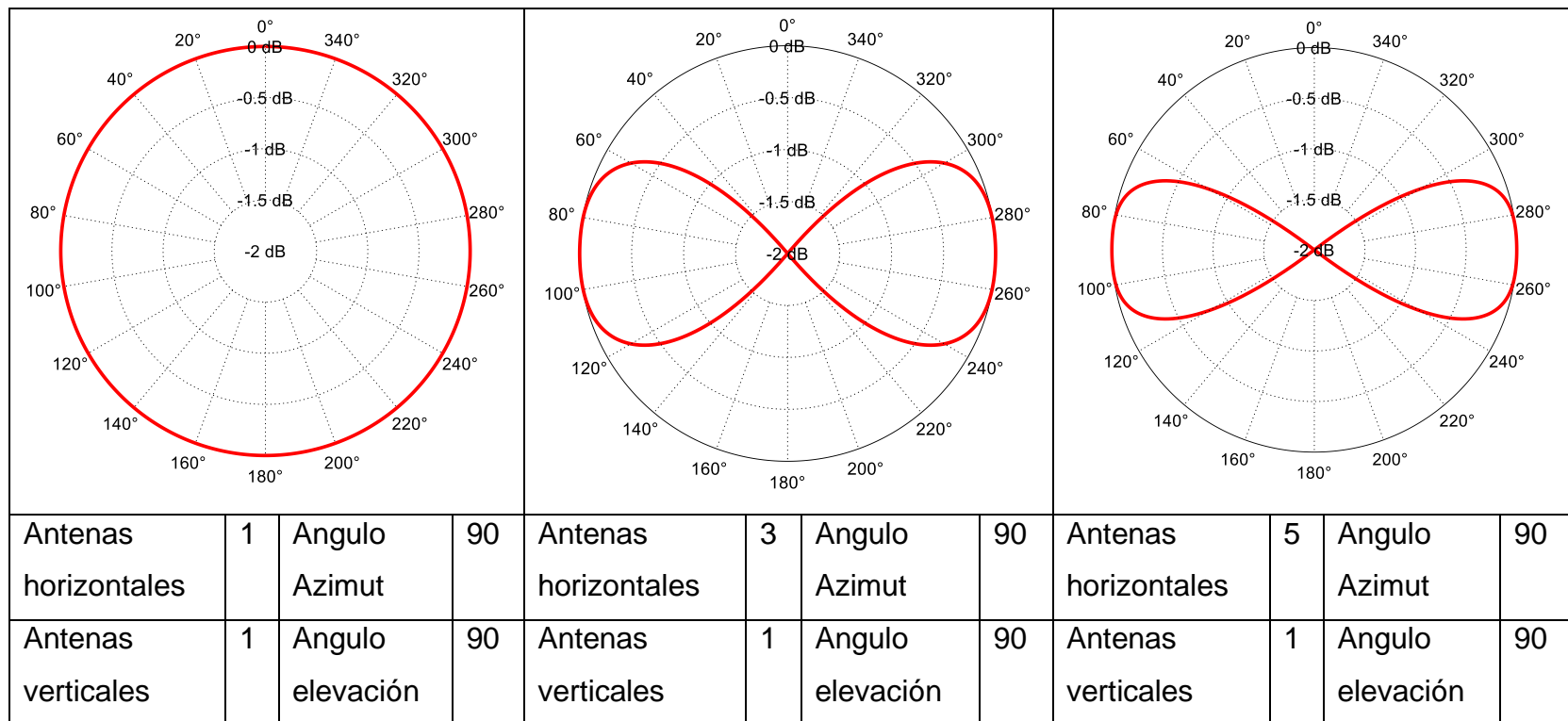


Figura. 26 Diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 90° con 1 fila de antenas y 1, 3 y 5 columnas de antenas.

La *Figura. 27* muestra los diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 90° , 3 filas de antenas y la variación de las columnas de antenas en el arreglo. Se observa que los lóbulos de radiación se vuelven más directivos al aumentar la cantidad de antenas, aunque de manera poco notoria por el uso de antenas dipolo. El ángulo al que está apuntando la antena no es óptimo por lo que la directividad se ve afectada. No obstante, esto puede ayudar a mitigar la interferencia porque se atenuará la interferencia de otros usuarios en la misma célula.

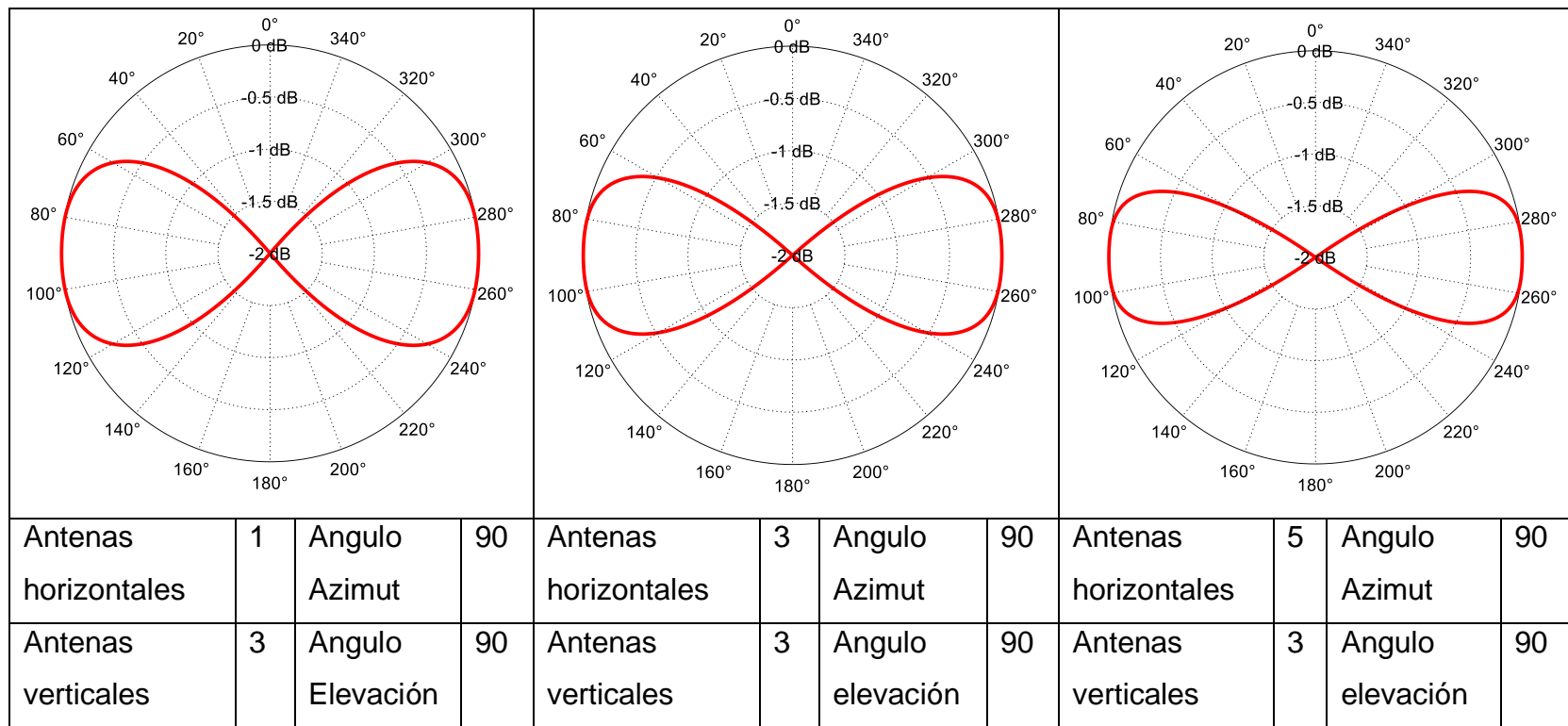


Figura. 27 Diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 90° con 3 filas de antenas y 1, 3 y 5 columnas de antenas.

En la *Figura. 28* se muestra los diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 90° , 5 filas de antenas y la variación de columnas en el arreglo de antenas. Se observa que al aumentar el número de filas de antenas la directividad de los lóbulos de radiación se hace más notoria según se tiene más antenas en el arreglo.

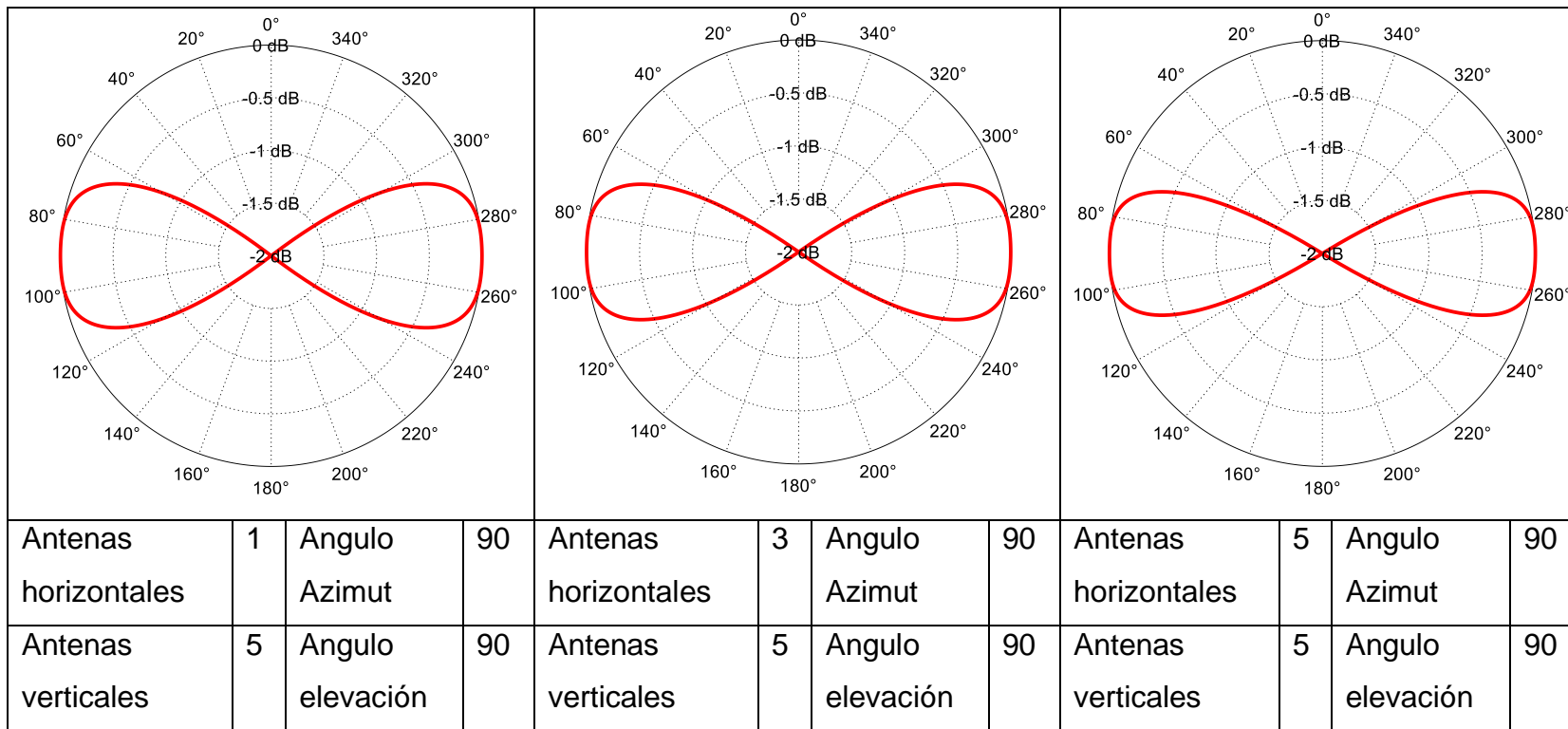


Figura. 28 Diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 90° con 5 filas de antenas y 1, 3 y 5 columnas de antenas.

En la *Figura. 29* se muestra los diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 180° , 1 fila de antenas y la variación de columnas de antenas en el arreglo. Se observa en el primer diagrama que, igual que los anteriores casos que se tiene 1 sola antena, se emite radiación omnidireccionalmente y según se tiene más columnas como se observa en el segundo y tercer diagrama, los lóbulos de radiación se vuelven mucho más directivos.

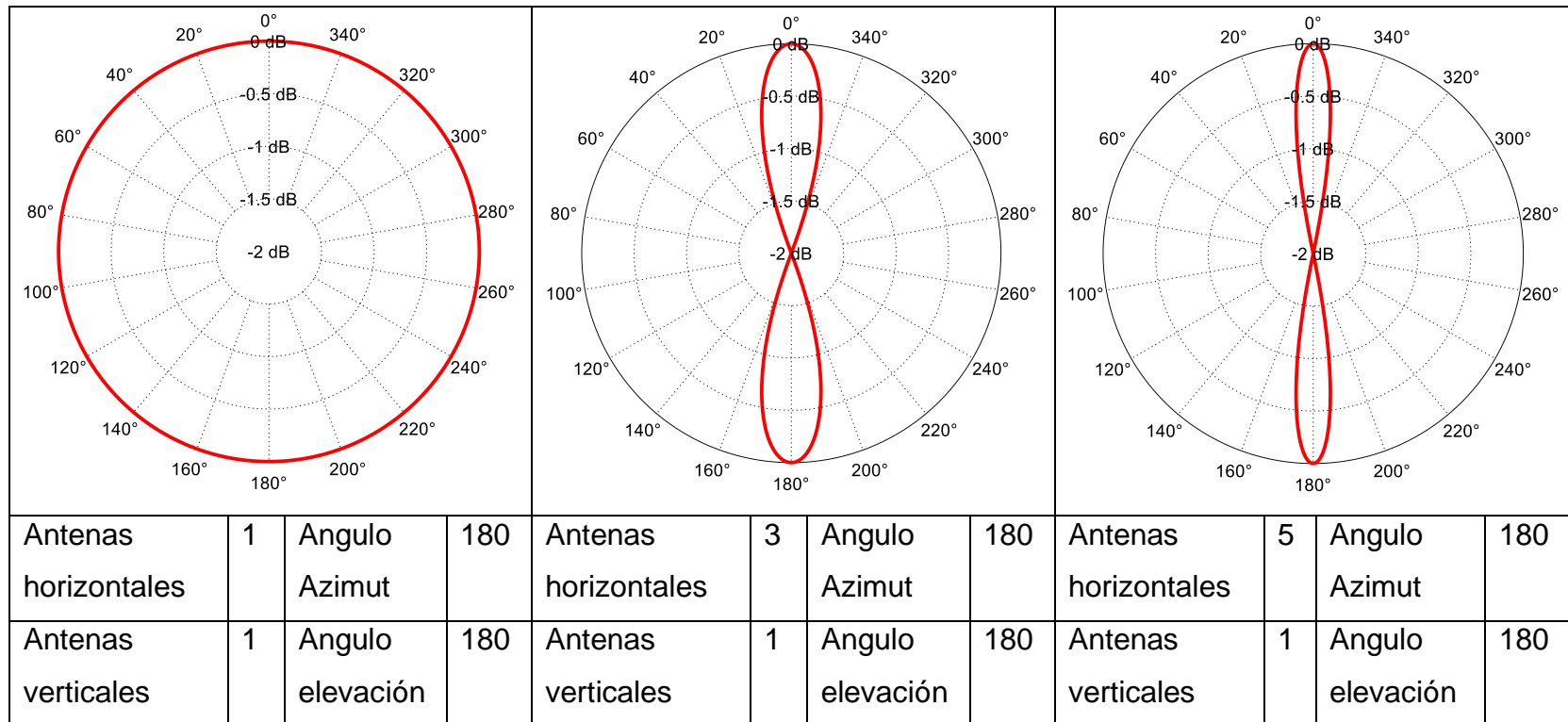


Figura. 29 Diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 180° con 1 fila de antenas y 1, 3 y 5 columnas de antenas.

En la *Figura. 30* se muestra los diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 180° , 3 filas de antenas y la variación del número de columnas de antenas en el arreglo. Se observa que los lóbulos de radiación se vuelven significativamente más directivos, al contrario que con un ángulo de 90° .

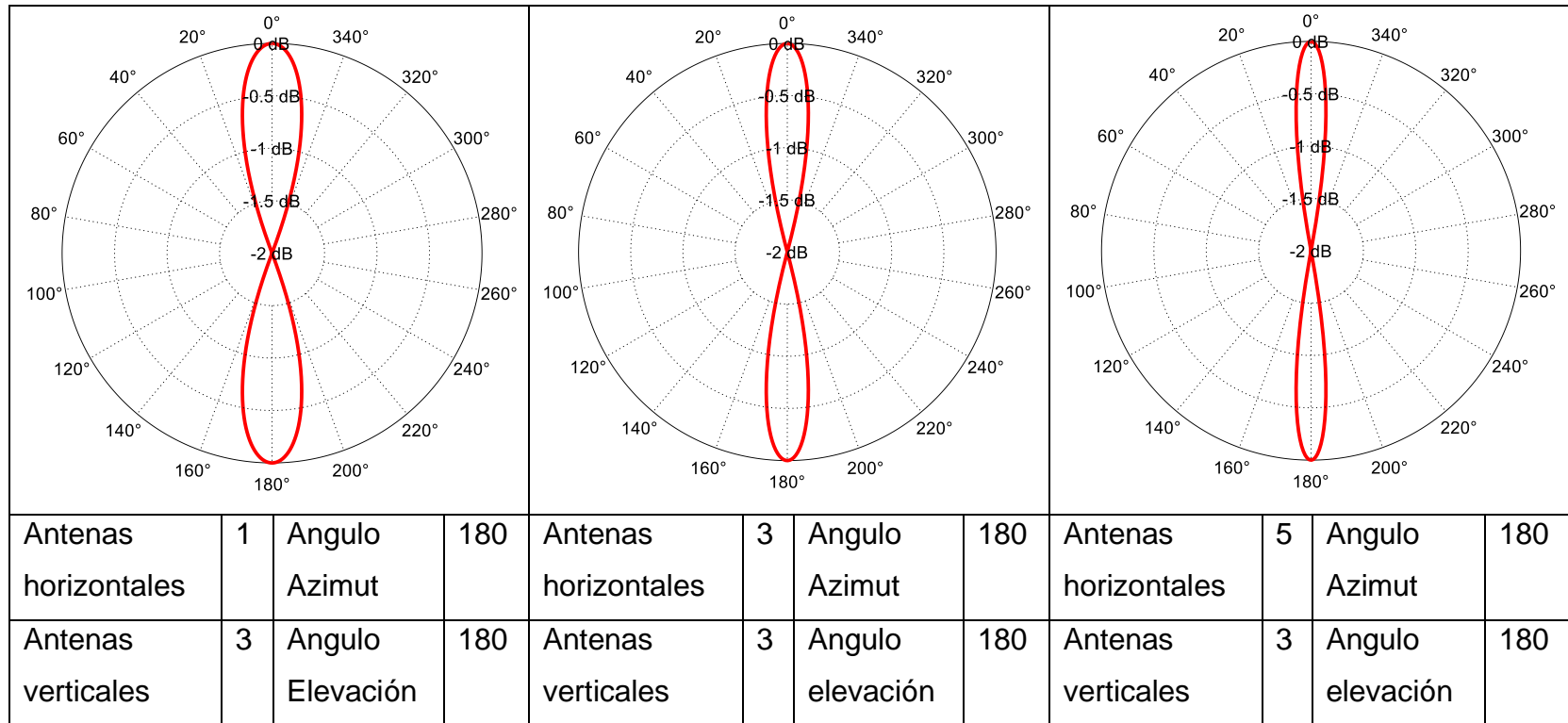


Figura. 30 Diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 180° con 3 filas de antenas y 1, 3 y 5 columnas de antenas.

En la *Figura. 31* se muestra los diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 180° , 5 filas de antenas y la variación del número de columnas de antenas en el arreglo. Se observa, mucho más notoriamente, como los lóbulos de radiación se vuelven más directivos sin perder el ángulo que se determinó.

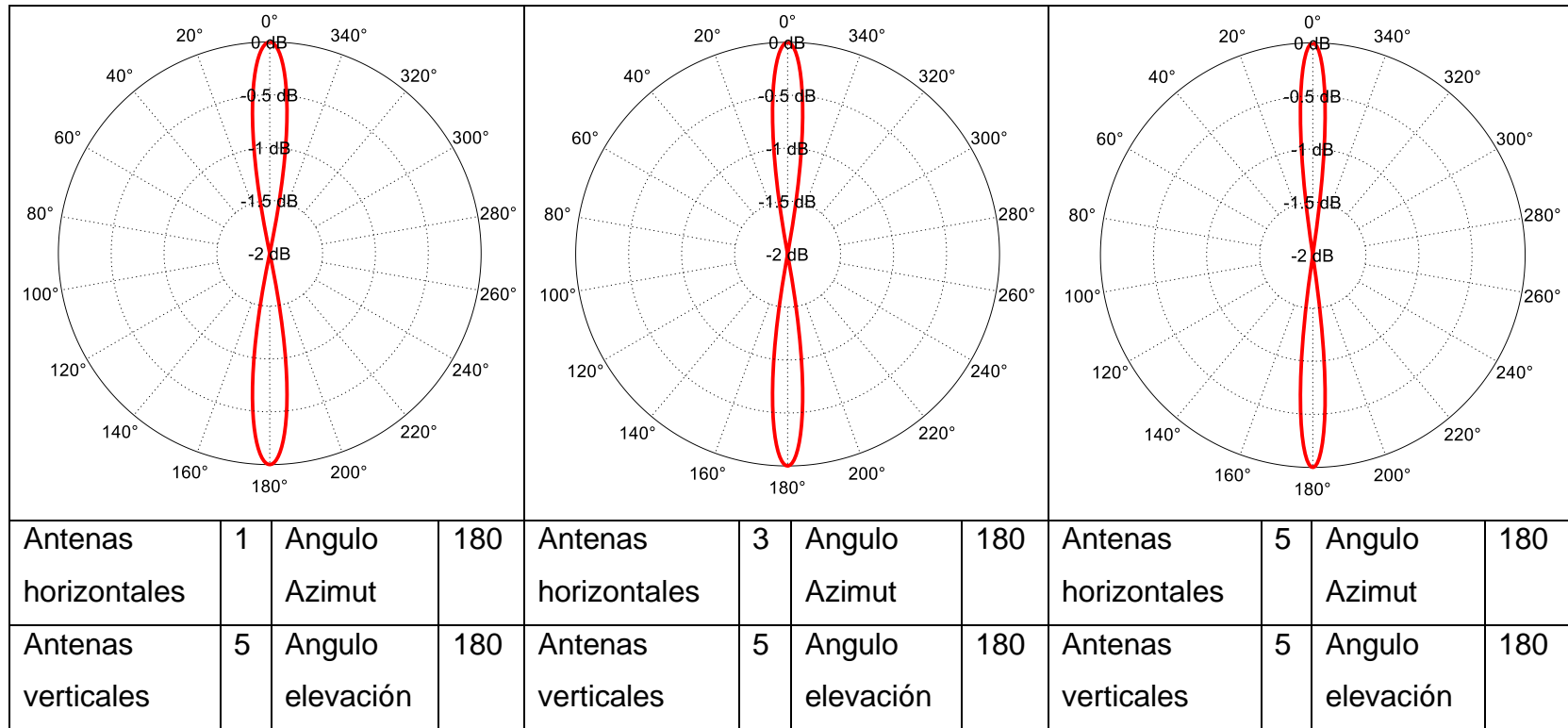


Figura. 31 Diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 180° con 5 filas de antenas y 1, 3 y 5 columnas de antenas.

En la *Figura. 32* se muestra los diagramas de radiación para los ángulos de azimut y elevación de 45° , 90° y 180° para un numero de 10 filas y columnas de antenas en el arreglo. Se puede observar que los diagramas de radiación de 45° y 180° se vuelven muy directos a diferencia del diagrama de radiación para 90° .

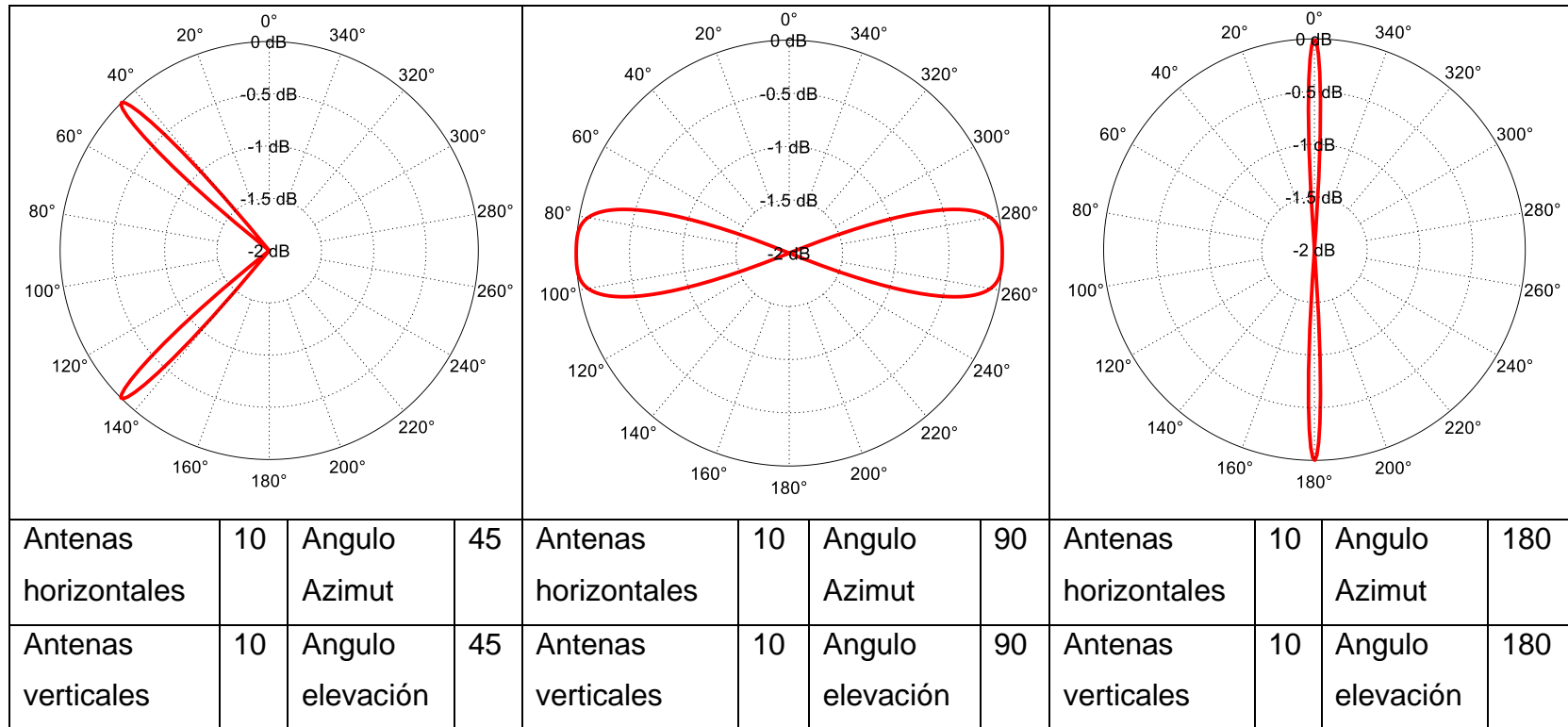


Figura. 32 Diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 45° , 90° y 180° con 10 filas y 10 columnas de antenas.

En la *Figura. 33* se muestra los diagramas de radiación para los ángulos de azimut y elevación de 45°, 90° y 180° para un numero de 20 filas y columnas de antenas en el arreglo. Se observa una directividad mucho más eficiente para solo enfocar a un usuario y así evitar interferencia no deseada.

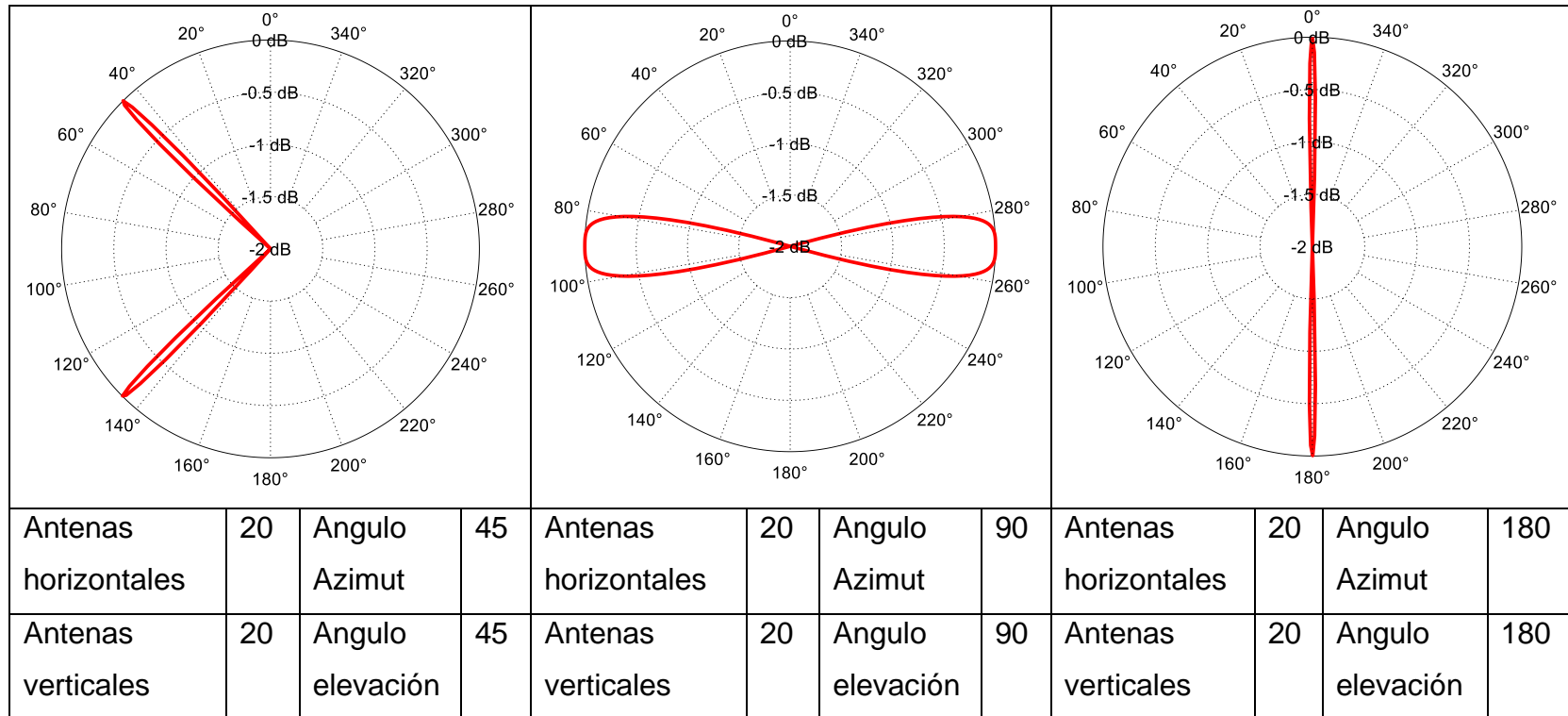


Figura. 33 Diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 45°, 90° y 180° con 20 filas y 20 columnas de antenas.

En la *Figura. 34* se puede evidenciar como al sobrepasar un límite en el número de antenas verticales y horizontales el lóbulo que apunta al ángulo suplementario comienza a encogerse según aumenta la cantidad de antenas hasta llegar a un punto en el que este lóbulo desaparece.

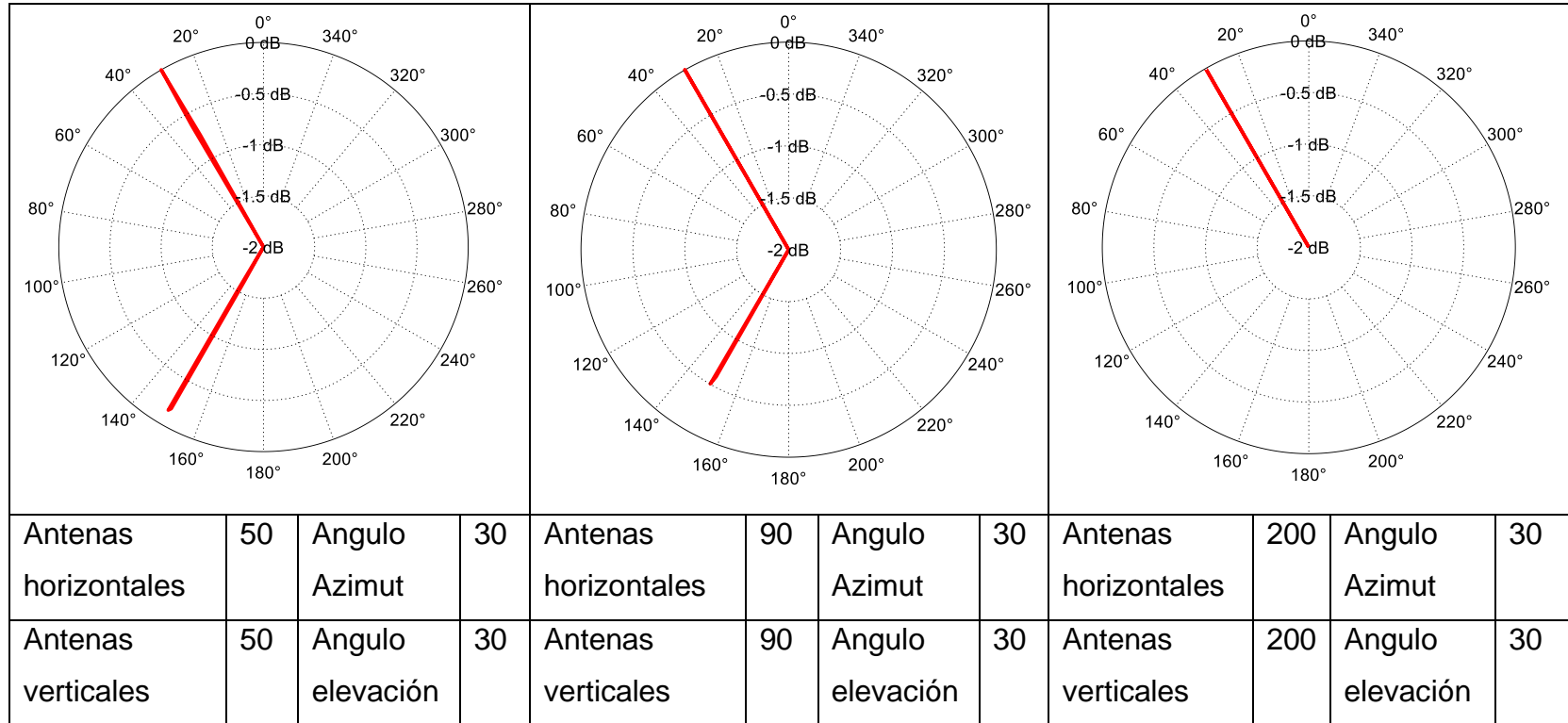


Figura. 34 Diagramas de radiación para un ángulo de azimut y elevación de 30° con 50, 90 y 200 filas y columnas de antenas

5. CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se resumen las principales conclusiones del trabajo realizado. Adicionalmente, se presentan algunas recomendaciones relacionadas con el mismo y, además, se presentan varias recomendaciones para trabajos futuros.

5.1. Conclusiones

Se determinó que la técnica de detección que tienen un mejor compromiso entre complejidad e implementación es la técnica de *beamforming* debido a que se puede apuntar el diagrama de radiación hacia un usuario en particular eliminando las posibles interferencias que lleguen desde otras regiones de la célula.

Se determinó el *steering vector* relacionado con los diagramas de radiación de sistemas MIMO-3D considerando la técnica de detección *beamforming*.

Se determinó que, al aumentar el número de antenas, ya sea en el plano horizontal como vertical, los lóbulos de radiación se vuelven más directivos. Con un mayor número de filas y columnas de antenas, se elimina de mejor manera la interferencia. Obviamente, existe un mayor costo de implementación.

Se evidenció que el software Matlab es ideal para simular escenarios complejos y graficar de manera óptima una figura para su posterior análisis debido a sus múltiples y útiles funciones.

Se evidenció que el número de antenas que se pueden ingresar en el programa de simulación no tiene un límite aparente. El tiempo de procesamiento depende de las capacidades en las que se ejecute el programa.

Se evidenció que, en los diagramas de radiación, según aumenta el número de antenas uno de los lóbulos se encoge y desaparece al llegar a un número específico de antenas.

Se determinó que el ángulo de 90° para azimut y elevación es la dirección en la cual el arreglo de antenas tiene un desempeño ineficiente por el uso de antenas tipo dipolo.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda usar un número mucho más grande de filas y columnas de antenas para generar diagramas de radiación para escenario con MIMO masivo. Si bien en este trabajo, en algunos casos se utilizó un número elevado de antenas. Se recomienda aumentar este número considerando aumentar el número de antenas. Para esto, se recomienda implementar las rutinas de simulación en otro tipo de software como Python debido a que esto permitirá que las simulaciones tomen menos tiempo de ejecución.

Se recomienda investigar acerca de las funciones que trae consigo el software Matlab para este tipo de trabajos ya que se puede ahorrar muchos recursos utilizando sus funciones predeterminadas.

En este trabajo se analizó el comportamiento de los diagramas de radiación tomando como referencia una sola cara del arreglo cúbico de antenas. Sin embargo, se recomienda que en un trabajo futuro se analice toda la estructura tridimensional del arreglo de antenas.

Se recomienda investigar el comportamiento del arreglo de antenas cuando tiene una gran cantidad de elementos que lo componen ya que su diagrama de radiación es diferente a cuando se tiene pocos elementos.

5.3. Trabajos Futuros

Finalmente, se presentan recomendaciones para trabajos futuros:

Se recomienda analizar la probabilidad de error de bit considerando el detector con *beamforming* con el fin de analizar el desempeño del mismo en escenarios que incluyan presencia de desvanecimiento y/o ruido. Para esto se puede tomar como referencia los escenarios planteados en el Capítulo 3 del presente trabajo.

Se recomienda analizar el comportamiento de la técnica de detección *beamforming* considerando otras estructuras geométricas para el arreglo de antenas, como por ejemplo un arreglo de antenas esférico.

Bibliografía

- Agredo Méndez, G. L., Jojoa Gómez, P. E., & Almenar Terré, V. (2015). *Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para la 5G inalámbrica*.
- Balanis, C. A. (2011). *Modern Antenna Handbook*. John Wiley & Sons.
- Barry, J. R., Lee, E. A., & Messerschmitt, D. G. (2004). *Digital Communication* (Tercera ed., Vol. I). Springer Science & Business Media.
- Carvajal Mora, H. R. (2018). *Bit Error Rate and Spectral Efficiency Evaluation of MC-CDMA Cellular Systems Employing Multiuser Detection*. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas.
- Daoud Yacoub, M. (2001). *Wireless Technology: Protocols, Standards, and Techniques*. Boca Raton: CRC PRESS.
- Gopal, B. G., & Kuppusamy, P. G. (2015). *A Comparative Study on 4G and 5G Technology for Wireless* (Vol. X). IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering.
- Huidobro, J. M. (2013). Antenas de telecomunicaciones. *ACTA*, 4-16.
- IEEE Standards Association. (2013). *IEEE Standards for Definitions of Terms for Antennas*. New York.
- Mahmood, K., Asad, S. M., Moinuddin, M., Zerguine, A., & Cheded, L. (2016). *Multiple access interference in MIMO-CDMA systems under Rayleigh fading: statistical characterization and applications*. Springer Open. doi:10.1186/s13634-016-0338-y

- Maniewicz, M. (2019). La importancia de las comunicaciones inalámbricas terrenales. *Actualidades de la UIT*, 4-7. Recuperado el 3 de Mayo de 2020, de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7219039>
- Mumtaz, S., Rodriguez, J., & Dai, L. (2017). *mmWave Massive MIMO A Paradigm for 5G*. India: Elsevier.
- Murillo Fuentes, J. J. (2013). *Fundamentos de Radiación y Radiocomunicación*. Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla.
- Nordrum, A., & Clark, K. (15 de Julio de 2017). *5G Bytes: Beamforming Explained*. Recuperado el 20 de Mayo de 2020, de IEEE Spectrum: <https://spectrum.ieee.org/video/telecom/wireless/5g-bytes-beamforming-explained>
- Papoulis, A., & Pillai, U. (2009). *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. New York: McGraw-Hill.
- Proakis, J., & Salehi, M. (2008). *Digital Communication* (Quinto ed.). McGraw-Hill.
- Rappaport, T. S. (2001). *Wireless Communications Principles and Practice* (Segunda ed.). Prentice Hall.
- Shah, A., & Haimovich, A. M. (2000). *Performance Analysis of Maximal Ratio Combining and Comparison with Optimum Combining for Mobile Radio Communications with Cochannel Interference*. IEEE Transactions on Vehicular Technology. doi:10.1109/25.875282
- Shukair, M. (20 de Junio de 2019). *How 5G massive MIMO transforms your mobile experiences*. Recuperado el 2 de Junio de 2020, de Qualcomm: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2019/06/20/how-5g-massive-mimo-transforms-your-mobile-experiences>

UIT-R. (1998). *Características y Diagramas de las Antenas Transmisoras en Ondas Kilométricas y Hectométricas*. Asamblea de Radiocomunicaciones, Geneva.

Wu, S., Wang, C.-X., Aggoune, H., Alwakeel, M., & He, Y. (2014). *A Non-Stationary 3D Wideband Twin-Cluster*. IEEE Journal on Selected Areas in Communication. doi:10.1109/JSAC.2014.2328131

