

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Modelación de antena Laboratorio 5G

Cristóbal Roberto Leiva Espinosa

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Guía:

Dr. Ricardo A. Bustos P.

Profesores Comisión:

Dra. Silvia E. Restrepo M.

Dr. Jaime A. Cariñe. C.

Concepción, junio del 2025

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Bustos P.

Modelación de antena Laboratorio 5G

Cristóbal Roberto Leiva Espinosa

Informe de Habilitación Profesional
para optar al Título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Junio del 2025

Resumen

Este documento tiene propósito de analizar, interpretar, y simular el diagrama de radiación de un arreglo de antenas tipo Patches o Microstrip con el software FEKO. Al ser una antena inteligente puede formar un Beam Forming controlando las fases en cada patch. Esta antena, modelo AAU5645, está conformada por un arreglo de 192 elementos irradiadores, ubicado en el techo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, con el fin de transmitir la señal hacia el Laboratorio 5G Movistar de la Universidad.

La simulación, se realiza por medio del Software FEKO, que entrega los resultados que permiten analizar el comportamiento de la antena. Este Software resuelve retos de simulación de electromagnetismo de alta frecuencia, lo que permite optimizar conectividad inalámbrica 5G.

Post realización de las simulaciones, se mencionarán los resultados obtenidos, los cuales se podrán encontrar en un Capítulo en específico de esta documentación, pero en breves palabras el arreglo propuesto alcanza un beam menor al del arreglo de la antena.

Sobre la tecnología 5G en nuestra Universidad se puede mencionar que es novedosa, y que se está implementando en las dependencias de la Facultad de Ingeniería UCSC. Esto permitirá en un futuro poder trabajar en temas de simulación y de medición de potencia de la antena.

A los alumnos del pasado, presente y futuro de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la U.C.S.C.

Agradecimientos

Para empezar, quiero agradecer a todas las personas involucradas en mi desarrollo como persona y estudiante, a mi familia y a aquellos amigos y compañeros que estuvieron en los momentos más cruciales en la Universidad y que poco a poco fuimos superando. También a todos los docentes que en algún momento tuve la oportunidad de haber estado en sus clases y que pude sacar información de sus historias que luego tendría que aplicar en la vida laboral.

Una gran mención a María Ignacia Venegas, que gracias a su gran aporte pude entender más sobre antenas y del Software de simulación que en más de algún momento no lo entendía, a mi amigo y compañero Gustavo Herrera, que tuve la oportunidad de trabajar con él en el 5G Movistar LAB, a Hernán Abarzúa, Raúl Muñoz, Rubén Padilla, Juan Pablo Acevedo, Felipe Fierro, Ricardo Bahamonde, Mauricio Pincheira, Dustyn Cid, Ariel Soto y a todos aquellos que en algún momento compartí grandes enseñanzas de la vida. Tampoco me olvido de aquellos que estuvieron en algún momento en la carrera y de vez en cuando nos contábamos anécdotas, nunca faltaban las risas, pero por motivos de la vida, la tuvieron que abandonar, como Nicolás Fernández y Patricio Gutiérrez.

Para finalizar solo quiero decir ¡hasta luego generación 2016!, siempre te recordaré con tus altos y bajos, pero me formaste como persona y estudiante, eso es algo que siempre estará presente en mí porque también me fue preparando como futuro Ingeniero Civil Eléctrico.

Tabla de Contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
NOMENCLATURAS	XII
ABREVIACIONES	XII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	8
1.2. TRABAJOS PREVIOS	8
1.2.1 Teoría de antenas	8
1.2.2 Decreto vigente de adjudicación de servicio público de telecomunicaciones	8
1.2.3 Estándar IEEE relacionado a antenas	9
1.2.4 Laboratorio 5G UCSC	9
1.2.5 Documentos de investigación anteriores	9
1.2.6 Discusión	10
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	11
1.4. OBJETIVOS	11
1.4.1 Objetivo General	11
1.4.2 Objetivos Específicos	11
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	11
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA	12
1.6.1 Temario	12
1.6.2 Metodología	12
1.6.3 Simulación	13
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	14
2.1. DEFINICIÓN DE ANTENA	14
2.2. PARÁMETROS DE UNA ANTENA	14
2.2.1 Ancho de banda	14
2.2.2 Diagrama de radiación	15
2.2.3 Clasificación de antenas por su estructura lobular	18
2.2.4 Directividad	19
2.2.5 Ganancia	20
2.2.6 Rendimiento	20
2.2.7 Impedancia	20
2.2.8 Ancho de haz	20
2.2.9 Arreglo (Arrays)	21
2.2.10 Beam Forming	25
2.3. TIPOS DE ANTENAS.....	26

2.3.1 Antena de hilo.....	26
2.3.2 Antena YAGI-UDA.....	27
2.3.3 Antena de Apertura	28
2.3.4 Antena plana	29
2.3.5 Arrays	30
2.3.6 Antena Inteligente	30
CAPÍTULO 3. MOVISTAR LAB 5G UCSC	32
3.1. LABORATORIO 5G	32
3.2. ESPECIFICACIONES DE LA ANTENA	32
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y SIMULACIONES	36
4.1. INTRODUCCIÓN	36
4.2. ALTAIR FEKO	36
4.2.1 Método de uso del Software.....	36
4.3. SIMULACIONES ARREGLO ANTENA	43
4.3.1 Arreglo en fase de elementos irradiadores.....	43
4.3.2 Análisis de Simulaciones.....	66
4.4. SUMARIO	69
CAPÍTULO 5. CONCLUSIÓN	70
5.1. TRABAJO FUTURO	71
BIBLIOGRAFÍA	72
ANEXOS. CÓDIGO UTILIZADO	74
6.1. CÓDIGO DE MATLAB	74
6.1.1 Configuración de fases para 12 antenas patch.....	74

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Longitudes antena dipolo.....	27
Tabla 3.1 Especificaciones de la antena Huawei AAU5645.....	34
Tabla 3.2 Especificaciones del bosquejo de la antena Huawei AAU5645.....	35
Tabla 3.3 Especificaciones de bandas de frecuencia de la antena Huawei AAU5645.....	35
Tabla 4.1 Fases utilizadas en FEKO para el diagrama de la Fig. 4.11.....	46
Tabla 4.2 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.15.....	48
Tabla 4.3 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.19.....	49
Tabla 4.4 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.21.....	50
Tabla 4.5 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.23.....	51
Tabla 4.6 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.25.....	52
Tabla 4.7 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.27.....	53
Tabla 4.8 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.29.....	54
Tabla 4.9 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.31.....	55
Tabla 4.10 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.33.....	56
Tabla 4.11 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.35.....	57
Tabla 4.12 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.37.....	59
Tabla 4.13 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.41.....	61
Tabla 4.14 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.45.....	62
Tabla 4.15 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.47.....	63
Tabla 4.16 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.49.....	65
Tabla 4.17 Datos extraídos de las simulaciones realizadas.....	66
Tabla 4.18 Datos extraídos de las simulaciones realizadas.....	68

Lista de Figuras

Fig. 2.1 Antena empleada en la telefonía móvil.....	14
Fig. 2.2 Diagrama de radiación 3D de una antena dipolo.....	15
Fig. 2.3 Diagrama de radiación 3D de una antena tipo patch.....	15
Fig. 2.4 Diagrama de radiación 3D de un arreglo de 2 antenas tipo patch.....	16
Fig. 2.5 Representación de las diferentes partes de un diagrama de radiación en 3D.....	16
Fig. 2.6 Representación de las diferentes partes de un diagrama de radiación en 2D.....	17
Fig. 2.7 Diagrama de radiación en diferentes planos (a) Representación 3D de un diagrama de radiación (b) Representación 2D de un diagrama de radiación donde oscila el campo eléctrico (c) Representación 2D de un diagrama de radiación donde oscila el campo magnético.....	18
Fig. 2.8 Ejemplo de antena omnidireccional.....	19
Fig. 2.9 Ejemplo de antena multi – haz.....	19
Fig. 2.10 Representación de ancho de haz a -3dB.....	21
Fig. 2.11 Arreglo de antena lineal separados a una distancia d , radiando a un punto p lejano.....	22
Fig. 2.12 Arreglo lineal sobre el plano X, Y.....	23
Fig. 2.13 Arreglo de antenas emitiendo señal en el espacio libre.....	24
Fig. 2.14 Arreglo en fase de n elementos.....	25
Fig. 2.15 Representación de variedades de antenas tipo hilo.....	26
Fig. 2.16 Representación de una antena tipo dipolo.....	26
Fig. 2.17 Diagrama de radiación para diferentes largos de dipolo.....	27
Fig. 2.18 Ejemplo de antena YAGI-UDA.....	28
Fig. 2.19 Representación de antena de apertura piramidal y cónica.....	28
Fig. 2.20 Ejemplo de antena plana de 18dBi.....	29
Fig. 2.21 Representación de un patch.....	29
Fig. 2.22 Representación de lóbulos al tener un usuario principal y uno de interferencia.....	30
Fig. 3.1 Representación de exterior de la antena Huawei AAU5645 (a) bosquejo (b) real instalada en el Laboratorio 5G.....	34
Fig. 3.2 Bosquejo exterior de la antena Huawei AAU5645.....	35
Fig. 4.1 Ventana de inicio de ALTAIR FEKO versión 2021.2.....	36
Fig. 4.2 Ventana Home de ALTAIR FEKO versión 2021.2.....	37

Fig. 4.3 Ventana Component library de ALTAIR FEKO versión 2021.2.....	37
Fig. 4.4 Ventana ajustes Component library de ALTAIR FEKO versión 2021.2.....	38
Fig. 4.5 Ventana Construct de ALTAIR FEKO versión 2021.2.....	39
Fig. 4.6 Ventana tipo de arreglo de ALTAIR FEKO versión 2021.2.....	39
Fig. 4.7 Ventana Create linear/planar antenna array de ALTAIR FEKO versión 2021.2.....	40
Fig. 4.8 Arreglos de antena (a) de 12x16 o 192 antenas y (b) de 3x4 o 12 antenas.....	41
Fig. 4.9 Ventana Construction de ALTAIR FEKO versión 2021.2.....	41
Fig. 4.10 Ventana Modify linear/planar antenna array de ALTAIR FEKO versión 2021.2.....	42
Fig. 4.11 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 0° azimut con Ganancia en veces..	44
Fig. 4.12 Diagrama polar con beam en 0° de elevación y 0° azimut con Ganancia en veces.....	44
Fig. 4.13 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 0° azimut con ganancia en dBi.....	45
Fig. 4.14 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 0° azimut con ganancia en dBi.....	45
Fig. 4.15 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 6° azimut con Ganancia en veces.	46
Fig. 4.16 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 6° azimut con Ganancia en veces.....	46
Fig. 4.17 Diagrama de radiación 3D con beam en 6° azimut con Ganancia en dBi.....	47
Fig. 4.18 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 6° azimut con Ganancia en dBi.....	47
Fig. 4.19 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 10° azimut con Ganancia en veces.	48
Fig. 4.20 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 10° azimut con Ganancia en veces.....	48
Fig. 4.21 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 15° azimut con Ganancia en veces.	49
Fig. 4.22 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 15° azimut con Ganancia en veces.....	49
Fig. 4.23 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 20° azimut con Ganancia en veces.	50
Fig. 4.24 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 20° azimut con Ganancia en veces.....	50
Fig. 4.25 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 25° azimut con Ganancia en veces..	51
Fig. 4.26 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 25° azimut con Ganancia en veces.....	51
Fig. 4.27 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 30° azimut con Ganancia en veces..	52
Fig. 4.28 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 30° azimut con ganancia en veces.....	52
Fig. 4.29 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 35° azimut con Ganancia en veces.	53
Fig. 4.30 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 35° azimut con Ganancia en veces.....	53
Fig. 4.31 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 40° azimut con Ganancia en veces..	54
Fig. 4.32 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 40° azimut con Ganancia en veces.....	54
Fig. 4.33 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 45° azimut con Ganancia en veces..	55
Fig. 4.34 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 45° azimut con Ganancia en veces.....	55

Fig. 4.35 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 46° azimuth con Ganancia en veces...	56
Fig. 4.36 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 46° azimuth con Ganancia en veces.....	56
Fig. 4.37 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y -37° azimuth con Ganancia en veces (obtenido en FEKO con fases de 47°).....	57
Fig. 4.38 Diagrama polar con beam en 0° elevación y -37° azimuth con Ganancia en veces (obtenido en FEKO con fases de 47°).....	57
Fig. 4.39 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y -37° azimuth con Ganancia en dBi (obtenido en FEKO con fases de 47°).....	58
Fig. 4.40 Diagrama polar con beam en 0° elevación y -37° azimuth con Ganancia en dBi (obtenido en FEKO con fases de 47°).....	58
Fig. 4.41 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y -6° azimuth con Ganancia en veces...	59
Fig. 4.42 Diagrama polar con beam en 0° elevación y -6° azimuth con Ganancia en veces.....	59
Fig. 4.43 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y -6° azimuth con Ganancia en dBi....	60
Fig. 4.44 Diagrama polar con beam en 0° elevación y -6° azimuth con Ganancia en dBi.....	60
Fig. 4.45 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y -10° azimuth con Ganancia en veces.....	61
Fig. 4.46 Diagrama polar con beam en 0° elevación y -10° azimuth con Ganancia en veces.....	61
Fig. 4.47 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y -15° azimuth con Ganancia en veces.....	62
Fig. 4.48 Diagrama polar con beam en 0° elevación y -15° azimuth con Ganancia en veces.....	62
Fig. 4.49 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 49° azimuth con Ganancia en veces.....	63
Fig. 4.50 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 49° azimuth con Ganancia en veces.....	64
Fig. 4.51 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 49° azimuth con Ganancia en dBi....	64
Fig. 4.52 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 49° azimuth con Ganancia en dBi.....	65

Nomenclatura

Unidades de medida:

dB	: Decibelios.
Hz	: Hertz.
GHz	: Giga Hertz.
MHz	: Mega Hertz.

Abreviaciones

Mayúsculas:

5G	: Quinta Generación de redes móviles.
AAU	: Unidad de antena activa.
BW	: Ancho de banda.
NR	: New Radio.
LoS	: Línea de visión (Line of Sight)
NLoS	: Sin línea de visión (Non Line of Sight)
SISO	: Sistema de una entrada y una salida (single input – single output).
MIMO	: Sistema de varias entradas y varias salidas (multiple input – multiple output).
SUBTEL	: Subsecretaría de Telecomunicaciones de Chile.
IEEE	: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers).
UCSC	: Universidad Católica de la Santísima Concepción.
UHF	: Ultra High Frequency.
IoT	: Internet of Things (Internet de las cosas).

Capítulo 1. Introducción.

1.1. Introducción General.

El ser humano siempre ha avanzado en adelantos tecnológicos para facilitar su comodidad, y de esta forma tener una vida mucho más fácil. Uno de los inventos más destacados ha sido la creación de la comunicación a largas distancias, así naciendo una rama de estudio de ésta, denominada “Telecomunicaciones”, que analiza y crea comunicación a largas distancias.

En este trabajo se analizará el comportamiento de una parte de la estructura de un sistema de Telecomunicaciones: la antena. Una antena es un conductor metálico capaz de emitir y recibir ondas electromagnéticas. Cada antena tiene un patrón de radiación diferente, o diagrama de radiación, que indica la dirección en que se concentra mayor potencia.

Según lo anterior, se estudiará, analizará, y comprenderá dicho patrón de radiación emitido por el arreglo de antenas del Laboratorio 5G Movistar de la UCSC. Para determinar su diagrama de radiación, es necesario realizar la simulación de este arreglo por medio del software FEKO, que entregará los datos necesarios para obtenerlo.

1.2. Trabajos Previos.

1.2.1 Teoría de Antenas.

- ♣ Para realizar lo mencionado en la Introducción, es necesario tener un conocimiento sobre antenas, diferencias entre sus diagramas de radiación, sus directividades, sus ganancias, entre otros. Igualmente, es necesario saber sobre la arquitectura de red 5G implementada en el Laboratorio Movistar 5G LAB UCSC.

1.2.2 Decreto vigente de adjudicación de servicio público de telecomunicaciones.

- ♣ Biblioteca del Congreso Nacional (2024, enero 19), *Decreto N° 77 “Otorga concesión de servicio público de telecomunicaciones a la empresa Telefónica Móviles Chile S.A. en la banda de frecuencias de 3,35 GHz y 3,4 GHz”*.
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1166009>

Este documento menciona la adjudicación de una banda de frecuencia del espectro 5G por parte de Telefónica Chile S.A

1.2.3 Estándar IEEE relacionado a antenas.

- ♣ Standard – IEEE (2021). Publicación de la IEEE STD 149-2021: “*Práctica recomendada por IEEE para mediciones de antenas*”
<https://standards.ieee.org/ieee/149/6667/>

El documento anterior describe las prácticas que hay que considerar para las mediciones de las propiedades de transmisión y recepción de antenas.

- ♣ IEEE, John Wiley (1979), “*Procedimientos de pruebas estándar IEEE para antenas/IEEE*”.

Este documento muestra contenidos de medición de alcance horizontal y vertical de una antena en relación a su patrón de radiación, muestra instrumentación necesaria para medirlo y señala técnicas especiales de medición.

1.2.4 Laboratorio 5G UCSC.

- ♣ Meza, C. (2021, noviembre 05). Tecnología 5G: UCSC y Movistar firman convenio para desarrollo de docencia e investigación. <https://ucsc.cl/medios-ucsc/noticias/tecnologia-5g-ucsc-y-movistar-firman-convenio-para-desarrollo-de-docencia-e-investigacion/>

En la publicación anterior, se menciona como llegaron a acuerdo la Universidad en conjunto con Movistar para poner en marcha el proyecto de Movistar 5G LAB, en las dependencias de nuestra Facultad.

1.2.5 Documentos de investigación anteriores.

- ♣ Trabajo formulado por María Ignacia Venegas. Abarca temas extensos de simulación y medición de potencia de la antena del Movistar 5G LAB.
- ♣ Con el trabajo denominado “Modelación y Medición antena Laboratorio 5G” [6] María Ignacia buscó analizar el comportamiento de la antena en cuanto a direccionamiento del beam (punto en el espacio donde se quiere concentrar la radiación), realizando una simulación de un arreglo de antenas de (12x16) tipo dipolo. Realizó mediciones de potencia externas e internas. Primero 25 mediciones de potencia en el exterior con un

radio de 8 metros alrededor de la antena para determinar el punto donde la antena posee la potencia máxima, luego con su simulación obtuvo la distribución de radiación en ese punto. Las mediciones internas, se realizaron al interior del Movistar 5G LAB. La primera detrás de la pared de concreto que divide el espacio libre donde se encuentra la antena y la segunda al fondo del Laboratorio con una distancia de separación de 7,6 metros de las mediciones.

- ♣ Trabajo realizado por Christopher Eduardo Muñoz Pardo de la Universidad de Chile.
- ♣ Denominado “Diseño, Implementación y Pruebas de un arreglo de antenas por fase para la detección de la emisión electromagnética de teléfonos celulares” [20]. En esta memoria se construyó un arreglo de antenas capaz de localizar las señales de radiofrecuencia emitidas por celulares, para lo cual se utilizó un arreglo de antenas por fases en el rango de frecuencias de 1850 –1920 [MHz], que corresponde a una de las bandas de subida de datos de un celular para la tecnología 3G.

1.2.6 Discusión.

La colaboración entre Movistar y la UCSC para desarrollar soluciones basadas en tecnología 5G nace gracias a la iniciativa gubernamental “Observatorio Nacional 5G” que impulsa la investigación universitaria del 5G. Como base de investigación se destaca la teoría de antenas, basada en autores clave como Balanis y Stutzman, esenciales para el análisis de antenas y la metodología empleada.

También de suma importancia, “Modelación y medición antena Laboratorio 5G” autora María Ignacia, ligada a la investigación y simulación del arreglo de antenas del Laboratorio 5G. La tesis de Christopher Muñoz “Diseño, Implementación y Pruebas de un arreglo de antenas por fase para la detección de la emisión electromagnética de teléfonos celulares”, es fundamental para comprender el funcionamiento de un arreglo de antenas en fase.

Se incluye el marco legal vigente que asigna la banda de 3.35 – 3.40 GHz a Movistar.

En conjunto, estas referencias sustentan una base para la metodología y el análisis de los resultados obtenidos de esta tesis contribuyendo el funcionamiento de la antena AAU5645 del Laboratorio 5G de la UCSC.

1.3. Hipótesis de Trabajo.

La variación de las fases en cada elemento de un arreglo de antenas tipo patch modificará significativamente la ganancia, así como la forma y dirección del lóbulo principal del diagrama de radiación.

1.4. Objetivos.

1.4.1 Objetivo General.

Modelar el beam del diagrama de radiación de la antena del Movistar 5G LAB UCSC.

1.4.2 Objetivos Específicos.

- i) Estudiar y aprender la utilización del software FEKO.
- ii) Simular parte de la configuración de la antena 5G con arreglos de Patches en FEKO.
- iii) Realizar un estudio del diagrama de radiación en varias direcciones horizontales del beam.

1.5. Alcances y Limitaciones.

Uno de los mayores alcances que se tiene hasta el momento es la utilización de la antena para medir potencia, y ver el direccionamiento máximo del beam.

Lo anterior ha sido señalado como lo primero en experimentar y comprobar para trabajar con la antena. Por lo tanto, en un futuro habrá más ideas innovadoras para desarrollar nuevos proyectos. Por ejemplo, se puede aprovechar la sinergia y trabajar en conjunto con otras universidades, abriendo nuevas posibilidades para el trabajo en la industria de las Telecomunicaciones.

Como limitaciones, se puede mencionar que, al no tener activa la antena (a la fecha que se realiza esta tesis), no se puede determinar con exactitud como opera la forma de transmitir radiación, porque no se puede medir la potencia, ya que no es posible realizar mediciones alrededor de la antena. Otra limitación es no poseer una ficha técnica que señale que tipo de antena es para realizar una modelación exacta y ver cómo se distribuye la radiación en distintos puntos del espacio. Para finalizar, la última limitación es no poder modelar toda la antena, por temas del Software.

1.6. Temario y Metodología.

1.6.1 Temario.

La siguiente tesis se divide en los siguientes capítulos:

- i) **Capítulo 1:** Introducción, presenta el trabajo de esta tesis, el Movistar 5G LAB, revisión bibliográfica, objetivos, hipótesis, alcances, limitaciones y metodología.
- ii) **Capítulo 2:** Marco teórico, se presentan los parámetros generales de las antenas, el funcionamiento de un arreglo de antenas y sus clasificaciones.
- iii) **Capítulo 3:** Se mencionan las características del Movistar 5G LAB y las especificaciones de la antena.
- iv) **Capítulo 4:** Análisis y Simulaciones, se hace una breve introducción de ALTAIR FEKO, y se presentan las simulaciones realizadas para este trabajo.
- v) **Capítulo 5:** Conclusiones.

1.6.2 Metodología.

El análisis de antenas es una parte fundamental del área de Señales y Telecomunicaciones de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la UCSC. De todo el espectro de antenas disponibles para su estudio, esta investigación se basa solo en un tipo de ellas para realizar el análisis, la antena tipo patch.

La tecnología 5G ha ido en auge en el mundo, trayendo nuevos proyectos de investigación para el estudio de conectividad de dispositivos, transmisión en vivo a largas distancias, IoT, entre otros. Poniendo como objeto de estudio para esta investigación la conectividad entre usuarios, se estudiará un componente fundamental de la arquitectura de red 5G que tiene relación con la conectividad: la antena del Movistar 5G LAB UCSC. El uso del software FEKO es esencial para la realización de este proyecto, ya que arrojará un diagrama de radiación clave para analizar el comportamiento de la antena inteligente AAU5645 del Laboratorio 5G. Se resolverá solo con simulaciones de elementos irradiadores patches, distribuidos homogéneamente en el plano XY y que

emiten su señal en forma de radiación a una frecuencia de 3,4 GHz, frecuencia adjudicada por Telefónica Chile S.A.

El enfoque de estudio se centró en el comportamiento en forma de arreglo matricial de la antena en fase, donde se evaluaron las fases individuales de cada uno de los elementos para distintas posiciones, teniendo un direccionamiento en específico para diferentes casos a evaluar. Finalmente, obtenidas las simulaciones se compararon los anchos de beam obtenidos para los casos anteriores y la ganancia.

1.6.3 Simulación.

- ♣ La versión utilizada de FEKO fue la 2021.2 obtenida oficialmente de la página ALTAIR FEKO.
- ♣ Las licencias utilizadas fueron dos, una para trabajar con la red interna de la Universidad y otra para redes externas. Para trabajar con red interna se modificó la dirección IP del PC a 6200@10.66.30.30 y para la externa a 6200@200.14.96.86.

Capítulo 2. Marco Teórico.

2.1. Definición de Antena.

Una antena es un dispositivo especial para recibir y/o emitir ondas electromagnéticas a través de un medio aéreo [3]. Estos dispositivos poseen muchas clasificaciones y variedad. Dependiendo de sus clasificaciones, tendrán diferentes características.

Una antena transmisora convierte una corriente eléctrica en ondas electromagnéticas, y una receptora hace el procedimiento inverso [3].

Se utilizan en radios emisoras, televisión por satélite, telefonía móvil (ver Fig. 2.1), para routers inalámbricos, mandos remotos, entre otros.



Fig. 2.1 Antena empleada en la telefonía móvil [9]

2.2. Parámetros de una antena.

Los parámetros de una antena son las características internas que poseen para realizar análisis, estudios y clasificaciones.

2.2.1 Ancho de banda.

El ancho de banda es el rango de frecuencias del espectro electromagnético sobre las cuales la operación de la antena es satisfactoria [5].

2.2.2 Diagrama de Radiación.

El diagrama de radiación de una antena se refiere a la intensidad radiada en cada dirección por la antena [4]. Se representan de forma gráfica las propiedades direccionales de radiación de la antena.

A continuación, se representan tres diagramas de radiación diferentes, para antena tipo dipolo, para antena tipo patch y para un arreglo de dos antenas tipo patch.

- **Dipolo:**

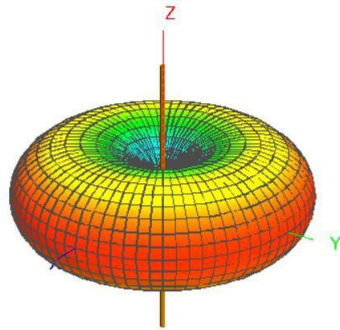


Fig. 2.2 Diagrama de radiación 3D de una antena tipo dipolo.

- **Patch:**

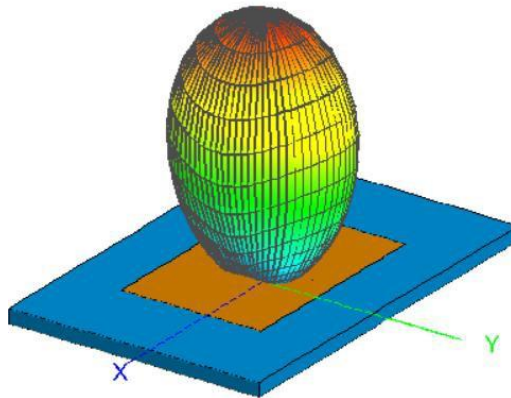


Fig. 2.3 Diagrama de radiación 3D de una antena tipo patch.

Como se puede observar, los dos diagramas son diferentes, ya que cada antena emite su intensidad de diferentes formas.

Para este proyecto, se simularán antenas tipo patch, por lo tanto, el diagrama de radiación será muy similar al segundo caso.

- **Arreglo de dos antenas tipo patch:**

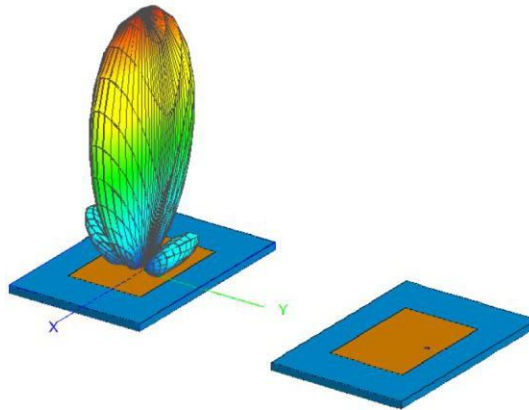


Fig. 2.4 Diagrama de radiación 3D de un arreglo de 2 antenas tipo patch.

Para analizar un diagrama de radiación, hay que entender los diferentes parámetros que conforman este. A continuación, se mencionan las diferentes partes de un diagrama de radiación:

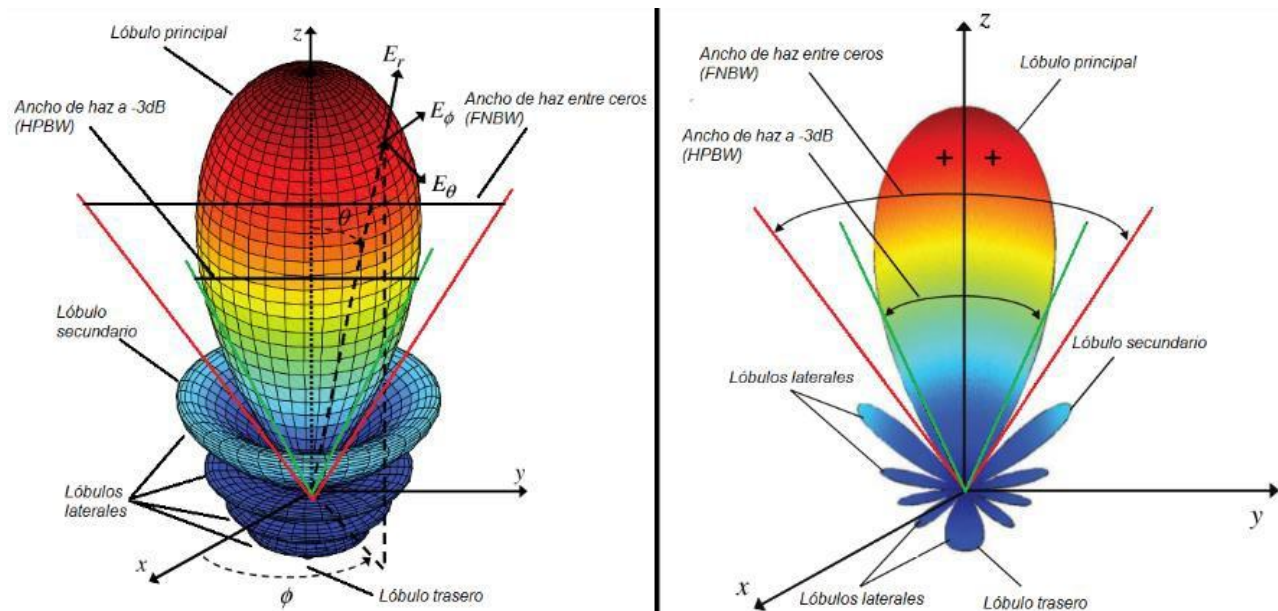


Fig. 2.5 Representación de las diferentes partes de un diagrama de Radiación en 3D [14]

- **Lóbulos de radiación:** es la porción del diagrama delimitado por regiones de menor radiación, los cuales se dividen en:
 - **Lóbulo Principal:** También conocido 'Main Lobe' o 'Main Beam', es el rango angular en torno a la dirección de máxima radiación (zona de radiación máxima).

- *Lóbulos Secundarios*: Son el resto de lóbulos de máximos relativos y de valor inferior al principal (lóculo lateral de mayor amplitud).
- *Lóbulos Laterales*: Son los lóbulos o zonas que rodean los máximos de menor amplitud.
- *Lóbulos Posteriores*: Lóbulo diametralmente opuesta al lóbulo principal.
- **Parámetros de los Lóbulos:**
 - *Nivel de Lóbulos Secundarios*: Nivel del mayor lóbulo secundario respecto al principal.
 - *Relación de Lóbulo Principal a Secundario (NLPS)*: Es la división en dB entre el valor máximo del lóbulo principal y el valor máximo del lóbulo secundario, que suele ser adyacente al principal.
 - *Ancho de haz Principal a -3 dB (HPBW)*: Rango angular en el que el diagrama de radiación de un haz toma un valor de -3 dB por debajo del máximo. Es decir, donde la potencia se reduce a la mitad del valor máximo.
 - *Ancho de haz Principal entre nulos (FNBW)*: Grado de separación angular del haz principal. Se encuentra entre los puntos nulos del lóbulo principal del diagrama de radiación.
 - *Relación delante-atrás (FBR)*: Es la división en dB entre el valor de máxima radiación (lóculo principal) y el de sentido opuesto (lóculo posterior).

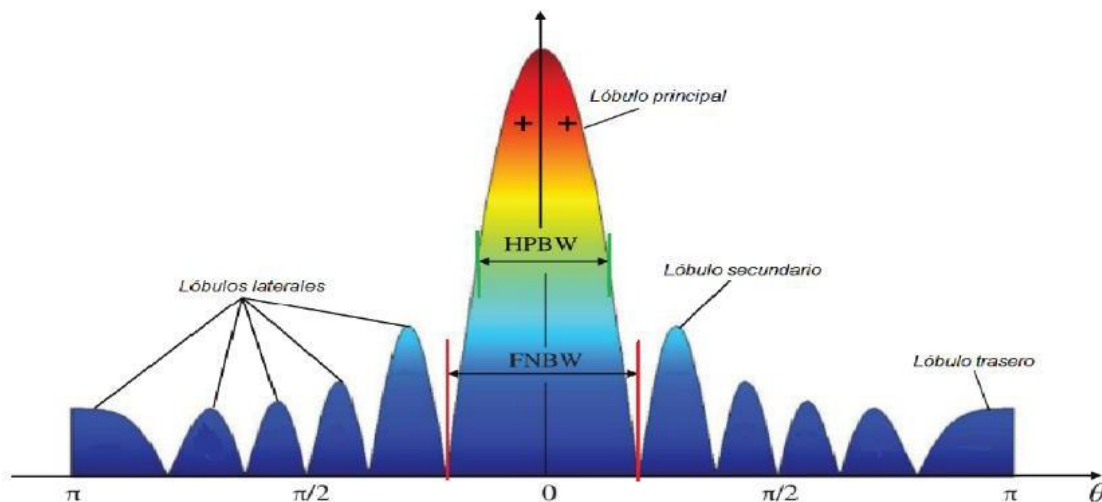


Fig. 2.6 Representación de las diferentes partes de un diagrama de Radiación plano 2D [14]

Respecto a antenas linealmente polarizadas (antenas que emiten señales en radiofrecuencias en un plano en la dirección de propagación), se puede representar el diagrama de radiación en el plano 2D, dividido en dos:

- **Plano E:** Este plano se forma por la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en esa dirección.
- **Plano H:** Se forma por la dirección de máxima radiación y el campo magnético en esa dirección.

A continuación, se muestra la representación de cada uno de los planos:

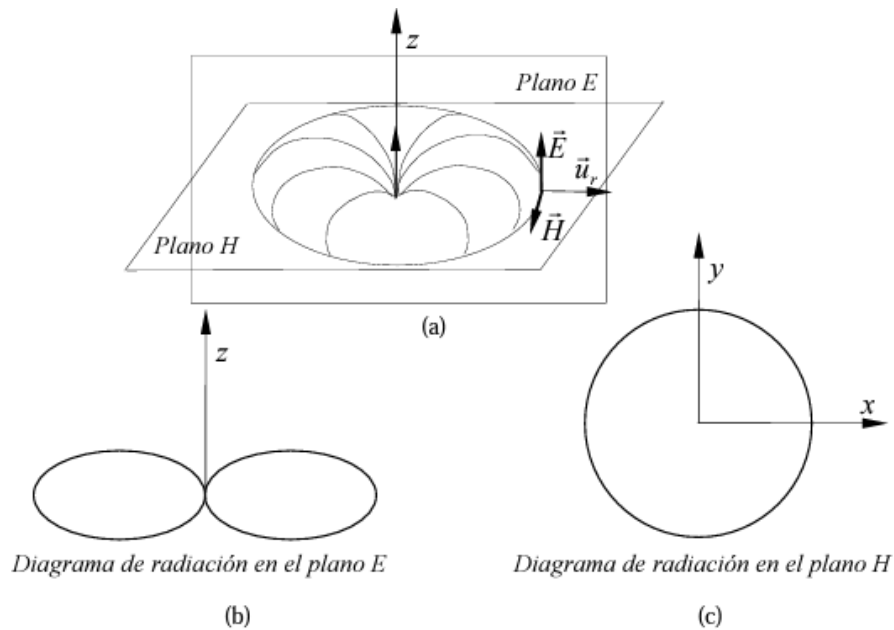


Fig. 2.7 Diagrama de radiación en diferentes planos (a) Representación 3D de un diagrama de radiación (b) Representación 2D de un diagrama de radiación donde oscila el Campo Eléctrico (c) Representación 2D de un diagrama de radiación donde oscila el Campo Magnético [15]

2.2.3 Clasificación de antenas por su estructura Lobular.

- **Antena Isotrópica:** Antena ideal que radia la misma intensidad en todas las direcciones del espacio. Esta antena se utiliza como una referencia para definir los parámetros de una antena real [5].
- **Antena Omnidireccional:** Son antenas que proporcionan cobertura en todas las direcciones en un mismo plano a partir del punto de transmisión. Estas antenas transmiten o reciben energía en todas las direcciones. Como son antenas que cubren la totalidad de ángulo en direcciones en un plano, son las que menos concentran potencia, por lo tanto, las que menos ganancia tienen [5].



Fig. 2.8 Ejemplo de antena omnidireccional [16]

- **Antena de Multi-haz:** Esta antena permite aumentar la capacidad de tráfico, debido a una mayor sectorización horizontal o vertical y constituye una solución ideal para el alto tráfico de eventos masivos. Ofrece la posibilidad de conmutar el haz para proporcionar la mejor señal para el usuario como antena inteligente, y de poseer gran cobertura para un mejor alcance y calidad de la red [5].

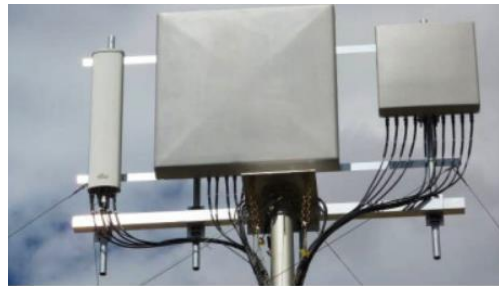


Fig. 2.9 Ejemplo de antena multi-haz [16]

- **Antena pencil beam:** Es una antena direccional que está extremadamente agrupada tanto en dirección vertical como horizontal. Están hechas de un material especial llamado Metamaterial para lograr un ángulo de haz pequeño [5].

2.2.4 Directividad.

La directividad de una antena se define como la relación entre la potencia radiada en la dirección de máxima radiación a una distancia “R” por una antena isotrópica, y la potencia que radiaría la antena en esa misma distancia. Esta directividad, se puede calcular a partir del diagrama de radiación.

Se puede mencionar que una antena es muy directiva cuando concentra la potencia radiada en una determinada dirección [5].

2.2.5 Ganancia.

Su definición es similar a la de directividad, pero la comparación no se establece con la potencia radiada, si no con la potencia de alimentación de la antena. La ganancia pone de manifiesto el hecho de que una antena real no radia toda la potencia que se le suministra, si no que parte de esta se disipa en forma de calor. Por lo tanto, la ganancia y la directividad están relacionadas por el rendimiento de la antena. [5]

2.2.6 Rendimiento.

Es la relación entre la potencia de radiación y la potencia de alimentación aplicada en la antena. Medir el rendimiento de una antena es fundamental para garantizar que esta funcione de forma óptima y eficiente. Al conocer las características y el funcionamiento de la antena permite ajustar y mejorar su desempeño, lo cual refleja una mejor calidad de señal y alcance. Los beneficios que trae conocer el rendimiento pueden ser reducir las interferencias y pérdidas de la señal, optimizar el uso de energía e identificar problemas en la instalación o el diseño de la antena [5].

2.2.7 Impedancia.

Una antena cuando se conecta a un transmisor o a un receptor, deberá radiar el máximo de potencia posible con un mínimo de pérdidas. Por lo tanto, se deberá adaptar el transmisor o receptor a la antena para una máxima transferencia de potencia que se suele hacer por medio de una línea de transmisión. Esta línea influye en la adaptación, al igual su impedancia característica y atenuación. La impedancia característica Z_0 es un parámetro que depende de parámetros primarios, como de la relación longitud/ diámetro del material del conductor, y de la frecuencia de trabajo, mientras que la impedancia de entrada se refiere al parámetro de la antena determinado por la relación entre voltaje de entrada y corriente en los terminales [5].

2.2.8 Ancho de haz.

El ancho de haz es un parámetro del diagrama de radiación. Se puede definir el ancho de haz a los -3 dB, donde la densidad de potencia radiada es la mitad de la potencia máxima. También se puede definir el ancho de haz entre ceros, que es el intervalo angular del haz principal del diagrama de radiación, entre los dos ceros adyacentes al máximo [5].

A continuación, se representa un plano polar donde se señala el ancho de haz:

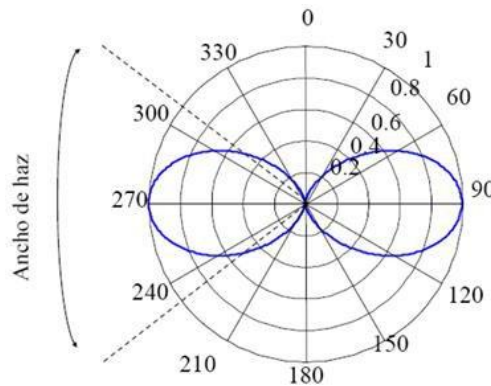


Fig. 2.10 Representación del ancho de haz a -3 dB [9]

2.2.9 Arreglo (Arrays).

Un arreglo de antenas está compuesto por ciertos números de elementos irradiadores idénticos y ordenados regularmente para obtener una radiación predeterminada [5]. Una de las principales ventajas de realizar un arreglo es poder controlar las amplitudes de las corrientes y la fase de cada elemento, por ejemplo, en los phased arrays, modificando la forma del diagrama de radiación.

Existen cinco métodos para controlar el diagrama de radiación de un array, los principales son:

- **Mediante configuración geométrica (lineal, plano, circular, entre otros)**
 - *Arreglo Lineal:* Es un grupo de elementos radiantes organizados en una línea, de tal manera que produzca unas características de radiación determinadas. En muchas aplicaciones, es necesario diseñar antenas con mayor energía de radiación en algunas direcciones en particular y menos energía en otras. Este arreglo es utilizado para obtener una mayor directividad que con una sola antena.

A continuación, se muestra un arreglo lineal de n elementos isotrópicos:

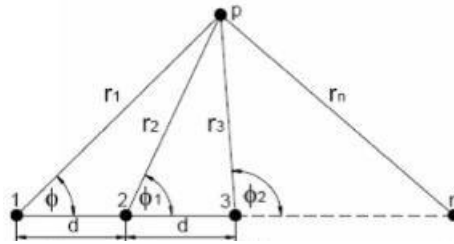


Fig. 2.11 Arreglo de antenas lineal separados a una misma distancia d , radiando a un punto 'p' lejano [17]

$$r_n = r_1 - (n - 1)d \cos\phi \quad (1)$$

Donde ' r_1 ' es la distancia de la antena 1 con el punto 'p', ' n ' es el número de elementos irradiadores, ' d ' es la distancia entre las antenas y ' ϕ ' es el ángulo entre la horizontal y la recta formada por cada antena.

▪ *Arreglo Planar:*

Este arreglo, es en dos dimensiones y es una extensión del arreglo lineal en X e Y. Tiene un diagrama de radiación más directivo.

La distribución de corrientes en este array es uniforme. Como el arreglo en el plano es una extensión de un arreglo lineal en X y en Y, se tiene el factor de arreglo:

$$F.A_n(\theta, \varphi) = \left(\frac{1}{M} \frac{\sin \frac{M}{2} \psi_x}{\sin \frac{\psi_x}{2}} \right) \left(\frac{1}{N} \frac{\sin \frac{N}{2} \psi_y}{\sin \frac{\psi_y}{2}} \right) \quad (2)$$

Donde:

$$\psi_x = kd_x \sin\theta \cos\varphi + \beta_x \quad (3)$$

$$\psi_y = kd_y \sin\theta \sin\varphi + \beta_y \quad (4)$$

El ancho de haz a media potencia para el plano de elevación se representa como:

$$\theta_{\text{ANCHO DE HAZ ELEVACIÓN}} = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \theta_0 [\theta_{0x}^{-2} \cos^2 \phi_0 + \theta_{0y}^{-2} \sin^2 \phi_0]}} \quad (5)$$

El ancho de haz a media potencia para el plano de azimuth se representa como:

$$\psi_{\text{ANCHO DE HAZ AZIMUT}} = \sqrt{\frac{1}{\theta_{0x}^{-2} \sin^2 \phi_0 + \theta_{0y}^{-2} \cos^2 \phi_0}} \quad (6)$$

Donde ‘ θ_{0x} ’ representa el ancho de haz de M elementos de antena, y ‘ θ_{0y} ’ representa lo mismo, pero con N elementos.

A continuación, se representa un arreglo plano de antenas para tener de referencia:

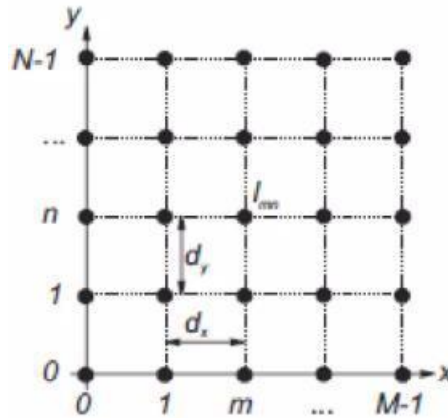


Fig. 2.12 Arreglo lineal sobre el plano X e Y [17]

- **Fase de excitación de cada elemento:** Para la transmisión de señales, una antena de múltiples elementos radiadores se le puede controlar la dirección del frente de onda, cambiando las fases de las señales individuales en el conjunto de antenas. Entonces, la onda se puede dirigir a la dirección que se desea, siguiendo los dispositivos de los usuarios.

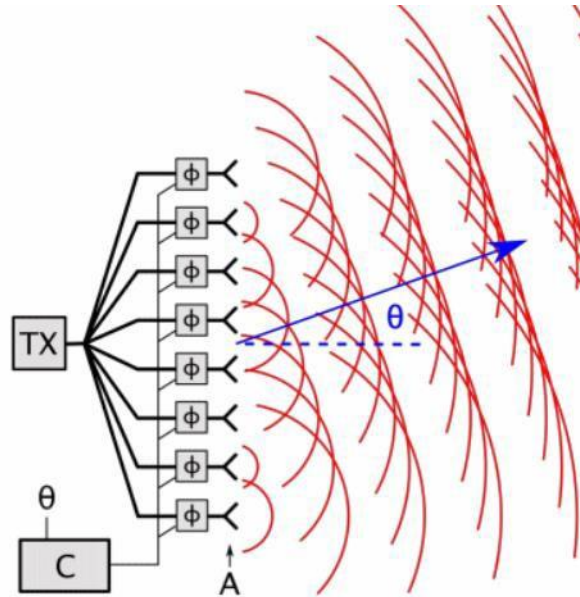


Fig. 2.13 Antenas con desfasadores emitiendo señal en el espacio libre con un ángulo θ [17]

Cuando un haz resultante apunta a una antena receptora en campo lejano, la distancia desde cada elemento de antena es ligeramente diferente, donde la diferencia de longitud de la trayectoria para cada señal es:

$$distancia = d \cos(\theta) \quad (7)$$

Donde ' θ ' es el ángulo que se forma de cada señal. Por lo tanto, para compensar esa diferencia, de modo que cada señal llegue a la misma fase, se aplican desfasadores a cada elemento irradiador lo que da como resultado un haz de frentes de onda coherente en campo lejano.

En este array el máximo de radiación se encuentra en $\theta = 90^\circ$. El Factor de Arreglo (medida que describe el diagrama de radiación de una antena y que varía dependiendo del número de antenas de un arreglo, disposición espacial y separación) es máximo cuando:

$$\psi = kd \cos\gamma + \alpha \quad (8)$$

Donde ' ψ ' es la diferencia de fases, ' γ ' es el ángulo de apuntamiento que forma cada onda, ' α ' es el desfase progresivo de cada antena, ' d ' es el distanciamiento de cada antena y ' k ' es una

constante dependiente de la longitud de onda ' λ ' según la siguiente ecuación:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (9)$$

Para tener una referencia de un arreglo en fase, se muestra la siguiente imagen:

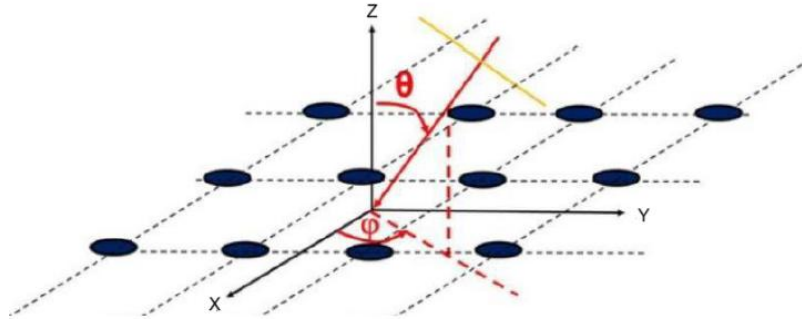


Fig. 2.14 Arreglo en fase de n elementos [18]

De la figura anterior, se desea conocer el ángulo elevación, donde será **ELEVACIÓN= 90°- θ**, también el ángulo **AZIMUTH=φ**.

2.2.10 Beam Forming.

Determina cual es el mejor camino que deberían tomar las señales para alcanzar un dispositivo cliente. Beam Forming es una manera de manejar la señal de radiofrecuencia por medio de un Access Point que utiliza múltiples entradas para transmitir la misma señal [5]. Funciona enviando múltiples señales y analizando el Feedback que son las señales de vuelta de los dispositivos clientes, así, la infraestructura de la red inalámbrica puede ajustar estas señales enviadas y determinar cuál es el mejor camino que deberían tomar.

El Beam Forming permite a la antena conformar haces estrechos capaces de escanear simultáneamente o secuencialmente el espacio 3D, por lo que se pueden seleccionar concentraciones de radiaciones de una antena emisora o receptora en una dirección. Esta concentración selectiva de radiación permite mejorar la relación señal a ruido SNR_{dB} (relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido que la corrompe) y elimina interferencias.

Los puntos más destacados son que coordina la señal enviada de cada antena, por lo que los usuarios ven una notable mejora de la señal del enlace. También se utiliza cuando el receptor solo tiene una antena. El Beam Forming permite un mayor ancho de banda, y también permite trabajar con tecnología MIMO (múltiples entradas y múltiples salidas, tecnología utilizada en telecomunicaciones que emplea múltiples antenas tanto en el transmisor como receptor para mejorar la eficiencia de transmisión de datos).

2.3. Tipos de antenas.

2.3.1 Antena de Hilo.

Están formadas por hilos o líneas conductoras, eléctricamente delgadas, cuyo diámetro es mucho menor que la longitud de onda λ que se propaga en la señal. Pueden estar formados por hilos rectos, como dipolos y rombos, hilos con forma de espirales, con forma circular, cuadrada u otros [9].

A continuación, se presenta una gama de tipos de antenas hilo que son empleados en radiocomunicaciones:

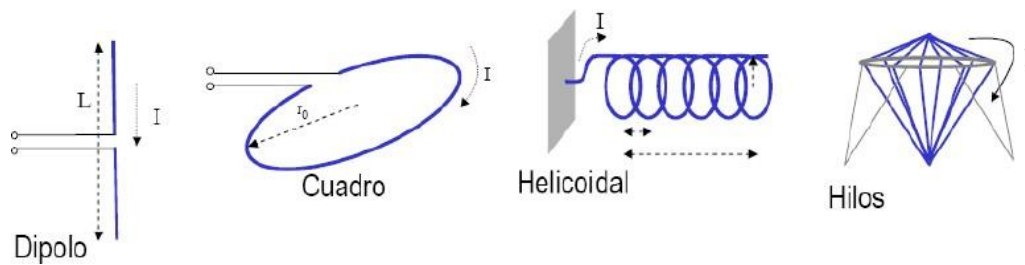


Fig. 2.15 Representación de variedades de antenas tipo hilo [9]

El tipo más común de esta antena es el dipolo. El dipolo de media onda es el tipo más común, consiste en un hilo conductor dividido en dos, en cuyo centro se coloca un generador o una línea de transmisión y que generalmente son fabricados de aluminio [9].

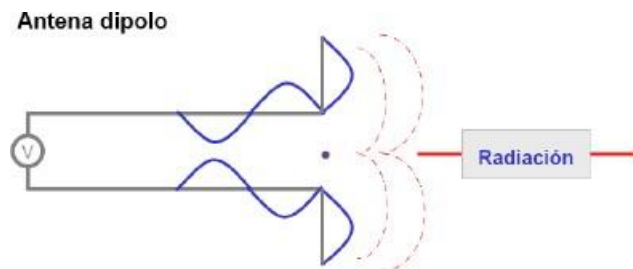


Fig. 2.16 Representación de una antena dipolo [9]

Como no todos los dipolos tienen la misma longitud, la representación gráfica del diagrama de radiación será diferente dependiendo de la longitud L . Los dipolos más comunes son los siguientes:

Tabla 2.1 Longitudes de antenas tipo dipolo [9]

Longitud dipolo
$\frac{\lambda}{2}$
λ
$\frac{3\lambda}{2}$
2λ

A continuación, se procederá a mostrar los diferentes diagramas de radiación en forma polar para las diferentes longitudes:

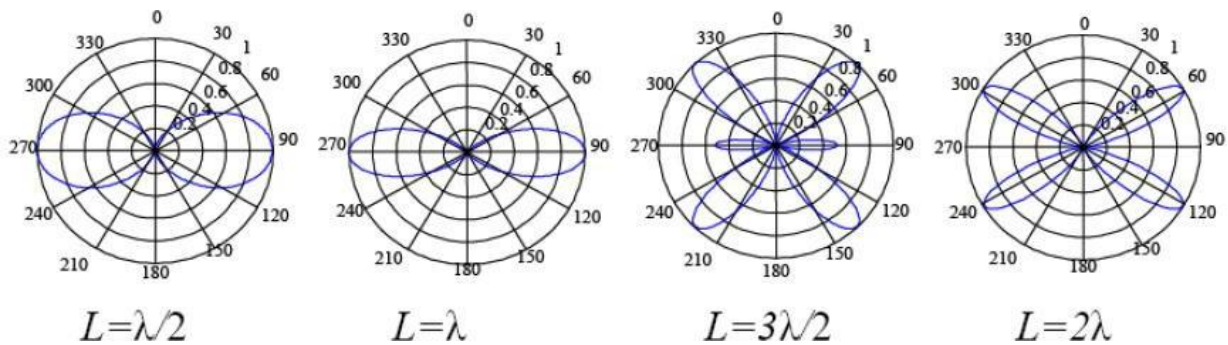


Fig. 2.17 Diagrama de radiación para diferentes largos de dipolo [9]

2.3.2 Antena YAGI-UDA.

Un ejemplo clásico de esta antena, es usada mayoritariamente como recepción de señales de televisión en la banda UHF, ya que poseen gran directividad, formada por dipolos de distintas longitudes para aumentar el ancho de banda [9].

A continuación, se presenta una representación de esta antena:

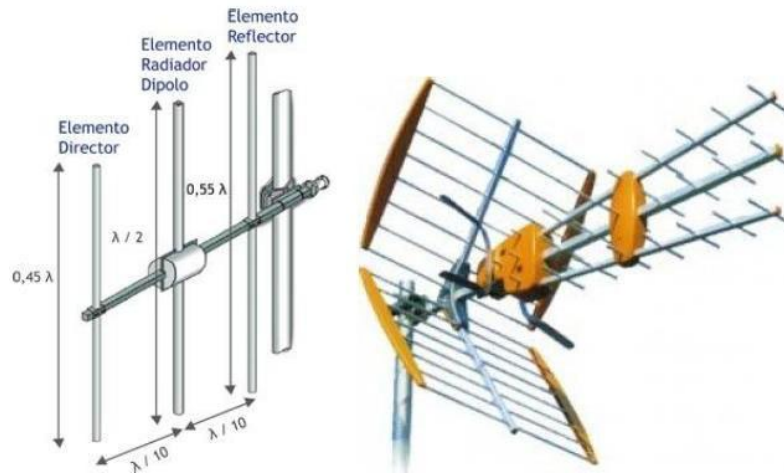


Fig. 2.18 Ejemplo de antena YAGI-UDA [9]

Esta antena es capaz de concentrar la mayor parte de energía radiada de forma localizada, aumentando considerablemente la potencia emitida hacia el receptor o recibida desde la fuente, y así evitar interferencias introducidas por fuentes no deseadas.

2.3.3 Antena de Apertura.

Tienen estructura de bocina (piramidales o cónicas), que se utiliza de forma generalizada a frecuencias de microondas, por sus características de un gran ancho de banda y por su facilidad de construcción y diseño [9].



Fig. 2.19 Representación de antena de apertura piramidal y cónica [9]

2.3.4 Antena plana.

Son antenas microstrip que están formadas por un agrupamiento de patches y un circuito que distribuye la señal entre ellos. Su diseño está hecho de tal forma que la estructura disipe potencia en forma de radiación. Los patches se fabrican utilizando técnicas de fotograbado sobre un sustrato dieléctrico laminado en cobre por ambas partes. Al ser una tecnología plana, facilita su integración con el resto del sistema favoreciendo en el tamaño y peso [9].



Fig. 2.20 Ejemplo de antena plana de 18 dBi [9]

A continuación, se representa un bosquejo de un patch:

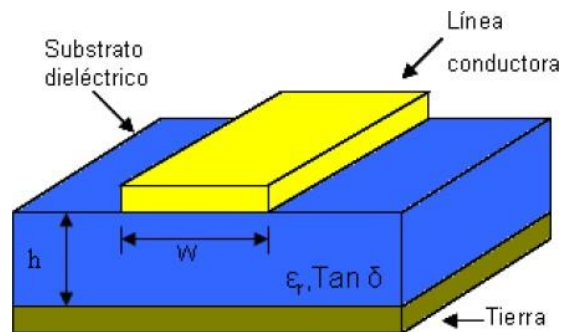


Fig. 2.21 Representación de un patch [19]

Poseen una tira conductora de ancho 'W'. La tira conductora se encuentra por encima del sustrato dieléctrico, el cual tiene un ancho 'h' y se puede apreciar en la imagen anterior.

2.3.5 Arrays.

Es un grupo de antenas que cuando se conectan, funcionan como una sola antena cuyo ancho de haz y dirección (patrón de radiación) puede cambiarse electrónicamente sin mover físicamente ninguna antena.

Una de las ventajas de esta antena es que elimina la necesidad de mover físicamente sus elementos irradiadores. Una de las aplicaciones de un arreglo es en los radares, donde los patrones de radiación deben moverse rápidamente para seguir un objeto en movimiento. También, se puede controlar, ajustar, o cambiar electrónicamente la amplitud de las corrientes y la fase de cada antena individual, variando la forma del diagrama de radiación [9].

2.3.6 Antena Inteligente.

Esta antena nace de la necesidad de mejorar la capacidad y la calidad de los servicios de telecomunicaciones, así como de ofrecer un mayor número de servicios inalámbricos. De ahí surgen las antenas inteligentes, que consiguen aumentar la capacidad de conexión a múltiples usuarios simultáneamente con una serie de ventajas. Se puede apreciar cuando el usuario se desplaza, modificando la dirección del lóbulo principal para que se mueva con él, se minimiza la interferencia de otras señales no deseadas. En el caso de que haya varios usuarios conectados simultáneamente, el sistema permite transmitir el haz de forma desglosado en varios lóbulos altamente directivos, de forma que se mejora la eficiencia en la red considerablemente y se incrementa la capacidad de conexión en ambos sentidos [9].

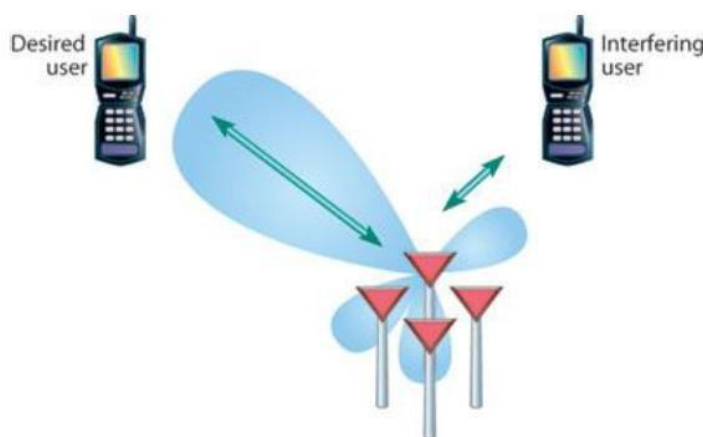


Fig. 2.22 Representación de lóbulos al tener un usuario principal y uno de interferencia [9]

Existen dos tipos de haz en una antena inteligente:

- **Haz Conmutado:** El sistema forma varios haces con ángulos prefijados que se van conmutando secuencialmente, dando como resultado un barrido discreto de la zona de cobertura en posiciones angulares fijas.
- **Haz de Seguimiento:** El sistema está formado por un array de antenas con una red de excitación que permite controlar electrónicamente las fases de las corrientes de excitación que llegan a sus elementos para modificar la dirección del haz convenientemente

Capítulo 3. Movistar Lab 5G UCSC.

3.1. Laboratorio 5G.

A fines del año 2021, la Universidad Católica de la Santísima Concepción firmó un convenio con Telefónica Chile cuyo objetivo es incrementar el desarrollo e investigación ligado a la tecnología 5G, teniendo como resultado la creación de un espacio de estudio situado en el tercer piso de la Facultad de Ingeniería denominado “Movistar 5G LAB”. Este laboratorio cuenta con tecnología de última generación 5G, incluyendo la antena emisora de señal Huawei AAU5645, así como equipamiento con conectividad móvil que posibilita la investigación y actividades entre estudiantes y docentes.

Este entorno fue creado para generar grandes oportunidades para investigar sobre conectividad, y llevar a cabo actividades de investigación para explorar los diversos alcances, utilidades y aplicaciones de la nueva generación de tecnología móvil dentro del campo de ingeniería eléctrica.

Actualmente, el laboratorio cuenta con dos televisores, uno con resolución 8k, y otro con 4k, cámaras de grabación en 360° y 180 VR, laptops, lentes de realidad virtual, smartphones, entre otros dispositivos. Estos dispositivos van a ser de gran ayuda al realizar pruebas de señal, abriendo un campo de estudio innovador para los estudiantes de Ingeniería Civil Eléctrica, cuyo objetivo principal se basa en adquirir capacidad de experimentar y crear soluciones que impulsen mejoras en la calidad de vida de la sociedad utilizando la nueva tecnología 5G.

3.2. Especificaciones de la antena.

La antena Huawei AAU5645(Active Antenna Unit) está conformada por 64 canales de transmisión y recepción.

Además, cuenta con tecnología MIMO (múltiples entradas y múltiples salidas) cuya finalidad es ajustar los haces de transmisión para el plano horizontal y vertical proporcionando cobertura 3D mejorada. También cuenta con un ancho de banda amplio de 200 MHz OBW (ancho de banda ocupado).

Esta antena fue diseñada para proporcionar un alto rendimiento en los espectros de frecuencia de 3,3 a 3,6 GHz, que está dentro del rango de frecuencia adjudicado por Movistar (3,35 a 3,4 GHz). Se destaca por ser la única antena 64T A+P de la industria. Esto significa que integra una unidad de antenas activas y pasivas en una sola caja, con un total de 192 antenas. Lo anterior significa que está compuesta por antenas pasivas que transmiten y reciben señal, y las antenas activas que poseen componentes para amplificar la señal para mayor ganancia y sensibilidad de la señal. En cuanto a la distribución exacta de los elementos irradiadores se puede mencionar que es información confidencial por Huawei y fue proporcionada para el tema de simulaciones.

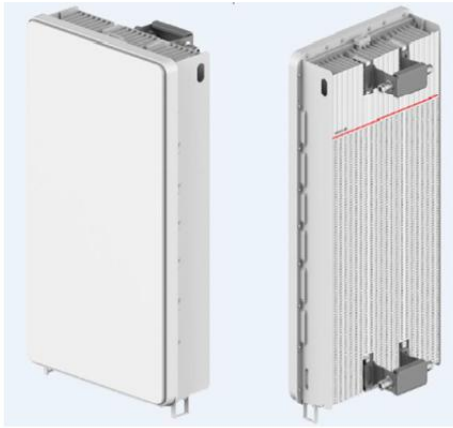
En resumen, la antena inteligente Huawei AAU5645 cuenta con los siguientes aspectos [12]:

1. Proporciona conectividad a través de banda ancha a dispositivos móviles como en el caso de smartphones, tablets, laptops, lentes de realidad virtual, cámaras, entre otros dispositivos.
2. Permite establecer conexiones inalámbricas fijas como redes WiFi proporcionada por un CPE (Customer Premises Equipment, es un equipo que permite la conexión y acceso a servicios de telecomunicaciones) conectado a la antena en hogares y empresas.
3. Brinda conectividad a dispositivos IIoT (Internet industrial de las cosas) utilizados en entornos industriales para la recopilación y transmisión de datos destacando la gran cantidad de dispositivos interconectados entre sí que se presenta en una red IIoT.
4. Ofrece aplicaciones de conectividad para ciudades inteligentes a través del IoT, como la sincronización de semáforos, sistemas de seguridad, servicios de emergencia, también la casa del futuro inteligente, interconectados todos sus dispositivos a la red 5G.
5. Diseñada para soportar una velocidad de 10 Gbps de datos, lo que la hace ideal para realizar actividades donde se requiera comunicación al instante, reuniones o aplicaciones de realidad virtual, teniendo una latencia de 1 [ms].

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas de la antena.

Tabla 3.1 Especificaciones de la antena Huawei AAU5645 [12]

Ítem	Especificación
Banda de frecuencia.	3,3 GHz a 3,6 GHz
Polarización.	+45° a -45°
Ganancia (dBi)	25
Alcance horizontal del beam.	-60° a +60°
Alcance vertical del beam.	-15° a +15°
Número de elementos irradiadores.	192



(a)



(b)

Fig. 3.1 Representación de exterior de la antena Huawei AAU5645 (a) bosquejo [12] (b) real instalada en el Laboratorio 5G [6]

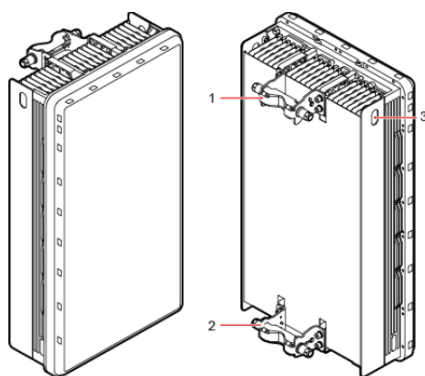


Fig. 3.2 Bosquejo exterior de la antena Huawei AAU5645 [12]

Tabla 3.2 Especificaciones del bosquejo de la antena Huawei AAU5645 [12]

Ítem	Especificación
1	Kit de montaje: Mango superior.
2	Kit de montaje: Mango inferior.
3	Orificio de refuerzo de seguridad anticaída

Las bandas de frecuencia que es capaz de soportar la antena están especificadas en la siguiente tabla:

Tabla 3.3 Especificaciones de bandas de frecuencia de la antena Huawei AAU5645 [12]

Banda de frecuencia	Rango de frecuencia	Ancho de banda	Ancho de banda instantáneo (IBW)	Ancho de banda ocupado (OBW)
n78	3300 [MHz] a 3600 [MHz]	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 [MHz]	300 [MHz]	200 [MHz]

Ancho de banda es la cantidad de datos que se puede transmitir en un momento. IBW es la banda de frecuencia dentro de la cual se puede recibir o transmitir señales. OBW es el ancho de banda ocupado por una frecuencia en específica.

Capítulo 4. Análisis y Simulaciones.

4.1. Introducción

Para realizar un análisis de cómo funciona esta antena, es necesario realizarlo a través de softwares de simulación.

Para este caso, se realizará por medio de ALTAIR FEKO.

4.2. ALTAIR FEKO

4.2.1. Modo de uso del Software.

ALTAIR FEKO es un software de electromagnetismo computacional desarrollado por Altair Engineering (<https://www.altair.com.es/feko/>). La función de este software es realizar cálculos de campos eléctricos y magnéticos para ver cómo se comportan alrededor de objetos con cualquier forma. Para eso, se usa un modelo en 3D que simula cómo se ven y funcionan esos objetos.

Este programa se divide en 3 partes principales: Cadfeko, el cual permite realizar las simulaciones necesarias para analizar el diagrama de radiación correspondiente a un arreglo de antenas. La segunda parte es Editfeko, que es una interfaz de secuencias de comandos para que los usuarios construyan modelos utilizando un lenguaje de secuencias de comandos de alto nivel. Y por último, Postfeko, que es utilizado para validar la geometría mallada y analizar al procesar los resultados. En esta parte, se permite verificar que el modelo que se haya construido y configurado en Cadfeko este correcto.

A continuación, se presenta la ventana de ALTAIR FEKO versión 2021.2:



Fig. 4.1 Ventana de inicio de ALTAIR FEKO versión 2021.2

Una vez al presionar Cadfeko, para realizar una simulación de antenas, aparecerá la siguiente ventana:

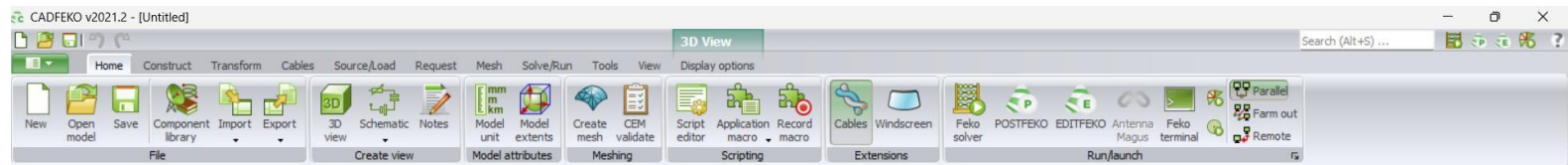


Fig. 4.2 Ventana Home de ALTAIR FEKO versión 2021.2

En esta ventana de Cadfeko aparecen iconos importantes, pero para empezar a realizar la simulación correspondiente para este proyecto se abrirá en el apartado Home la opción de “Component library”, que permite encontrar diversos tipos de antenas.

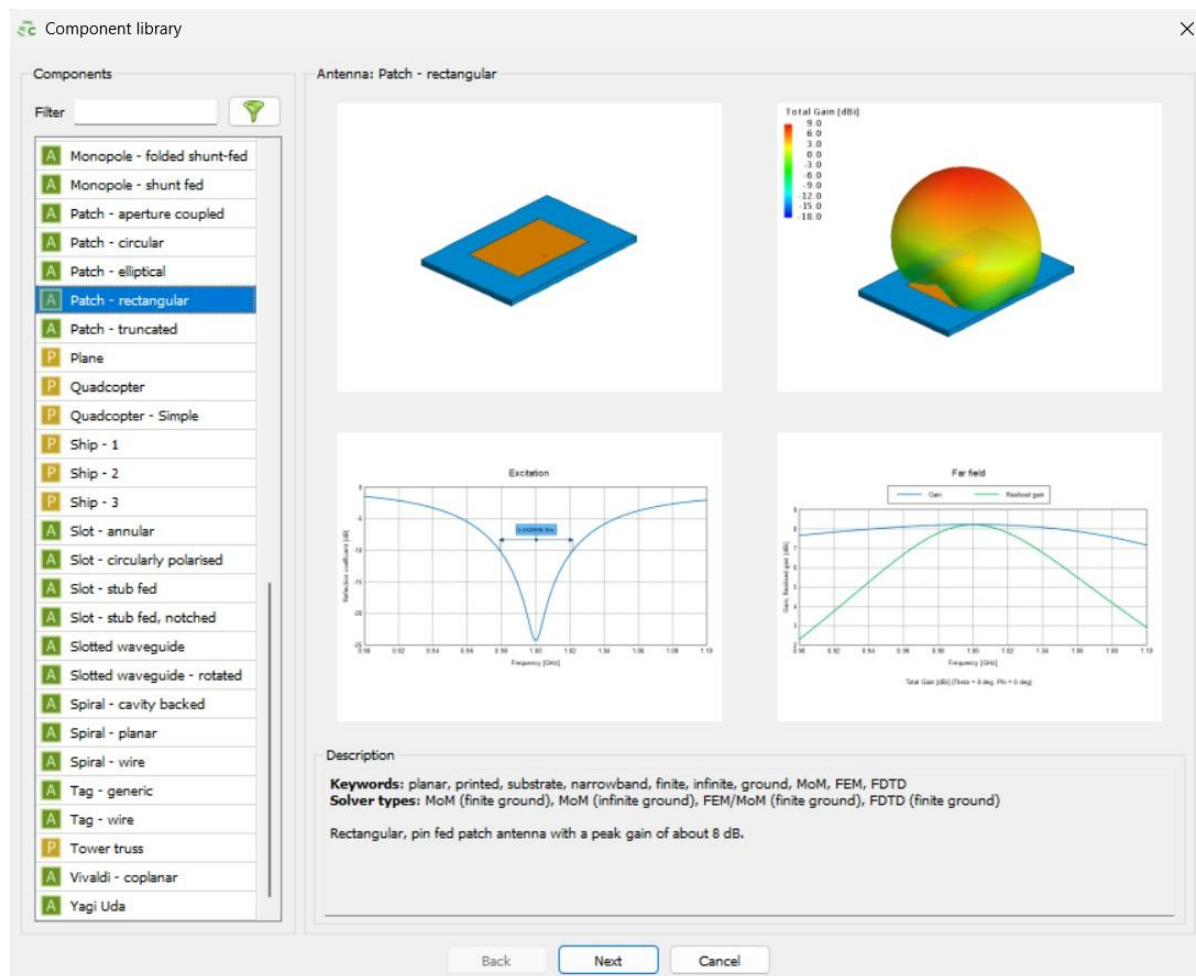
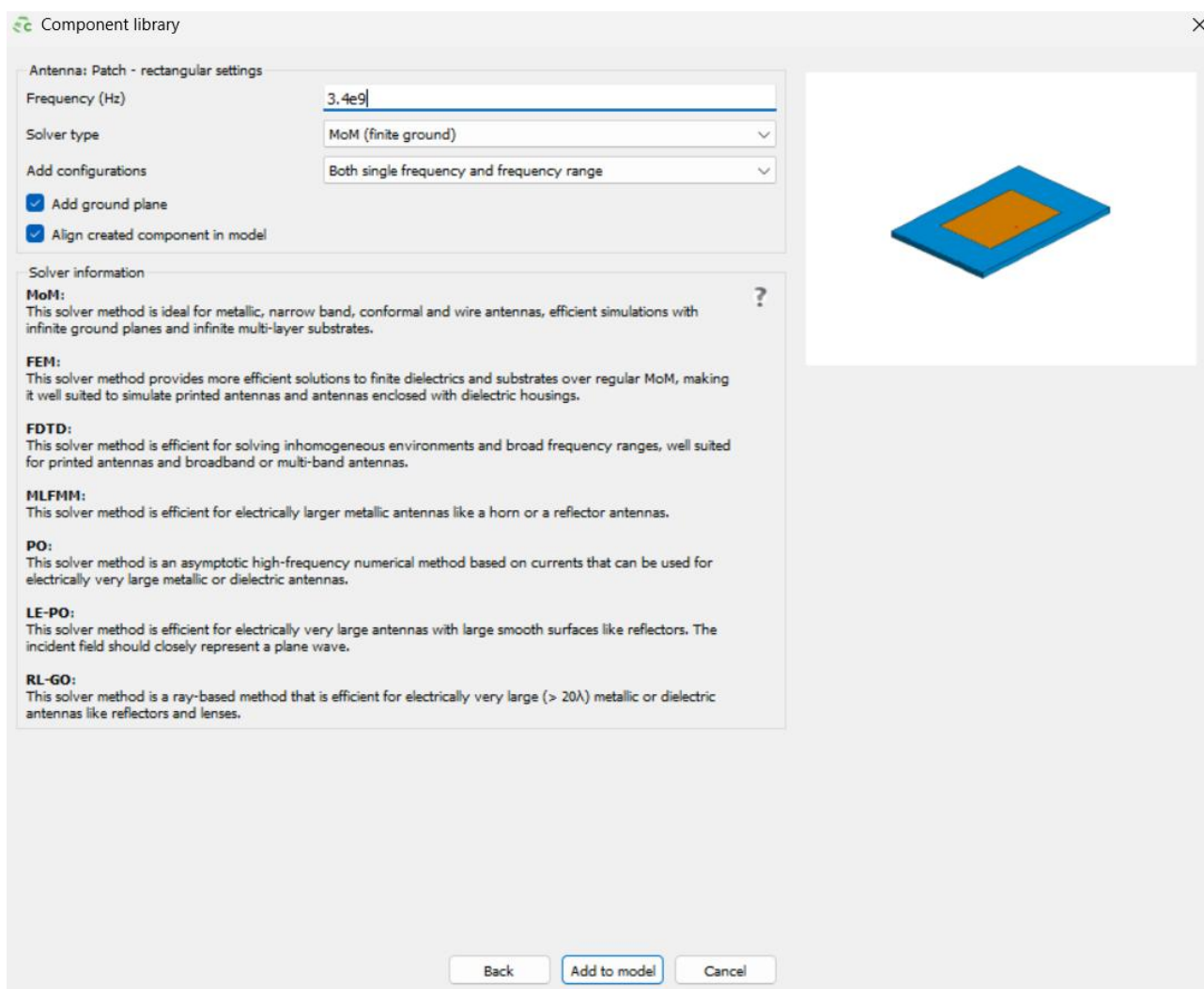


Fig. 4.3 Ventana Component library de ALTAIR FEKO versión 2021.2

Para este proyecto, se analizará una antena conformada por arreglos de patches rectangulares. Las antenas tipo patches, se pueden encontrar según la Figura anterior.

Una vez hecho click en “Patch – rectangular” y en next, aparecerá la siguiente ventana de datos, donde pide la frecuencia de operación. La frecuencia de operación es la proporcionada por la empresa en colaboración con el Movistar 5G LAB UCSC, que tiene adjudicada una banda de frecuencias para operar en la red 5G. Para la simulación se trabajará con 3400 [MHz].



**Fig. 4.4 Ventana ajustes Component library de
ALTAIR FEKO versión 2021.2**

Ya teniendo el patch en la simulación, se procede a realizar el arreglo que compone la antena de laboratorio de la siguiente manera:

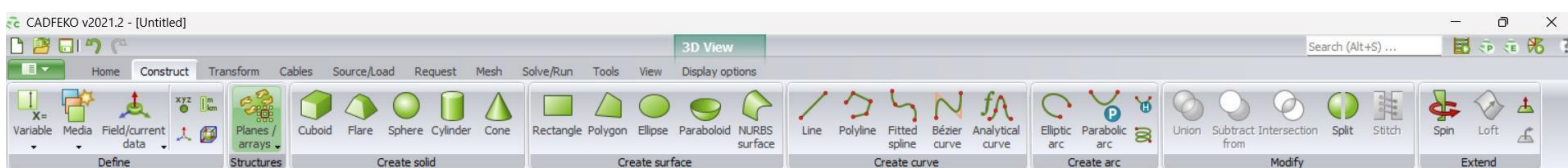


Fig. 4.5 Ventana Construct de ALTAIR FEKO versión 2021.2

En el apartado Construct hacer click en “Planes/Arrays”, que abrirá los tipos de arreglos disponibles en el software.

A continuación, se selecciona el tipo de arreglo de la antena a simular, es decir, el arreglo linear o planar:



Fig. 4.6 Ventana tipo de arreglo de ALTAIR FEKO versión 2021.2

Al abrir el arreglo linear, aparecerá una ventana donde pide ingresar el número de elementos irradiadores a considerar en el eje X e Y de la siguiente forma:

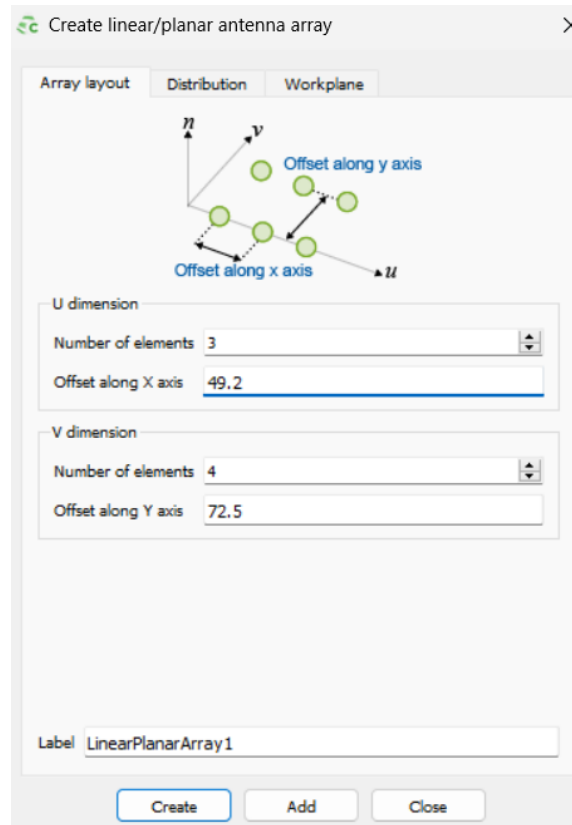


Fig. 4.7 Ventana Create lineal/planar antenna array de ALTAIR FEKO versión 2021.2

La antena del laboratorio está construida con 192 elementos irradiadores, pero para temas de rapidez de simulación se crea una matriz de (3 x 4) ubicando 3 elementos en el eje X, y 4 en el eje Y con una distancia de separación de 49,2 mm entre cada elemento irradiador del eje X y de 72,5 mm para cada uno del eje Y como se muestra en la Fig. 4.7. Estas distancias (en el programa se pueden mediar las distancias) se seleccionaron al momento de crear el arreglo de antenas, uno de los requisitos es que la antena tiene que estar lo más junta posible de la otra para evitar más side lobes.

Cabe mencionar que la antena ubicada en el techo de la facultad tiene dimensiones de 795x470x160 mm, pero para un futuro trabajo se tendrán que crear antenas patches en el Software FEKO para que alcancen en la dimensión física de la antena. No se utilizaron antenas que coincidieran con la dimensión física ya que al indicar la frecuencia en la ventana de la Fig. 4.4 el mismo Software arrojó automáticamente el resultado la antena con las dimensiones equivalentes a la frecuencia ocupada.

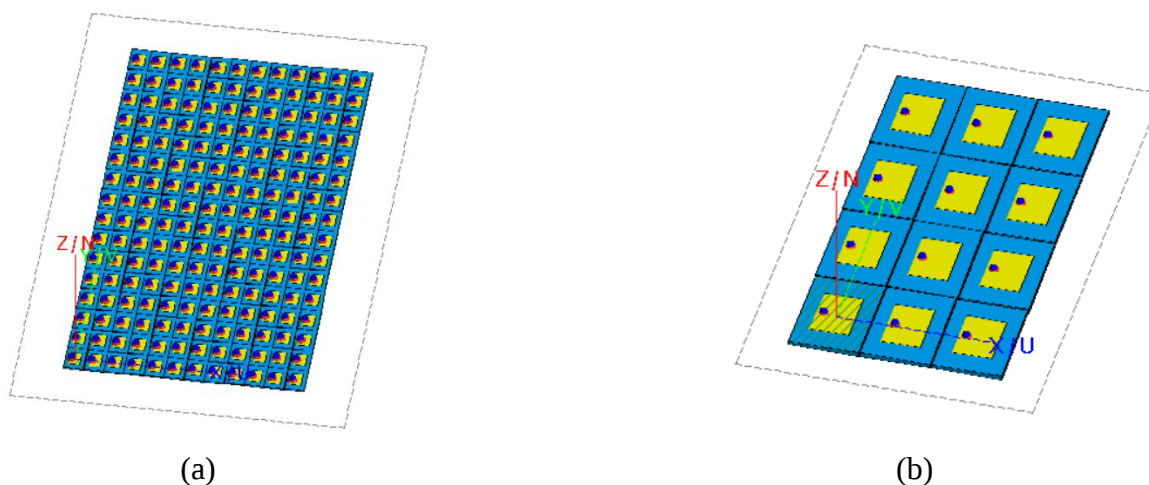


Fig. 4.8 Arreglos de antena (a) de 12x16 o 192 antenas y (b) de 3x4 o 12 antenas.

El siguiente paso es dar el direccionamiento del beam al diagrama de radiación que se obtendrá al momento de simular, modificando las fases de cada antena. Lo primero, es ir a “Construction”, luego seleccionar “LinearPlanarArray1”:

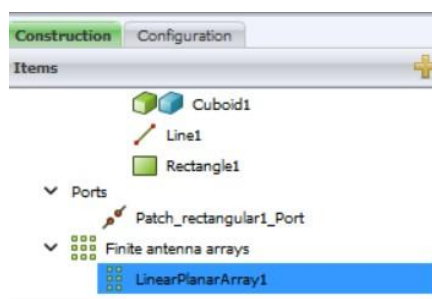


Fig. 4.9 Ventana Construction de ALTAIR FEKO versión 2021.2

Al abrir este apartado aparecerá lo siguiente:

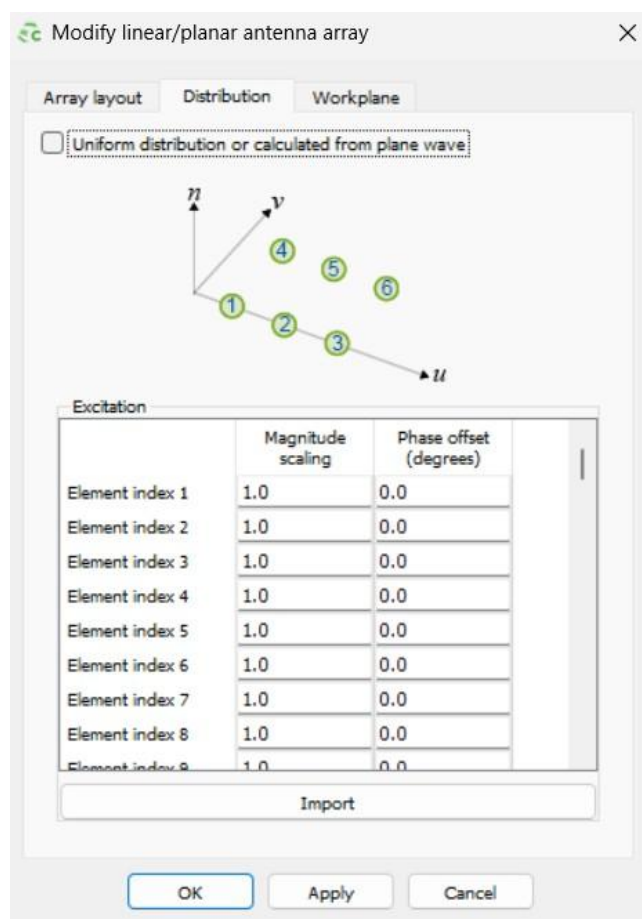


Fig. 4.10 Ventana Modify linear/planar antenna array de ALTAIR FEKO versión 2021.2

La imagen anterior muestra la ventana donde se modifican las fases de cada antena.

4.3. SIMULACIONES ARREGLO ANTENA.

4.3.1. Arreglo en fase de elementos irradiadores.

Para temas de estudio se consideró una matriz de (3 x 4), ya que para obtener el diagrama de radiación de la antena Huawei AAU5645 en si (12 x 16), el software de simulación tiene que estar instalado en un PC que tenga un buen procesador, ya que al no tenerlo la simulación toma mucho tiempo, incluso, lanzando errores de licencia en el transcurso.

El arreglo de (12 x 16) fue reducido proporcionalmente a (3 x 4), ya que uno de los factores para tratar de mantener el diagrama de radiación original es conservar la geometría proporcional de la antena, manteniendo un diseño rectangular simétrico. (ver Fig. 4.8 (a) y (b))

A continuación, se presentarán las simulaciones realizadas para diferentes direccionamientos del beam tanto para alcance horizontal (azimut) y vertical (elevación).

Para el primer estudio, se conservó el beam en vertical y horizontal, es decir se mantuvieron en 0°.

Las fases de cada antena que se muestran en las siguientes tablas fueron obtenidas por medio del Software Matlab, donde se creó un código (ubicado en Anexos) que al introducir un ángulo de azimut y de elevación (dirección del beam) calcula las fases para cada patch en forma matricial.

Las simulaciones se obtuvieron en FEKO, donde se pusieron las fases calculadas como se menciona en el párrafo anterior y luego se introdujeron en la pestaña de CADFEKO de la Fig. 4.10 para los diferentes casos estudiados.

La dirección horizontal del beam empieza con 0°, después en 6° donde según el documento [6] es la ganancia máxima de la antena. Después se fueron configurando las direcciones arbitrarias aumentando 5° en 5° partiendo de los 10°. En algunos casos igual se consideraron direcciones negativas de -5° en -5°, partiendo en -6° hasta los -10° y luego -15°.

- Diagrama 3D con beam en 0° vertical y horizontal con Ganancia en veces:

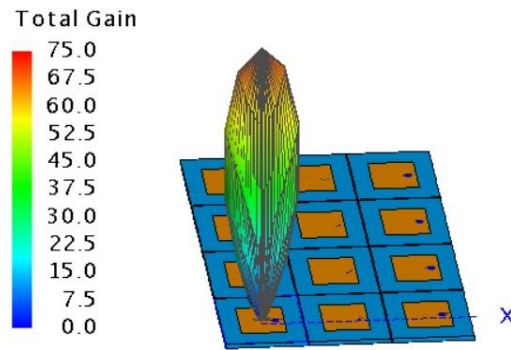


Fig. 4.11 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 0° azimuth con Ganancia en veces.

- Diagrama polar con beam en 0° vertical y horizontal con Ganancia en veces:

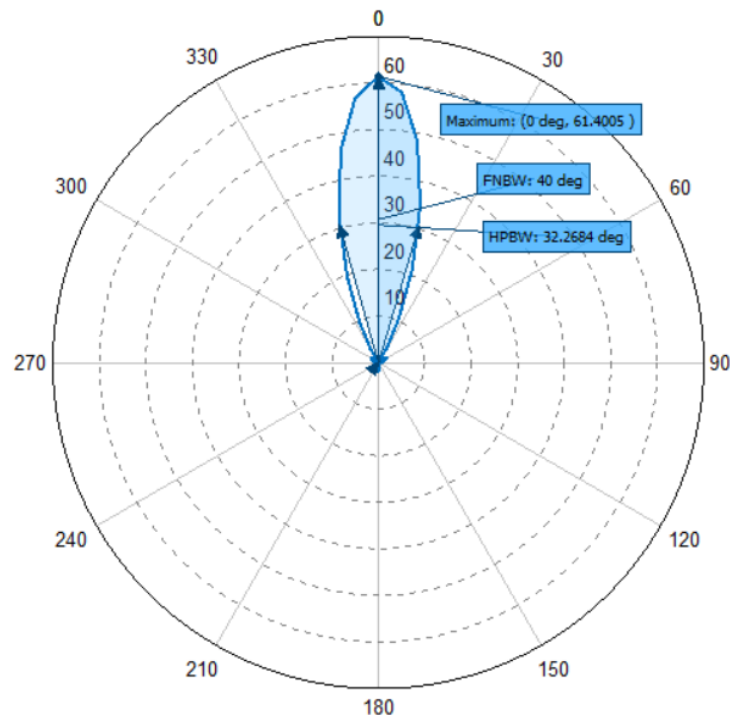


Fig. 4.12 Diagrama polar con beam en 0° de elevación y 0° azimuth con Ganancia en veces.

- Diagrama 3D con beam en 0° vertical y horizontal con Ganancia en dBi:

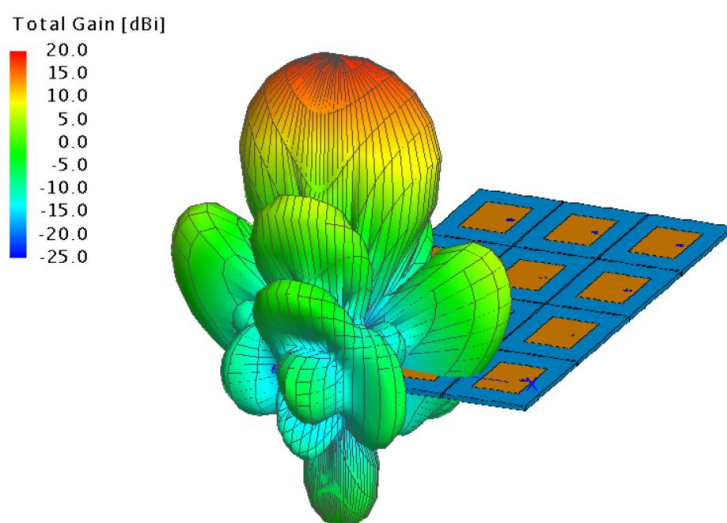


Fig. 4.13 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 0° azimuth con ganancia en dBi.

- Diagrama polar con beam en 0° vertical y horizontal con Ganancia en dBi:

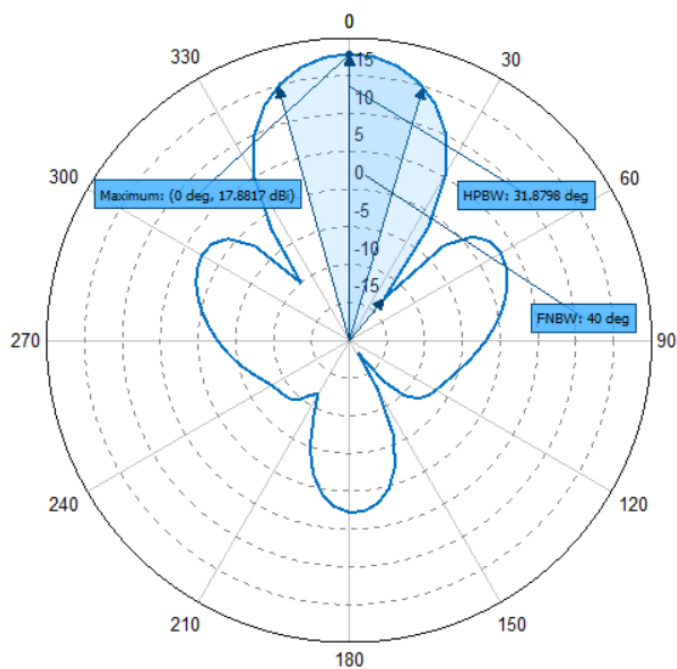


Fig. 4.14 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 0° azimuth con ganancia en dBi.

Tabla 4.1 Fases utilizadas en FEKO para el diagrama de la Fig. 4.11

X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	0,0°	0,0°	0,0°
Y,2	0,0°	0,0°	0,0°
Y,3	0,0°	0,0°	0,0°
Y,4	0,0°	0,0°	0,0°

Para los siguientes casos se conservó la dirección vertical en 0° del beam y se fue variando la dirección horizontal.

- **Diagrama 3D con beam en 6° horizontal con Ganancia en veces:**

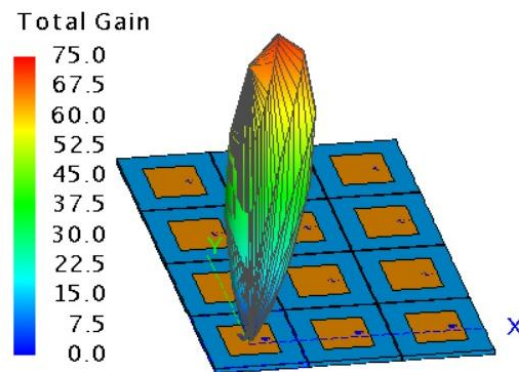
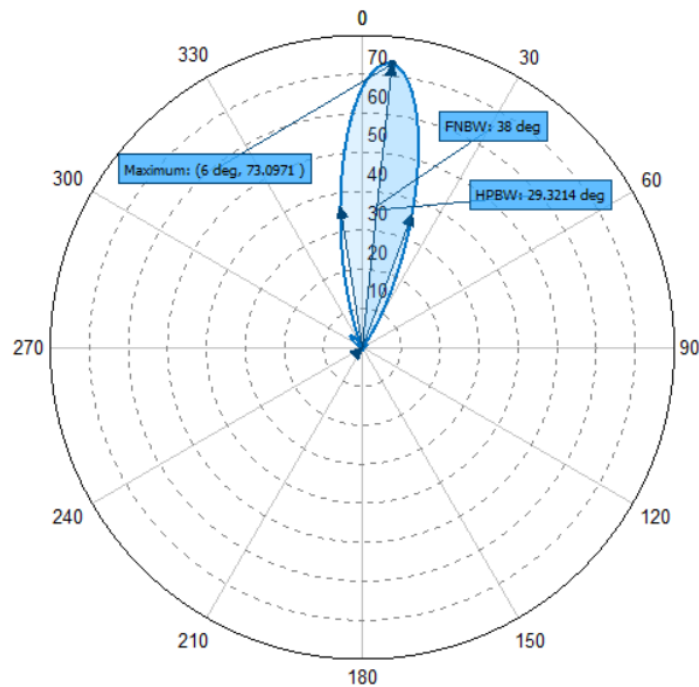


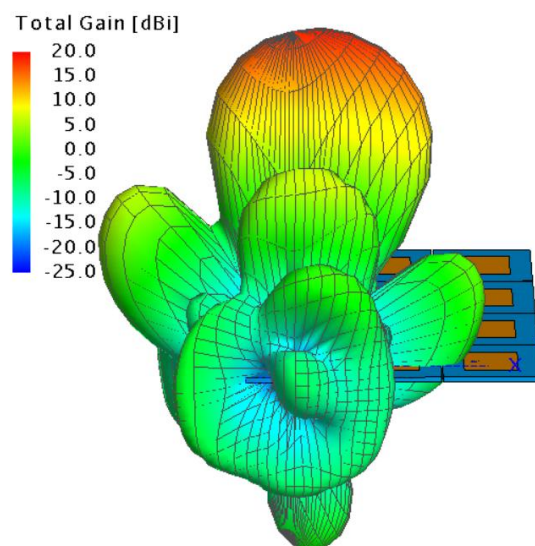
Fig. 4.15 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 6° azimuth con Ganancia en veces.

- **Diagrama polar con beam en 6° horizontal con Ganancia en veces:**



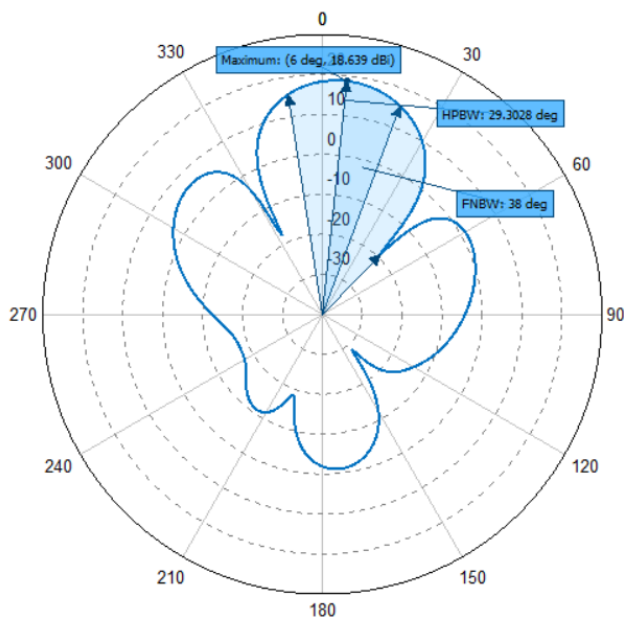
**Fig. 4.16 Diagrama polar con beam en 0° elevación
y 6° azimuth con Ganancia en veces.**

- **Diagrama 3D con beam en 6° horizontal con Ganancia en dBi:**



**Fig. 4.17 Diagrama de radiación 3D con beam en
6° azimuth con Ganancia en dBi.**

- **Diagrama polar con beam en 6° horizontal con Ganancia en dBi:**



**Fig. 4.18 Diagrama polar con beam en 0° elevación
y 6° azimuth con Ganancia en dBi.**

Tabla 4.2 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.15

X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	0,0°	21,61°	43,22°
Y,2	0,0°	21,61°	43,22°
Y,3	0,0°	21,61°	43,22°
Y,4	0,0°	21,61°	43,22°

- Diagrama 3D con beam en 10° horizontal con Ganancia en veces:

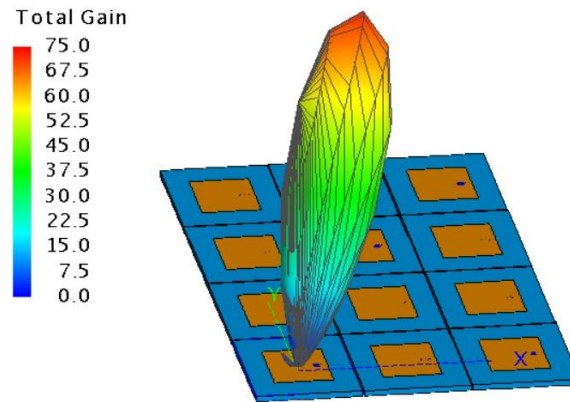


Fig. 4.19 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 10° azimuth con Ganancia en veces.

- Diagrama polar con beam en 10° horizontal con Ganancia en veces:

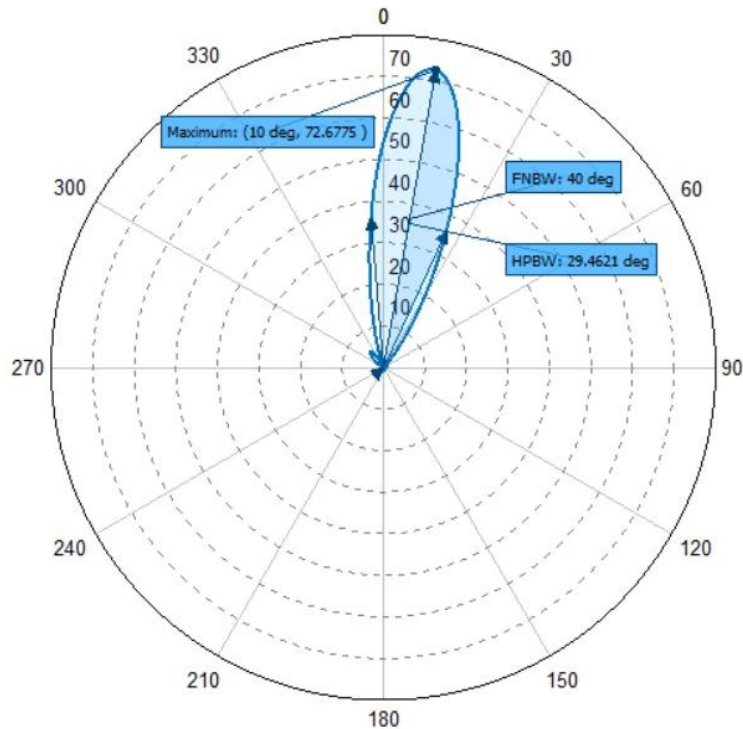


Fig. 4.20 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 10° azimuth con Ganancia en veces.

Tabla 4.3 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.19

X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	0,0°	35,9°	71,81°
Y,2	0,0°	35,9°	71,81°
Y,3	0,0°	35,9°	71,81°
Y,4	0,0°	35,9°	71,81°

- Diagrama 3D con beam en 15° horizontal con Ganancia en veces:

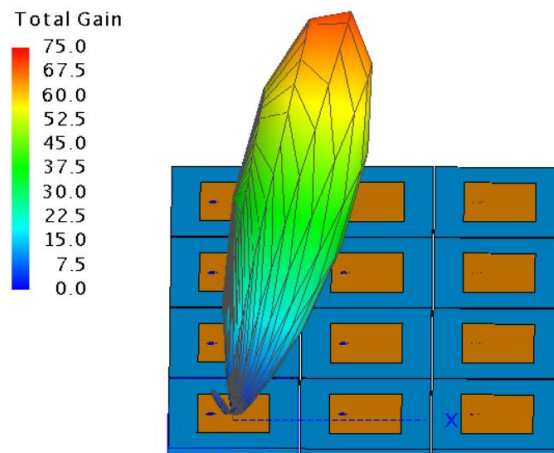
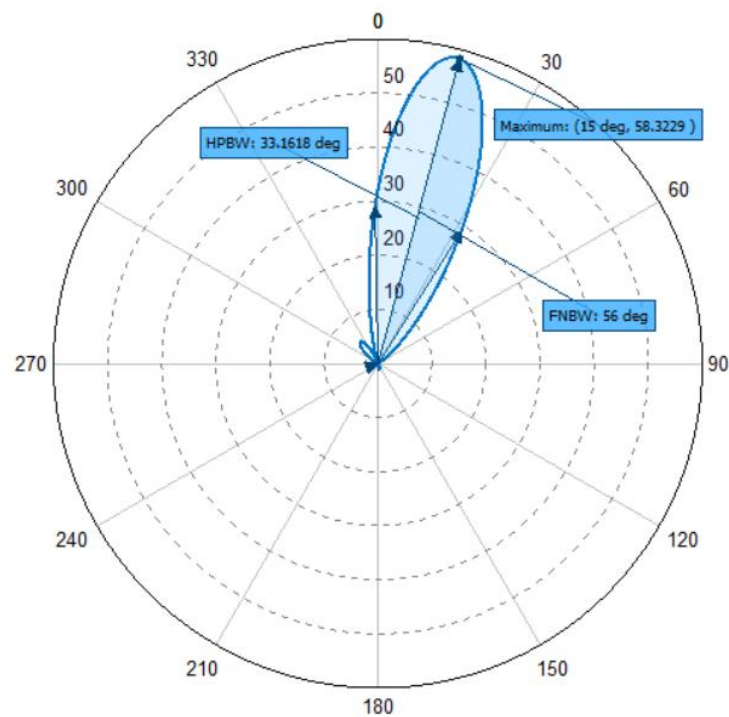


Fig. 4.21 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 15° azimuth con Ganancia en veces.

- Diagrama polar con beam en 15° horizontal con Ganancia en veces:

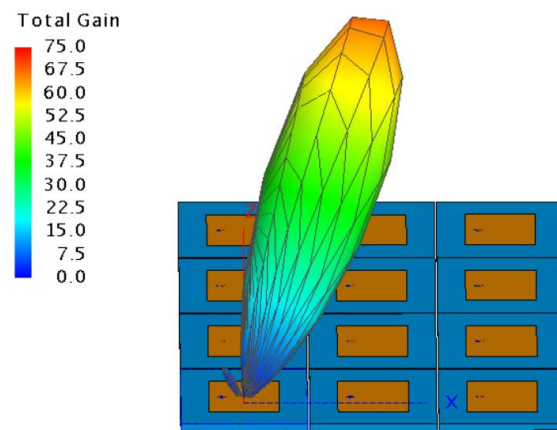


**Fig. 4.22 Diagrama polar con beam en 0° elevación
y 15° azimuth con Ganancia en veces.**

Tabla 4.4 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.21

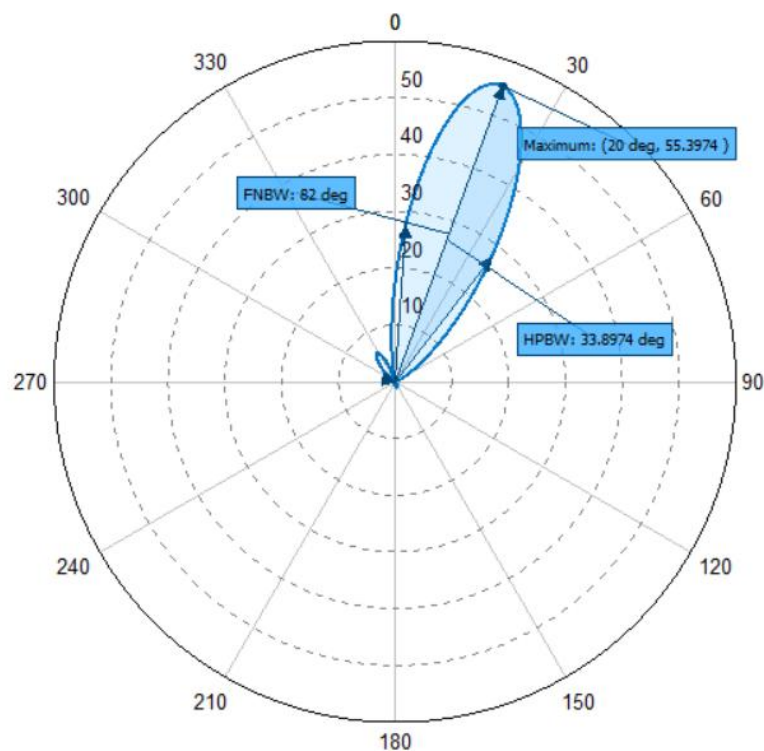
X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	0,0°	53,52°	107,04°
Y,2	0,0°	53,52°	107,04°
Y,3	0,0°	53,52°	107,04°
Y,4	0,0°	53,52°	107,04°

- **Diagrama 3D con beam en 20° horizontal con Ganancia en veces:**



**Fig. 4.23 Diagrama de radiación 3D con beam en
0° elevación y 20° azimuth con Ganancia en veces.**

- **Diagrama polar con beam en 20° horizontal con Ganancia en veces:**

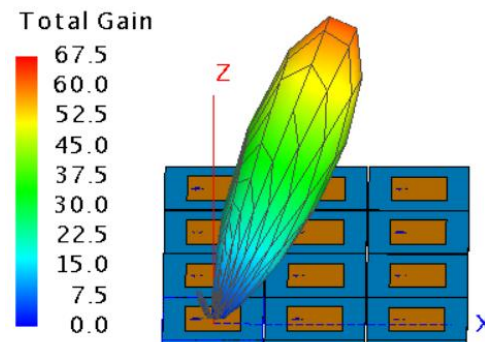


**Fig. 4.24 Diagrama polar con beam en 0° elevación
y 20° azimuth con Ganancia en veces.**

Tabla 4.5 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.23

X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	0,0°	70,72°	141,45°
Y,2	0,0°	70,72°	141,45°
Y,3	0,0°	70,72°	141,45°
Y,4	0,0°	70,72°	141,45°

- **Diagrama 3D con beam en 25° horizontal con Ganancia en veces:**



**Fig. 4.25 Diagrama de radiación 3D con beam en
0° elevación y 25° azimuth con Ganancia en veces.**

- **Diagrama polar con beam en 25° horizontal con Ganancia en veces:**

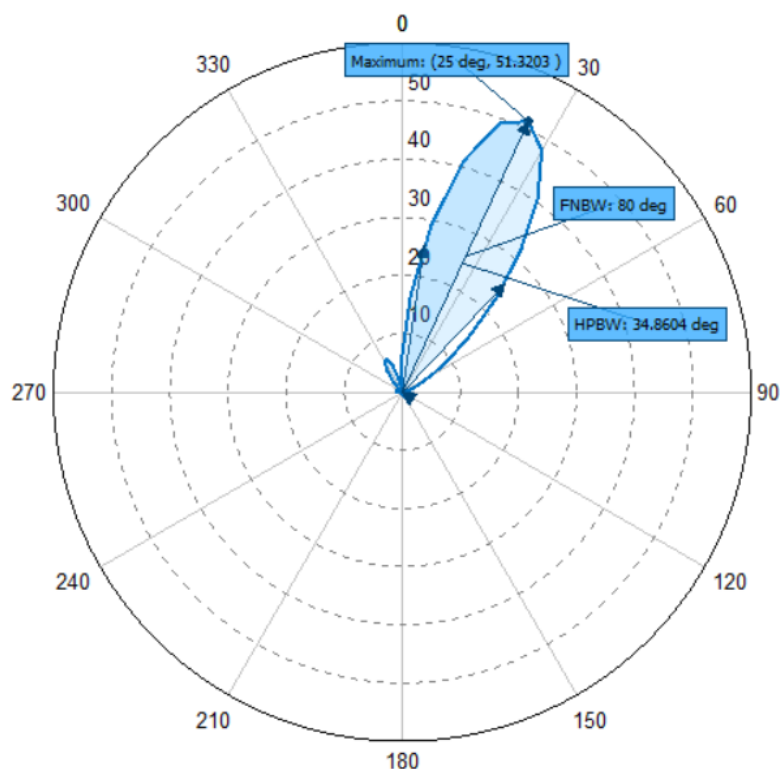


Fig. 4.26 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 25° azimuth con Ganancia en veces.

Tabla 4.6 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.25

X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	0,0°	87,4°	174,8°
Y,2	0,0°	87,4°	174,8°
Y,3	0,0°	87,4°	174,8°
Y,4	0,0°	87,4°	174,8°

- **Diagrama 3D con beam en 30° horizontal con Ganancia en veces:**

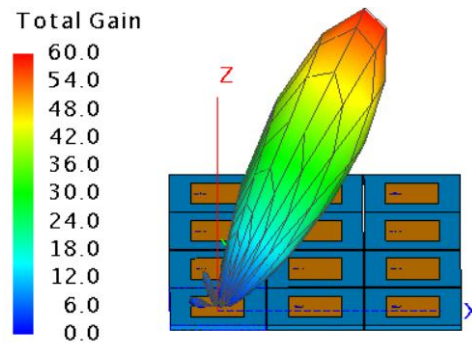


Fig. 4.27 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 30° azimuth con Ganancia en veces.

- **Diagrama polar con beam en 30° horizontal con Ganancia en veces:**

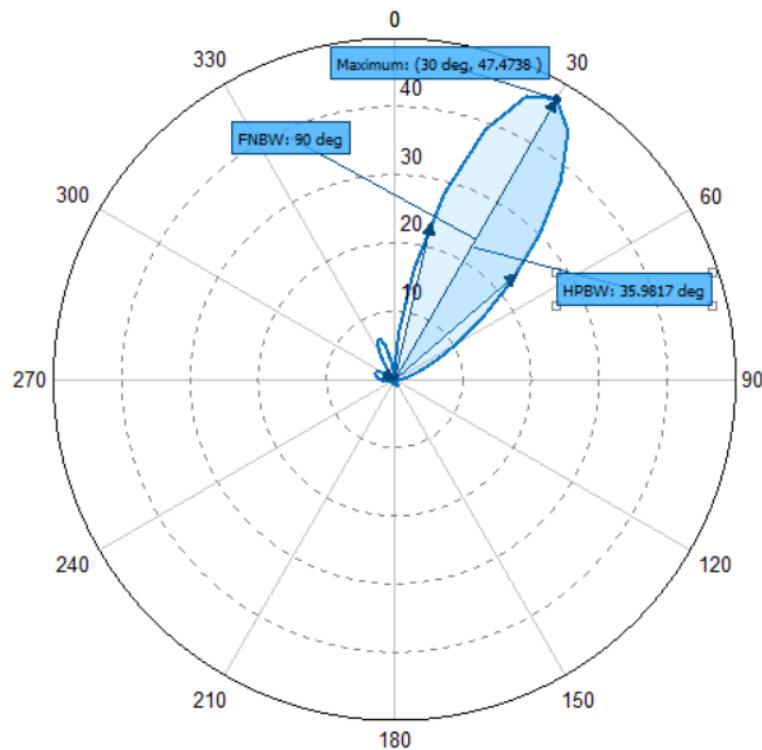


Fig. 4.28 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 30° azimuth con Ganancia en veces.

Tabla 4.7 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.27

X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	0,0°	103,4°	206,8°
Y,2	0,0°	103,4°	206,8°
Y,3	0,0°	103,4°	206,8°
Y,4	0,0°	103,4°	206,8°

- **Diagrama 3D con beam en 35° horizontal con Ganancia en veces:**

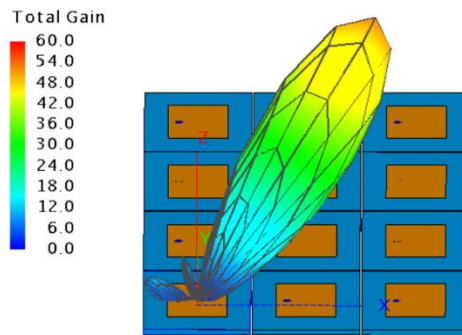


Fig. 4.29 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 35° azimuth con Ganancia en veces.

- **Diagrama polar con beam en 35° horizontal con Ganancia en veces:**

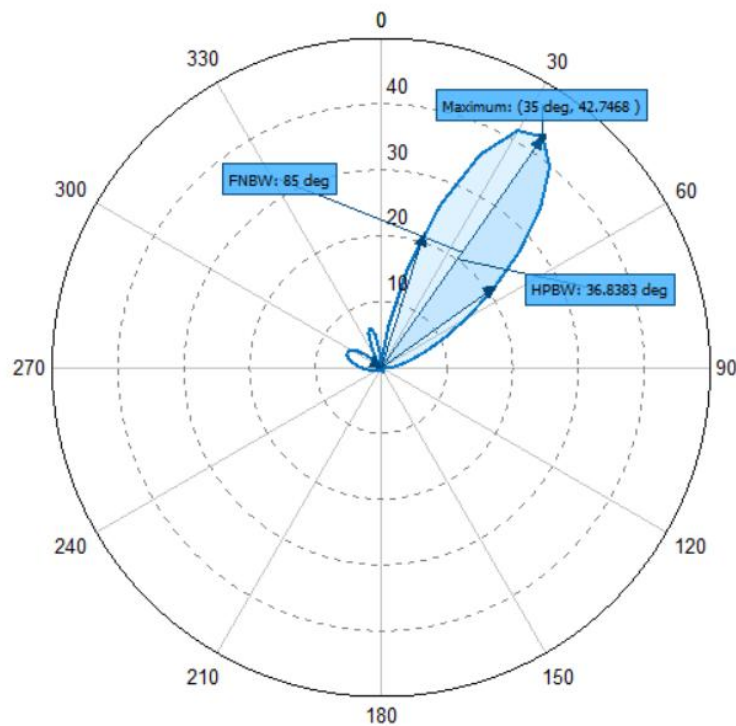


Fig. 4.30 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 35° azimuth con Ganancia en veces.

Tabla 4.8 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.29

X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	0,0°	118,6°	237,2°
Y,2	0,0°	118,6°	237,2°
Y,3	0,0°	118,6°	237,2°
Y,4	0,0°	118,6°	237,2°

- **Diagrama 3D con beam en 40° horizontal con Ganancia en veces:**

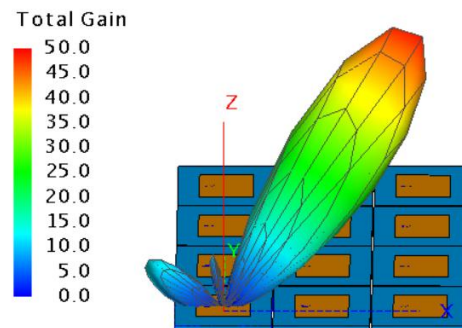


Fig. 4.31 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 40° azimuth con Ganancia en veces.

- **Diagrama polar con beam en 40° horizontal con Ganancia en veces:**

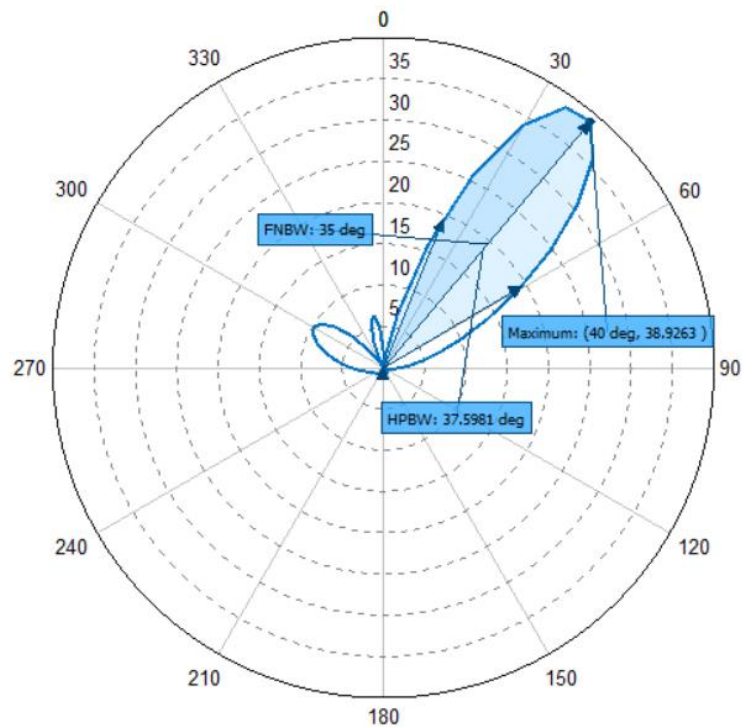


Fig. 4.32 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 40° azimuth con Ganancia en veces.

Tabla 4.9 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.31

X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	0,0°	132,92°	265,84°
Y,2	0,0°	132,92°	265,84°
Y,3	0,0°	132,92°	265,84°
Y,4	0,0°	132,92°	265,84°

- **Diagrama 3D con beam en 45° horizontal con Ganancia en veces:**

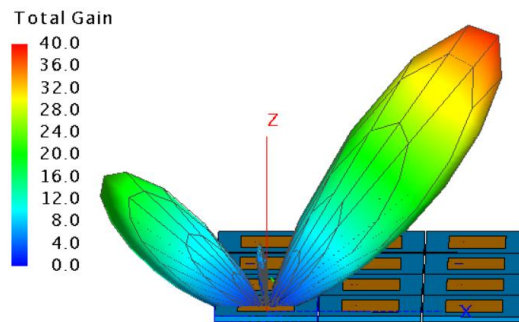


Fig. 4.33 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 45° azimuth con Ganancia en veces.

- **Diagrama polar con beam en 45° horizontal con Ganancia en veces:**

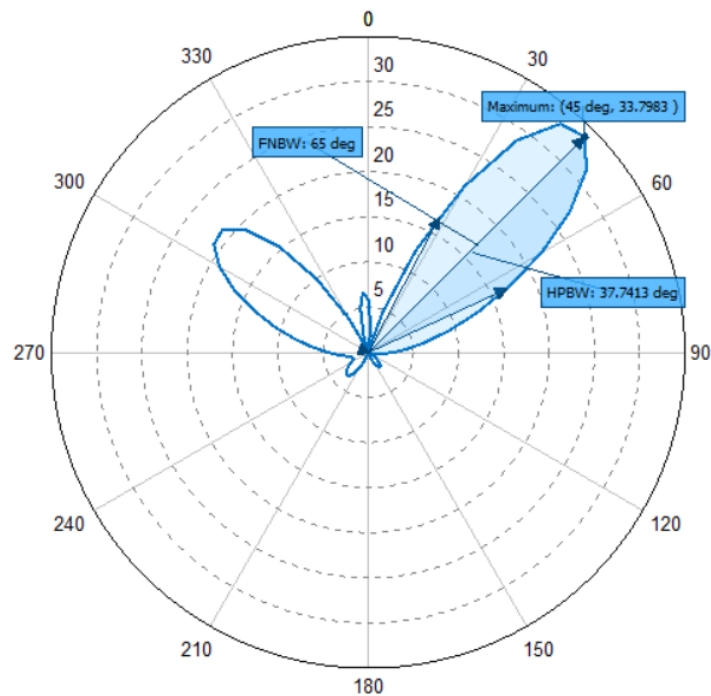


Fig. 4.34 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 45° azimut con Ganancia en veces.

Tabla 4.10 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.33

X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	0,0°	146,21°	292,43°
Y,2	0,0°	146,21°	292,43°
Y,3	0,0°	146,21°	292,43°
Y,4	0,0°	146,21°	292,42°

- **Diagrama 3D con beam en 46° horizontal con Ganancia en veces:**

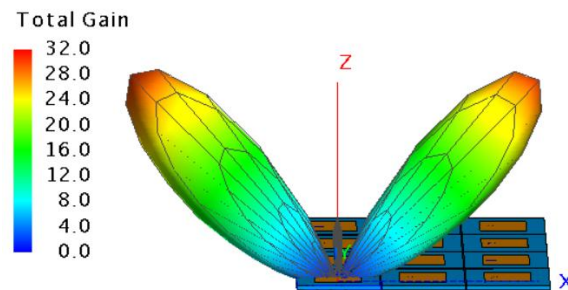


Fig. 4.35 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 46° azimut con Ganancia en veces.

- **Diagrama polar con beam en 46° horizontal con Ganancia en veces:**

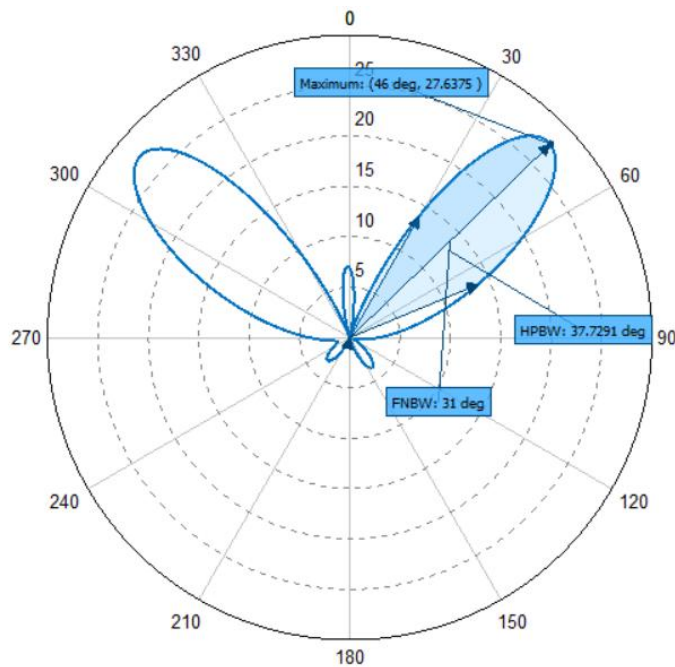


Fig. 4.36 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 46° azimut con Ganancia en veces.

Tabla 4.11 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.35

X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	0,0°	148,7°	297,5°
Y,2	0,0°	148,7°	297,5°
Y,3	0,0°	148,7°	297,5°
Y,4	0,0°	148,7°	297,5°

- Diagrama 3D con beam requerido en 47° horizontal (requerido con fases obtenidas de Matlab) con Ganancia en veces:

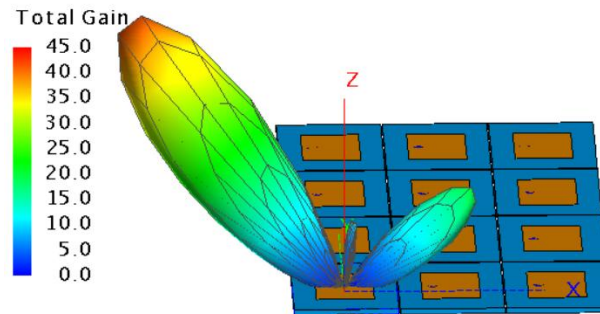


Fig. 4.37 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y -37° azimuth con Ganancia en veces (obtenido en FEKO con fases de 47°).

- Diagrama polar con beam requerido en 47° horizontal (requerido con fases obtenidas de Matlab) con Ganancia en veces:

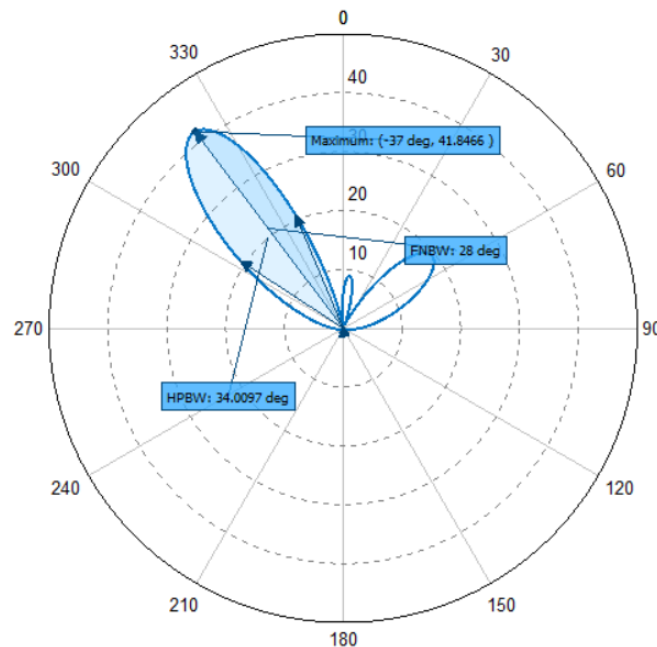


Fig. 4.38 Diagrama polar con beam en 0° elevación y -37° azimuth con Ganancia en veces (obtenido en FEKO con fases de 47°).

- **Diagrama 3D con beam en 47° horizontal (requerido con fases de Matlab) con Ganancia en dBi:**

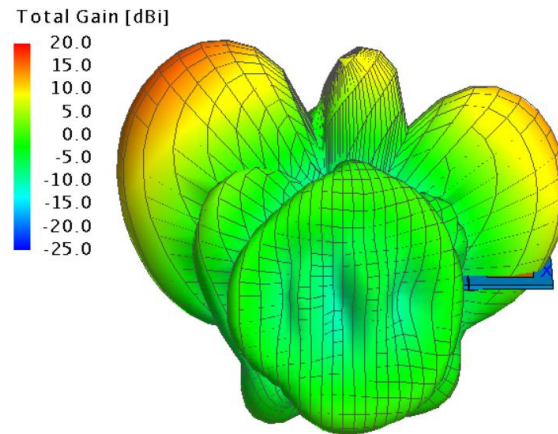


Fig. 4.39 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y -37° azimuth con Ganancia en dBi (obtenido en FEKO con fases de 47°).

- **Diagrama polar con beam en 47° horizontal (requerido con fases de Matlab) con Ganancia en dBi:**

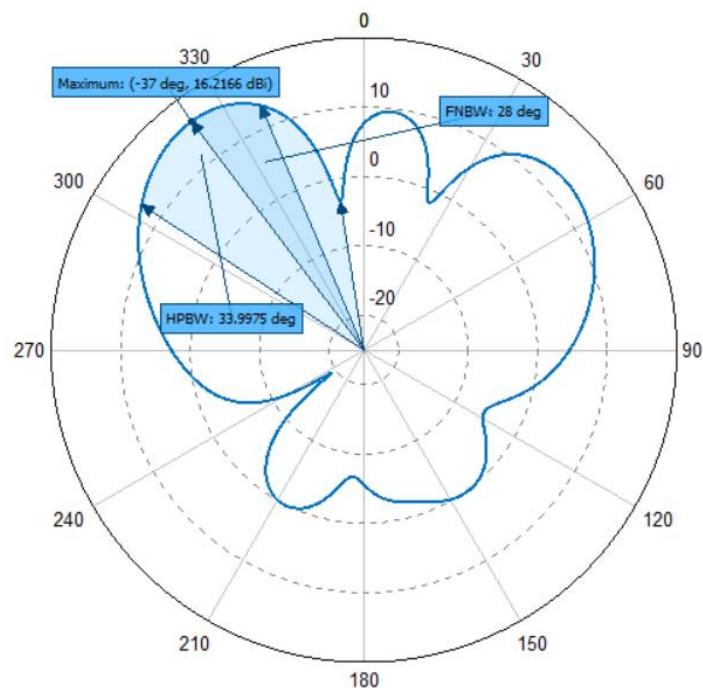


Fig. 4.40 Diagrama polar con beam en 0° elevación y -37° azimuth con Ganancia en dBi (obtenido en FEKO con fases de 47°).

Tabla 4.12 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.37

X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	0,0°	151,23°	302,5°
Y,2	0,0°	151,23°	302,5°
Y,3	0,0°	151,23°	302,5°
Y,4	0,0°	151,23°	302,5°

- Diagrama 3D con beam en -6° horizontal con Ganancia en veces:

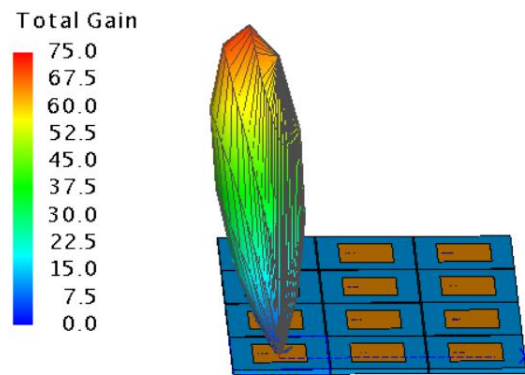
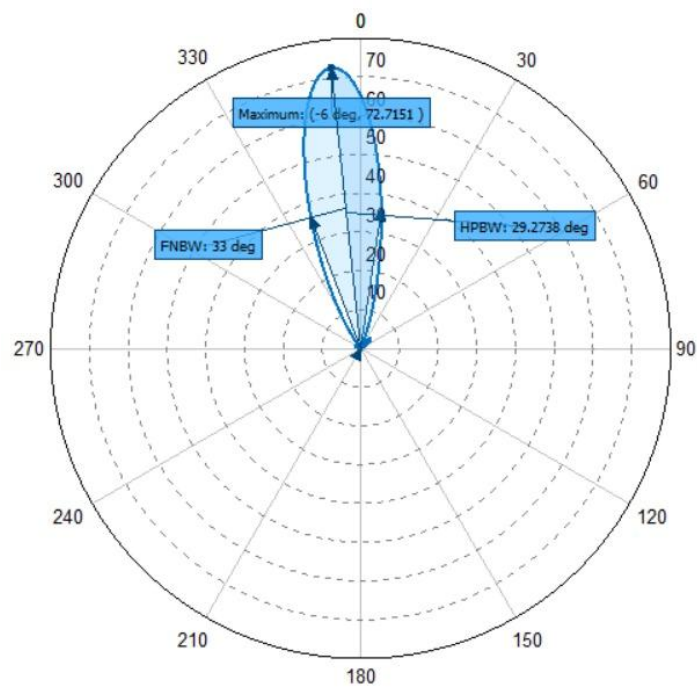


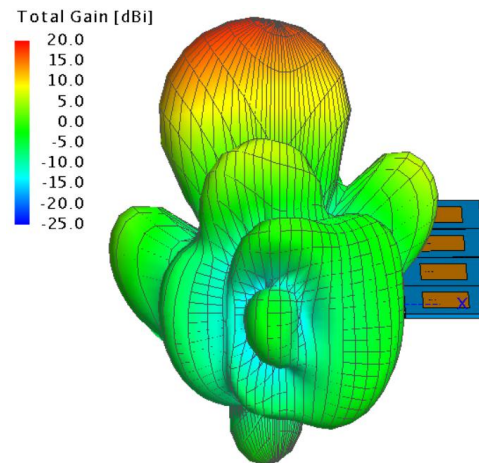
Fig. 4.41 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y -6° azimuth con Ganancia en veces.

- Diagrama polar con beam en -6° horizontal con Ganancia en veces:



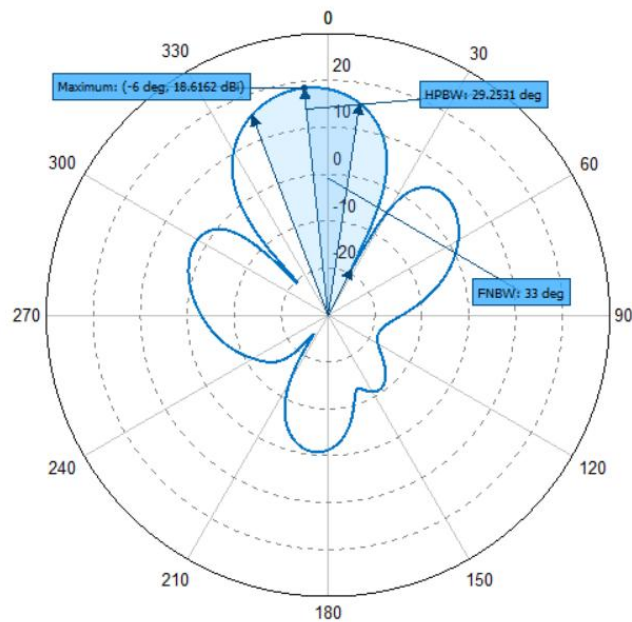
**Fig. 4.42 Diagrama polar con beam en 0° elevación
y -6° azimuth con Ganancia en veces.**

- **Diagrama 3D con beam en -6° horizontal con Ganancia en dBi:**



**Fig. 4.43 Diagrama de radiación 3D con beam en
 0° elevación y -6° azimuth con Ganancia en dBi.**

- **Diagrama polar con beam en -6° horizontal con Ganancia en dBi:**



**Fig. 4.44 Diagrama polar con beam en 0° elevación
y -6° azimuth con Ganancia en dBi.**

Tabla 4.13 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.41

X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	0,0°	-21,6°	-43,23°
Y,2	0,0°	-21,6°	-43,23°
Y,3	0,0°	-21,6°	-43,23°
Y,4	0,0°	-21,6°	-43,23°

- Diagrama 3D con beam en -10° horizontal con Ganancia en veces:

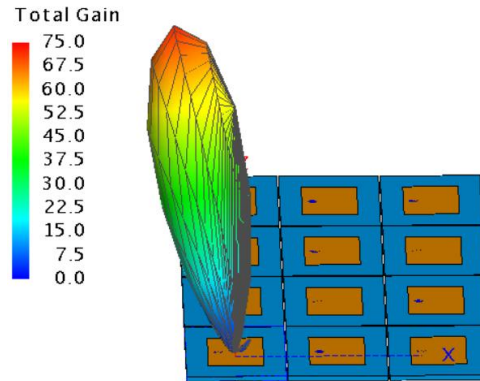
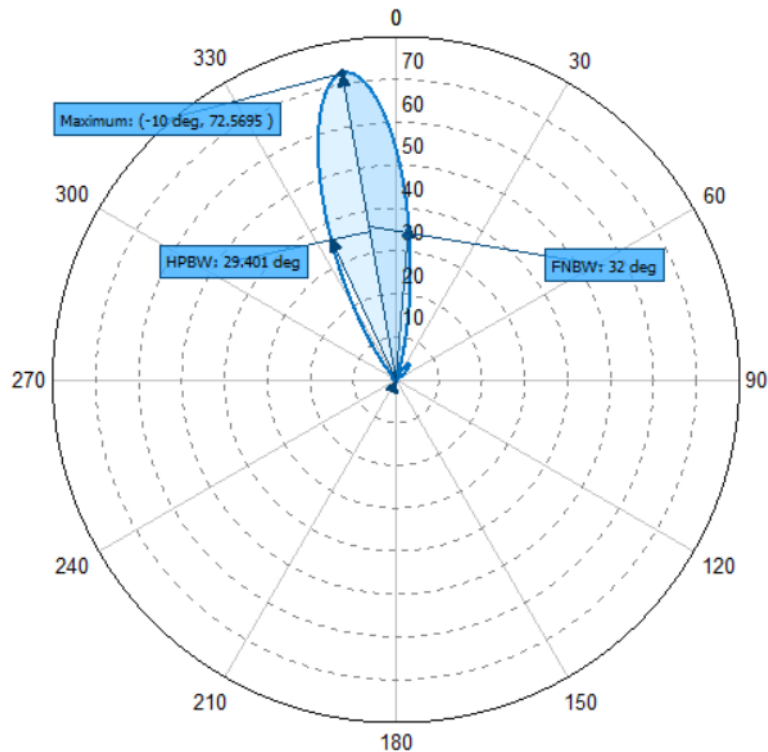


Fig. 4.45 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y -10° azimuth con Ganancia en veces.

- Diagrama polar con beam en -10° horizontal con Ganancia en veces:

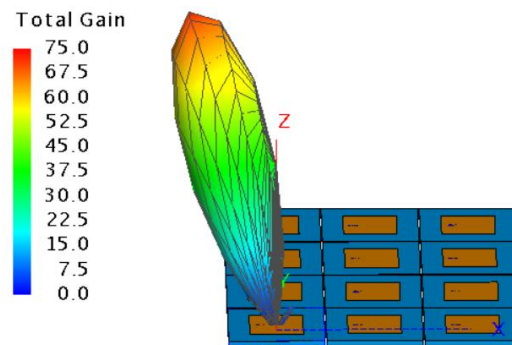


**Fig. 4.46 Diagrama polar con beam en 0° elevación
y -10° azimut con Ganancia en veces.**

Tabla 4.14 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.45

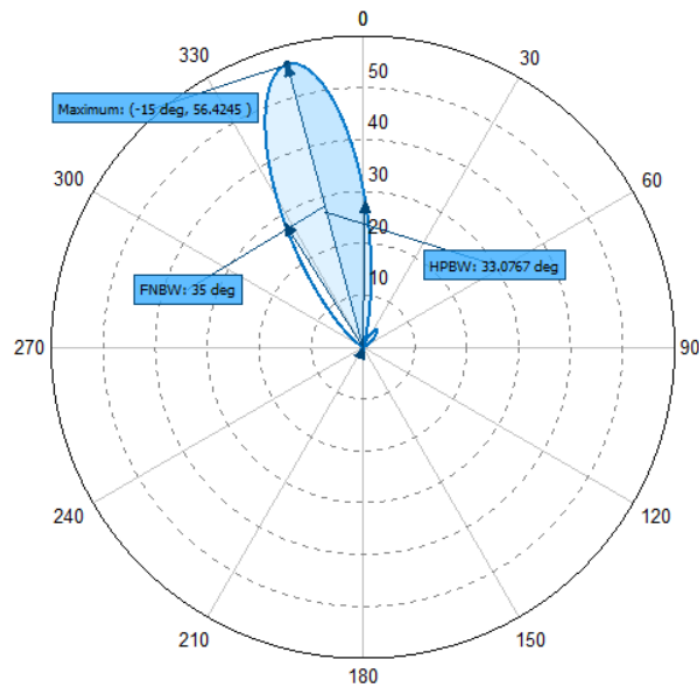
X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	$0,0^\circ$	$-35,9^\circ$	$-71,8^\circ$
Y,2	$0,0^\circ$	$-35,9^\circ$	$-71,8^\circ$
Y,3	$0,0^\circ$	$-35,9^\circ$	$-71,8^\circ$
Y,4	$0,0^\circ$	$-35,9^\circ$	$-71,8^\circ$

- **Diagrama 3D con beam en -15° horizontal con Ganancia en veces:**



**Fig. 4.47 Diagrama de radiación 3D con beam en
 0° elevación y -15° azimut con Ganancia en veces.**

- **Diagrama polar con beam en -15° horizontal con Ganancia en veces:**



**Fig. 4.48 Diagrama polar con beam en 0° elevación
y -15° azimuth con Ganancia en veces.**

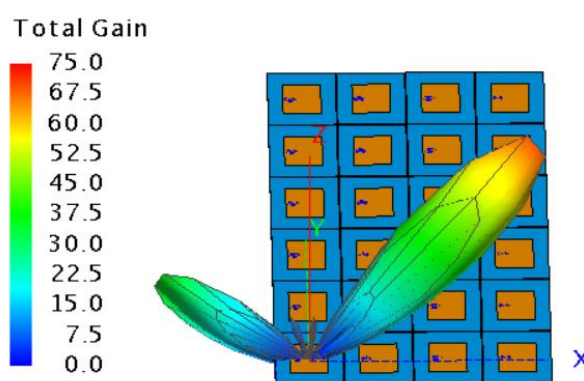
Tabla 4.15 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.47

X, Y	X,1	X,2	X,3
Y,1	0,0°	-53,5°	-107,03°
Y,2	0,0°	-53,5°	-107,03°
Y,3	0,0°	-53,5°	-107,03°
Y,4	0,0°	-53,5°	-107,03°

Como se ha logrado ver en las simulaciones realizadas, la mayoría de los lóbulos para el primer y segundo cuadrante son muy parecidos considerando el plano polar. Por lo tanto, no se realizarán más simulaciones ya que es muy deducible que la radiación actuará de la misma forma en este arreglo para el lado inverso (fases negativas).

Habiendo mencionado lo anterior, se procede a realizar una última simulación, pero ahora con un arreglo mayor al propuesto de la antena Huawei AA5645 de matriz (3 x 4). El arreglo propuesto nuevo es de (4 x 6) y se muestra a continuación:

- **Diagrama 3D con beam centrado en 0° vertical y 49° horizontal con Ganancia en veces:**



**Fig. 4.49 Diagrama de radiación 3D con beam en
0° elevación y 49° azimuth con Ganancia en veces.**

- Diagrama polar con beam centrado en 0° vertical y 49° horizontal con Ganancia en veces:

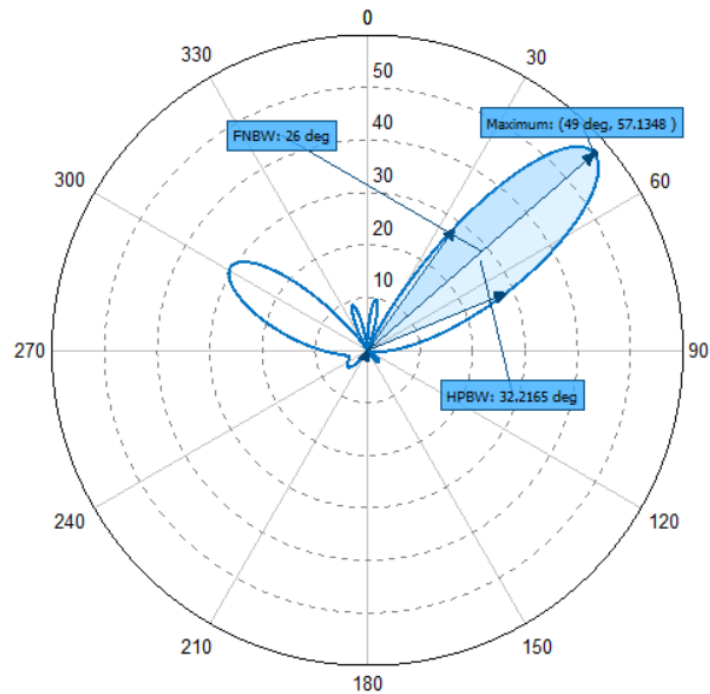


Fig. 4.50 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 49° azimuth con Ganancia en veces.

- Diagrama 3D con beam centrado en 0° vertical y 49° horizontal con Ganancia en dBi:

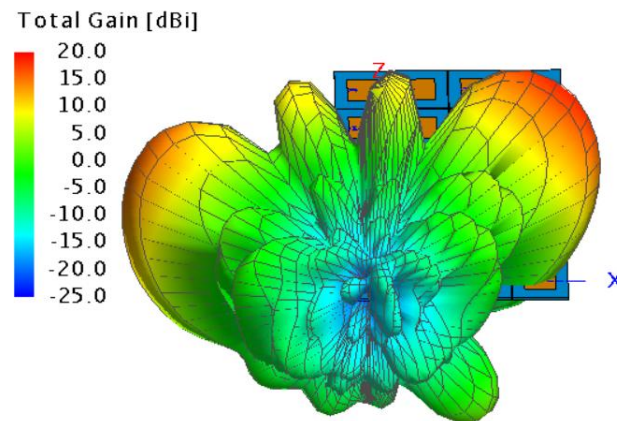


Fig. 4.51 Diagrama de radiación 3D con beam en 0° elevación y 49° azimuth con Ganancia en dBi.

- Diagrama polar con beam centrado en 0° vertical y 49° horizontal con Ganancia en dBi:

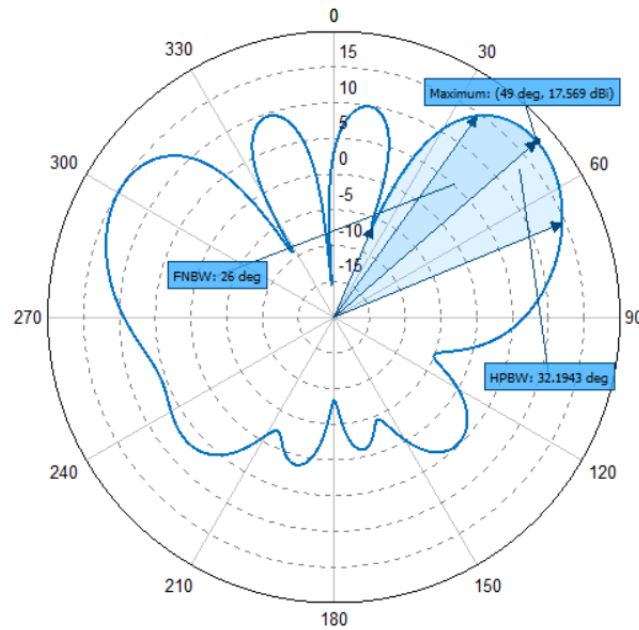


Fig. 4.52 Diagrama polar con beam en 0° elevación y 49° azimuth con Ganancia en dBi.

Tabla 4.16 Fases utilizadas en FEKO para diagrama de la Fig. 4.49

X, Y	X,1	X,2	X,3	X,4
Y,1	0,0°	156,1°	312,12°	468,2°
Y,2	0,0°	156,1°	312,12°	468,2°
Y,3	0,0°	156,1°	312,12°	468,2°
Y,4	0,0°	156,1°	312,12°	468,2°
Y,5	0,0°	156,1°	312,12°	468,2°
Y,6	0,0°	156,1°	312,12°	468,2°

Cabe mencionar que se realizaron solo simulaciones de alcance horizontal del beam ya que la antena 5G está ubicada casi a la misma altura del Movistar 5G LAB, pero para obtener las simulaciones de alcance vertical se tiene que realizar el mismo procedimiento. Primero obtener las fases del código de Matlab ubicado en Anexos, y luego introducirlas en la ventana de fases de CADFEKO (ver Fig. 4.10).

4.3.2. Análisis de Simulaciones.

Se presentará una tabla resumen donde muestra el alcance horizontal del beam de la antena, ancho de haz y ganancia del diagrama de radiación resultante.

Tabla 4.17 Datos extraídos de las simulaciones realizadas.

Alcance beam vertical [°]	Alcance beam horizontal [°]	Ancho de haz [°]	Ganancia [veces]	Ganancia [dBi]
0	-15	33,7	56,42	-
0	-10	29,401	72,52	-
0	-6	29,27	72,71	18,61
0	0	32,26	61,4	17,88
0	6	29,27	73,1	18,63
0	10	29,46	72,6	-
0	15	33,16	58,32	-
0	20	33,89	55,39	-
0	25	34,86	51,32	-
0	30	35,98	47,47	-
0	35	36,83	42,74	-
0	40	37,59	38,92	-
0	45	37,74	33,79	-
0	46	37,73	27,63	-

De la Tabla 4.17, se pueden concluir varios puntos, uno de ellos es que el ancho de haz del diagrama de radiación va fluctuando regularmente, dentro del rango de 29° a 38° para cualquier dirección horizontal del beam. Respecto de la Ganancia, se puede mencionar que ésta va aumentando hasta cierto punto a medida que la dirección del patrón de radiación se va desplazando horizontalmente, llegando hasta los 6° o -6° que figuran en la Tabla 4.17, donde se puede apreciar que para ambos casos se tienen los valores de Ganancia más altos (de color azul), en otras palabras, es el peak del arreglo de antenas que luego va disminuyendo considerablemente hasta los extremos. Recordando la teoría, se señala que en una antena direccional la Ganancia es mayor cuando el ancho del haz de su patrón de radiación es menor (es más directiva), ya que como son direccionales se ocupan para concentrar toda la radiación en un punto en específico, y como el punto en específico tiene menor área, es conveniente tener un haz más pequeño para que la Ganancia sea mayor y que haya más directividad en la zona deseada. Viendo los valores de Ganancia y ancho de haz plasmados en la Tabla 4.17, donde para el caso del beam ubicado en 0° vertical y 6° horizontal, la Ganancia es de 73,1 veces o 18,63 [dBi], cuyo

ancho de haz es de $29,27^\circ$ (muy directiva), y por el contraste para un beam ubicado en 0° vertical y 40° horizontal, se tiene una Ganancia de 38,92 veces y su correspondiente ancho de haz de $37,59^\circ$ (no tan directiva). Se puede observar que mientras más alejado esté el beam de su zona de máxima Ganancia, mayor será el ancho de haz, por lo tanto, no se recomienda estar muy alejado de esa dirección ya que la antena no es tan directiva en esas zonas.

Ahora, si se consideran las especificaciones de la antena de la Tabla 3.1, se puede apreciar que por fábrica la antena de arreglo (12 x 16) tiene un rango de alcance del beam de -60° a $+60^\circ$ en azimut, pero, al observar los patrones de radiación realizados por medio de simulaciones se puede notar claramente que el main beam va disminuyendo su tamaño a medida que el direccionamiento arbitrario de las fases de cada antena va aumentando modificando la ubicación del beam del lóbulo principal deseado. Por lo tanto, con el arreglo (3x4) ocupado para las simulaciones se puede llegar hasta un beam centrado en 0° vertical y 46° de alcance horizontal, ya que, a simple vista, un beam superior a 46° (si solo se toma en cuenta el primer cuadrante de un diagrama polar) ocasionara fallos en la dirección del beam deseado como muestra la Fig. 4.37.

Con las fases de la Tabla 4.12 se buscó ver el comportamiento del diagrama de radiación con un beam centrado en 0° elevación y 47° azimut, donde se puede observar que el lóbulo principal no se ubicó en esa dirección, si no en -37° horizontal. Por lo tanto, se puede concluir que para un arreglo de (3x4) cualquier beam centrado en 0° vertical y superior a 46° en azimut arrojará un valor no correspondiente al deseado.

Comparando el arreglo de (3x4) y otro como en el de la Fig. 4.49 de (4x6), la dirección del beam alcanza mayor rango, llegando a 0° elevación y 49° azimut con una Ganancia de 17,57 [dBi]. Lo anterior da a entender que mientras mayor sea el número de antenas compuesto por una matriz, el beam tendrá más alcance horizontal. Por lo tanto, si se hubiera obtenido el diagrama de radiación del arreglo original (12x16) se alcanzaría a llegar a un beam de 60° en azimut. No es el caso de estudio, pero también mientras mayor sea los elementos irradiadores, mayor será la Ganancia de la antena y la distancia de transmitir en un radioenlace viéndolo desde el punto de vista de una antena emisora.

Analizando los casos de la Tabla 4.17 en verde y en azul, se puede encontrar la media potencia del diagrama de radiación, que señala el ancho del haz ya representado en la simulación. Para todos los casos la media potencia se encuentra 3 [dB] por debajo de la Ganancia máxima:

i) Para el caso de 0° elevación y 0° azimut se tiene un máximo de 17,88 [dBi], por lo tanto, la media potencia corresponde a 14,88 [dBi].

ii) Para el caso de 0° elevación y 6° azimut se tiene un máximo de 18,63 [dBi], por lo tanto, la media potencia corresponde a 15,63 [dBi].

iii) Para el caso de 0° elevación y -6° azimut se tiene un máximo de 18,61 [dBi], por lo tanto, la media potencia corresponde a 15,61 [dBi].

Cabe señalar que se mencionó la Ganancia en [dBi] para estos tres casos porque representa un peak mayor a los de los extremos de la antena, los demás están en medida adimensional. La medida adimensional muestra la distribución del diagrama de radiación sin unidades centrado en un valor máximo centralizado y la medida en [dBi] determina la Ganancia de la antena en decibelios, considerando una comparación con una antena isotrópica.

Por último, se analiza el último factor que muestran las figuras, el primer ancho de haz nulo (FNBW):

Tabla 4.18 Datos extraídos de las simulaciones realizadas.

Alcance beam vertical [°]	Alcance beam horizontal [°]	Ancho de haz nulo [°]
0	-15	35
0	-10	32
0	-6	33
0	0	40
0	6	38
0	10	40
0	15	56
0	20	82
0	25	80
0	30	90
0	35	85
0	40	35
0	45	65
0	46	31

El ancho de haz entre nulos mide la separación angular entre las dos direcciones en las que el diagrama de radiación tiene sus primeros nulos (dirección donde la radiación se acerca a cero).

Como se puede observar de la Tabla 4.18, los anchos de haces varían, donde se puede observar que, en 0° elevación y 30° azimut, hay un mayor ancho de haz entre ceros. (señalada de color rojo en la Tabla 4.18)

Este ancho de haz entre nulos solo muestra que tan extenso es el diagrama de radiación en las zonas donde no hay tan buena radiación, por eso, es más importante el ancho de haz a media potencia.

4.4 Sumario.

Conocer y comprender el funcionamiento de un arreglo de antenas, mostrados en estudios previos la base para poder entender este análisis, empleándose en la ayuda del manejo de Softwares como FEKO y Matlab que son entregados como base de formación académica de un estudiante de Ingeniería Civil Eléctrica de la UCSC.

Como ingenieros, es fundamental conocer la metodología de estudio y formación para realizar este tipo de investigación, partiendo con una base de conocimientos matemáticos y físicos de coordenadas esféricas para ubicar la antena y sus respectivas fases. El desarrollo de problemas, planificación de tiempo como base teórica están en las asignaturas de “Antenas y enlaces de microondas” que entregan conocimientos bases del funcionamiento de una antena.

En este documento se vieron temas fundamentales para conocer el funcionamiento de la antena del Laboratorio 5G de la UCSC. Principalmente se analizó el comportamiento del diagrama de radiación, teniendo como resultado que este va a poseer mayor un ancho de beam en zonas donde está alejado de su potencia máxima (6° y -6° respectivamente). También se puede mencionar que mientras más antenas tenga un arreglo, esta será capaz de llegar a más extremos de la antena, ampliando la cobertura de la antena inteligente. Por lo tanto, el arreglo de 3x4 no posee un diagrama de radiación suficiente para que el beam llegué a una posición de $\pm 60^\circ$.

Capítulo 5. Conclusión.

Las antenas han sido creadas para emitir y recibir señales a largas distancias. Una parte muy importante de las antenas es su estructura, ya que dependiendo de cómo está conformada tendrá diferentes características como niveles de Ganancia, Directividad, ancho de haz y alcance máximo del beam.

Si bien solo se pudieron realizar simulaciones, estas muestran una noción importante para determinar cómo podría operar la antena, ya que se posee muchas limitaciones a la hora de realizar esta tesis. Una de ellas es la falta de anexos técnicos de la antena emisora, ya que no se sabe con exactitud qué tipo de antena ocupa, pero se procedió a realizar simulaciones con antenas patches. Se utilizaron de este tipo ya que en la actualidad con el avance de la tecnología muchas antenas vienen incorporadas patches, porque poseen un diseño compacto y discreto, es decir son más pequeñas que las dipolo, también porque poseen mayor direccionalidad y más versátiles en ajustar su ancho de banda.

La utilización de un conjunto de antenas con arreglo en fase amplifica significativamente sus aplicaciones. Al tener la capacidad de poder ajustar las fases del arreglo de antenas, se ajusta la directividad y se potencia sus capacidades. Por ejemplo, al aumentar la Ganancia en un punto determinado resulta tener más precisión de radiación, maximizando su uso en ese punto.

Al poder realizar simulaciones de diagramas de radiación se analizó el comportamiento para determinar el funcionamiento de la antena instalada en el Laboratorio 5G. Las diferentes simulaciones del Capítulo 4 mostraron que la antena alcanza un nivel de ganancia máximo de 18,6 [dBi] cuando el beam está centrado en $\pm 6^\circ$ con un ancho de haz de $29,27^\circ$, esto quiere decir que la antena en este punto opera a máxima potencia, y mientras mas alejado esté posicionado el beam de este punto, habrá mayor ancho de haz con menos ganancia.

Otro resultado importante de mencionar es la cantidad de elementos de antena, ya que al observar el arreglo de la Fig. 4.49 (4x6) alcanza un beam centrado en 0° elevación y 49° azimut, sobrepasando el posicionamiento que tiene el arreglo estudiado de 0° elevación y 46° azimut. Tomando de referencia lo anterior, se concluye que el arreglo de 3x4 no es capaz de llegar al alcance señalado en las especificaciones técnicas.

5.1 Trabajos Futuros.

- Poder diseñar la antena con sus 192 elementos irradiadores. Para poder realizar lo anterior hay que poseer un PC con características avanzadas de procesamiento de datos, porque FEKO pide muchos requisitos para simular grandes arreglos de antenas.
- Utilización de equipos 5G del Laboratorio para la creación de futuros estudios académicos.

Bibliografía

- [1] Mailloux, R. J. (2005). Phased array antenna handbook, 2nd ed. Artech House.
- [2] Standard-IEEE. (2013) IEEE Standard for definition of terms for Antennas. IEEE Std 145TM (Revision of IEEE Std 14-1993).
- [3] Antenna Theory (1982), Balanis, C. A. John Wiley and Sons (WIE).
- [4] Stutzman, W. L., & Thiele, G. A. (1998). Antenna theory and design (second edition). John Wiley & Sons.
- [5] Teoría de antenas, Jaume Anguera & Antonio Pérez, Guía de estudios (LaSalleOnline)
- [6] Modelación y Medición antena Laboratorio 5G (2023), María Ignacia Venegas Riquelme.
- [7] Antenna Theory, Analysis and Design, Third Edition, Constantine A. Balanis.
- [8] Antenna Theory, Analysis and Design, Second Edition, Constantine A. Balanis.
- [9] Antenas de Telecomunicaciones (2013), José Manuel Huidobro, Revista digital.
- [10] Unión Internacional de Telecomunicaciones (2011). *Recomendación UIT-R P.1238-11 Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores y redes radioeléctricas de área local en gama de frecuencia de 300 MHz a 450 GHz*. Ginebra, 2022.
- [11] Biblioteca del Congreso Nacional (2023, junio 15). *Decreto 77 otorga concesión de servicio público de telecomunicaciones a la empresa Telefónica móviles chile s.a. en la banda de frecuencias de 3,35 - 3,40 GHz*. <https://bcn.cl/3du8i>
- [12] Huawei Industrial Base (2020). *AAU5645 Description*. China, 2020.
- [13] Meza, C. (2022, enero 2). *Laboratorio 5G: nuevo espacio contribuirá a la investigación en la UCSC*. Universidad Católica de la Santísima Concepción. <https://www.ucsc.cl/noticias/laboratorio-5g-definen-detalles-para-habilitar-nuevo-espacio/>
- [14] Antenna Parameters and figures of Merit (FOM), Topic 2 (2017)
- [15] Fundamentos de radiación y antenas fundamentales, *Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*.
- [16] Cis Group, Ingeniería en Telecomunicaciones: *Antennas*.
- [17] Arreglo de antenas, Mónica Marín, Phil Contreras y Miguel Diaz.
- [18] Huawei, Tópicos básicos del 5G: *Tecnología de antena de matriz en fase*.
- [19] Antenas Inteligentes, capítulo 3: Antenas de tipo parche o microstrip.

[20] Diseño, Implementación y pruebas de un arreglo por fase para la detección de la emisión electromagnética de teléfonos celulares (2017), Christopher Eduardo Muñoz Pardo, Universidad de Chile.

Anexos. Código utilizado.

6.1 Código de Matlab.

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó el Software Matlab como apoyo matemático.

6.1.1. Configuración de fases para 12 antenas patch.

```
close all; clc; clear all;
% datos constantes
ANG_HORIZONTAL=0; % Angulo de azimut deseado en grados
ANG_VERTICAL=0; % Angulo de elevación en grados
Theta0 = deg2rad(ANG_HORIZONTAL); % Angulo de elevación deseado(HORIZONTAL EN LA ANTENA)en radianes
Phi0 = deg2rad(ANG_VERTICAL); % Angulo de azimut deseado(VERTICAL EN LA ANTENA)en radianes
c = 2.9979e8; % m/s - Velocidad de la luz
f = 3.4e9; % Hz - frecuencia de la antena 3.4 GHz
lambda = c/f; % longitud de onda en metros
K = 2*pi/lambda; % Constante
dx = 0.0492; % Distancia entre elementos X en metros
dy = 0.0725; % Distancia entre elementos Y en metros
N = 3; % Columna X, cantidad de elementos
M = 4; % Columna Y, cantidad de elementos
% angulo de desfase
a = -K*dx*sin(Theta0)*cos(Phi0);
A = rad2deg(a);
% Unidimensional paralelo
n = [1:1:N];
Phase = n.*K.*dx.*sin(Theta0)*cos(Phi0)+a;
Phase_deg = rad2deg(Phase);
% Bidimensional
m = [1:1:M];
ax = -K*dx*sin(Theta0)*cos(Phi0);
Phasex = n.*K.*dx.*sin(Theta0).*cos(Phi0)+ax;
Phasex_deg = rad2deg(Phasex);
bx = -K*dy*sin(Theta0)*sin(Phi0);
Phasey = m.*K.*dy.*sin(Theta0).*sin(Phi0)+bx;
Phasey_deg = rad2deg(Phasey);
array = Phasex_deg'+Phasey_deg
xlswrite('Tablafases.xlsx',array)
```