



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA TELECOMUNICACIONES

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA MICROSTRIP
QUE OPERE EN EL RANGO DE FRECUENCIA DE 3.3 A 3.6 GHZ
PARA COMUNICACIÓN 5G

Trabajo de titulación

Tipo: Dispositivo Tecnológico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

AUTOR: MARTIN FABRICIO BONILLA ERAZO

DIRECTOR: Ing. HUGO OSWALDO MORENO AVILÉS. Phd

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Martin Fabricio Bonilla Erazo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Martin Fabricio Bonilla Erazo, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, día de mes de año



Martin Fabricio Bonilla Erazo

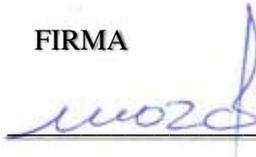
060334624-8

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA TELECOMUNICACIONES

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo: Dispositivo Tecnológico, **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA ANTENA MICROSTRIP QUE OPERE EN EL RANGO DE FRECUENCIA DE 3.3 A 3.6 GHZ PARA COMUNICACIÓN 5G**, realizado por el señor: **MARTIN FABRICIO BONILLA ERAZO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Franklin Geovanni Moreno Montenegro PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-11-14
Ing. Hugo Oswaldo Moreno Avilés DIRECTOR(A) DE TRABAJO DE TITULACIÓN		2023-11-14
Ing. Pedro Severo Infante Moreira ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN		2023-11-14

DEDICATORIA

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios, mi señor, a la Virgencita María por bendecir a mi ser hasta cumplir esta meta, a mis amados padres Fernando Bonilla y Gloria Erazo por inculcarme sus principios y valores. A mi abuelita, Judith Rivera, tías, primos, primas que me han apoyado y motivado a continuar, para expandir mis horizontes y no darme por vencido.

Martin Bonilla

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, a Jesús y la Virgen María por la fortaleza y paciencia que me han concedido para continuar ante cualquier adversidad y progresar ante cualquier dificultad a lo largo de mis estudios

A la querida Institución, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la cual he podido formarme como profesional a lo largo de estos años, que me ha brindado un segundo hogar a lo largo que he cruzado la carrera. A los docentes que me han instruido y guiado para desarrollarme como profesional, a la administración que me guiado para cumplir con todos los requerimientos.

Un agradecimiento especial a mi Tutor, Ing. Hugo Moreno; quien me ha guiado con su conocimiento, contribuyendo de manera significativa para desarrollar este trabajo, por su paciencia y consejo.

Agradezco a mis padres, a mi abuela, hermanos, tías y demás familiares que han sido una inspiración, apoyo moral y económico que me permitieron culminar esta etapa de mi vida. A los amigos y compañeros con los que he podido desarrollarme y trabajar en equipo para progresar a lo largo de la carrera.

Martin Bonilla

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY	xv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1	DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1	Antecedentes	2
1.2	Formulación del problema	3
1.3	Sistematización del problema.....	3
1.4	Justificación Teórica	3
1.5	Justificación aplicada.....	4
1.6	Objetivos	5
1.6.1	<i>Objetivo general</i>	5
1.6.2	<i>Objetivos específicos</i>	5

CAPÍTULO II

2	MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	7
2.1	5G.....	7

2.1.1	<i>Requisitos de 5G</i>	8
2.1.2	<i>Arquitectura NSA y SA</i>	9
2.1.3	<i>Frecuencias</i>	10
2.2	Características de las Antenas 5G	11
2.2.1	<i>Sistema de antena avanzado</i>	11
2.2.2	<i>Beamforming</i>	11
2.2.3	<i>MIMO y MU-MIMO</i>	12
2.3	Antena parche microstrip	13
2.4	Métodos de alimentación	14
2.4.1	<i>Sonda coaxial</i>	14
2.4.2	<i>Línea Microstrip</i>	14
2.4.3	<i>Línea Microstrip acoplada por proximidad</i>	15
2.4.4	<i>Acople de apertura</i>	15
2.5	Patrones de Radiación	16
2.5.1	<i>Otros parámetros</i>	17
2.6	Zonas de Radiación	18
2.6.1	<i>Campo Cercano Reactivo</i>	19
2.6.2	<i>Campo Cercano – Near-field</i>	19
2.6.3	<i>Campo Lejano – Far-Field</i>	19
2.7	Técnicas de adaptación de impedancia para Microstrip	20
2.7.1	<i>Transformador de un cuarto de onda</i>	20
2.7.2	<i>Transformador multisección</i>	22
2.7.3	<i>Transformador multisección tipo Chebyshev</i>	22
2.7.4	<i>Transformador multisección tipo binomial</i>	23
2.8	Método parche rectangular	24
2.9	Antena Log-periodic	25
2.10	Antenas 5G	25
2.11	Normas de testeo	29
2.11.1	<i>Estación Base tipo I-C para pruebas</i>	30

CAPÍTULO III

3	MARCO METODOLÓGICO.....	32
3.1	Descripción de los procesos	32
3.2	Metodologías.....	32
3.2.1	<i>Metodología de investigación.....</i>	32
3.2.2	<i>Metodología de Experimentación</i>	32
3.3	Requerimientos de la antena	33
3.4	Propuestas de diseño	33
3.4.1	<i>Primera propuesta</i>	33
3.4.2	<i>Segunda propuesta</i>	35
3.4.3	<i>Tercera propuesta.....</i>	37
3.4.4	<i>Cuarta propuesta</i>	38
3.4.5	<i>Quinta propuesta</i>	40
3.4.6	<i>Sexta propuesta</i>	42
3.5	Materiales.....	44

CAPÍTULO IV

4	IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL PROTOTIPO.....	45
4.1	Propuesta	45
4.2	Prototipo propuesto implementado	45
	CONCLUSIONES.....	56
	RECOMENDACIONES.....	56
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Requisitos de rendimiento para escenarios de alta velocidad de datos y densidad de tráfico9
Tabla 2-2: Límites de potencia nominal de salida de la estación base tipo 1-C	30
Tabla 2-3: Niveles de sensibilidad de referencia de BS de área local de NR	30
Tabla 3-1: Requerimientos de la antena	33
Tabla 3-2: Parámetros de FR4	33
Tabla 3-3: Lista de elementos o materiales	44

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1: Esquema de desarrollo	6
Ilustración 2-1: Arquitectura NSA	10
Ilustración 2-2: Arquitectura SA	11
Ilustración 2-3: Representación de MIMO	12
Ilustración 2-4: Representación de MU-MIMO	13
Ilustración 2-5: Estructura básica de una antena parche microstrip	13
Ilustración 2-6: Métodos de alimentación de antenas parche microstrip	15
Ilustración 2-7: Geometría de una línea de alimentación microstrip (a) vista superior (b) vista lateral	16
Ilustración 2-8: Patrón de Radiación en dB	17
Ilustración 2-9: Campos de radiación de una antena	19
Ilustración 2-10: Transformador de cuarto de onda	21
Ilustración 2-11: Transformador de onda multisección de 3 secciones	22
Ilustración 2-12: Ejemplo de diseño de antenas log-periódicas	25
Ilustración 2-13: Diseño de la configuración de la antena: (a) sin SRR, (b) con SRR	26
Ilustración 2-14: Patrón de radiación de la antena a 28.12 GHz (a) Sin SRR (b) Con SRR ...	26
Ilustración 2-15: Antena dipolo doblada ranurada	27
Ilustración 2-16: (a) Antena ranurada (b) Comportamiento multibanda de los parámetros S..	27
Ilustración 2-17: (a) Estructura de Parche ranurado y (b) Patrón de Radiación de campo lejano	28
Ilustración 2-18: Interfaz de la estación base transmisora tipo 1-C	31
Ilustración 2-19: Interfaz de la estación base receptora tipo 1-C	31
Ilustración 3-1: (a) Primera propuesta de la antena - patch rectangular	

(b) Respuesta en frecuencia del primer diseño de la antena	34
Ilustración 3-2: Patrones de Radiación de la antena rectangular (a) Plano-E (b) Plano-H	35
Ilustración 3-3: (a) Segunda propuesta de la antena (b) Respuesta en frecuencia de la segunda propuesta	36
Ilustración 3-4: Patrones de Radiación de la segunda propuesta (a) Plano-E (b) Plano-H	36
Ilustración 3-5: (a) Tercera propuesta de la antena (b) Respuesta en frecuencia de la tercera propuesta	37
Ilustración 3-6: Patrones de Radiación de la Tercera propuesta (a) Plano-E (b) Plano-H	38
Ilustración 3-7: (a) Cuarta propuesta de la antena (b) Respuesta en frecuencia de la cuarta antena	39
Ilustración 3-8: Patrones de Radiación de la Cuarta propuesta (a) Plano-E (b) Plano-H	40
Ilustración 3-9: (a) Quinta propuesta de la antena (b) Respuesta en frecuencia de la quinta propuesta de la antena	41
Ilustración 3-10: Patrones de Radiación de la Quinta propuesta (a) Plano-E (b) Plano-H	42
Ilustración 3-11: (a) Sexta propuesta de la antena (b) Respuesta en frecuencia de la sexta propuesta de la antena	43
Ilustración 3-12: Patrones de Radiación de la sexta propuesta (a) Plano-E (b) Plano-H	44
Ilustración 4-1: Antena implementada en FR4	45
Ilustración 4-2: Respuesta en frecuencia de la antena en el equipo	46
Ilustración 4-3: Comparación de la respuesta en frecuencia de la antena entre los datos medidos (azul) y los simulados	47
Ilustración 4-4: Patrón de Radiación $\Phi = 0$ (a) Medido y (b) Simulado	47
Ilustración 4-5: Patrón de Radiación $\Phi = 90$ (a) Medido y (b) Simulado	48
Ilustración 4-6: Patrón de Radiación medido en la cámara anecoica	49
Ilustración 4-7: Midiendo la cobertura de la antena	50
Ilustración 4-8: Midiendo la cobertura de la antena	50
Ilustración 4-9: Mediciones de canal de 5 MHz con separación de subportadora	

de 15 KHz	52
Ilustración 4-10: Mediciones de canal de 10 MHz con separación de subportadora de 15 KHz	52
Ilustración 4-11: Mediciones de canal de 10 MHz con separación de subportadora de 30 KHz	53
Ilustración 4-12: Mediciones de canal de 10 MHz con separación de subportadora de 60 KHz	53
Ilustración 4-13: Mediciones de canal de 15 MHz con separación de subportadora de 15 KHz	54
Ilustración 4-14: Mediciones de canal de 15 MHz con separación de subportadora de 30 KHz	55
Ilustración 4-15: Mediciones de canal de 15 MHz con separación de subportadora de 60 KHz	55

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: DIMENSIONES DE LA ANTENA

ANEXO B: MEDIDAS REALIZADAS

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realizó un estudio del arte sobre las antenas parche microstrip y la tecnología de conectividad 5G, para realizar el diseño de una antena que opere en la frecuencia de 3.45 GHz y que el ancho de banda cubra el rango de 3.3 a 3.6 GHz. El diseño de la antena se realizó utilizando el software de simulación electromagnética HFSS, proponiendo seis diseños, los primeros cuatro diseños usan como base una antena de parche rectangular que resultaban tener una baja ganancia y un ancho de banda estrecho, por lo que se cambió a un diseño de parche triangular que usa su reflejo como tierra, este diseño tiene un ancho de banda amplio de 230 MHz y una ganancia de -12.13 dB, para mejorar el diseño se realizó cortes en la parte superior del parche triangular, ampliando el ancho de banda a 252 MHz y mejorando la ganancia a -13.76 dB, eligiendo este diseño como la mejor propuesta. Las mediciones se realizan usando equipos de Radio Frecuencia, el generador de señales y analizador de espectros, para medir el patrón de radiación y la cobertura de la antena a distancias de 2.5 cm hasta 5m con potencias de transmisión de -10 dBm, 0 dBm, 10 dBm y 20 dBm y sensibilidad especificada en la norma TS 138.141-1 para área local. Los resultados de medición muestran que la antena tiene dos lóbulos grandes que apuntan hacia el frente y la parte trasera de la antena en el plano-E, con un ancho de banda 270 MHz en el rango de 3.38 a 3.65 GHz, con una ganancia de -12.6 dB y una eficiencia del 93.8%. Concluyendo que la antena es capaz de trabajar en aplicaciones de área local para potencias de transmisión mayores a los 0 dBm.

Palabras clave: <ANTENAS>, <TECNOLOGÍA 5G>, <MICROSTRIP>, <MICROONDAS>, <PATRÓN DE RADIACIÓN>, <GANANCIA>, <RADIOCOMUNICACIONES>.



[Handwritten signature]
26-09-2023
1757-DBRA-UPT-2023

SUMMARY

In this present thesis, a study about microstrip patch antennas and 5G connectivity technology was conducted to design an antenna operating at a frequency of 3.45 GHz with a bandwidth covering 3.3 to 3.6 GHz range. The antenna design was carried out using the electromagnetic simulation software HFSS, proposing six designs. The initial four designs utilized a rectangular patch antenna, which exhibited low gain and a narrow bandwidth. Consequently, a triangular patch design using its reflection as ground was employed, providing a broad bandwidth of 230 MHz and a gain of -12.13 dB to enhance the design cuts were made on the top of the triangular patch, expanding the bandwidth to 252 MHz and improving the gain to -13.76 dB. This modified design was selected as the optimal proposal. Measurements were conducted using Radio Frequency equipment, signal generators, and spectrum analyzers, assessing the antenna's radiation pattern and coverage at distances ranging from 2.5 cm to 5m with transmission powers of -10 dBm, 0 dBm, 10 dBm, and 20 dBm, following the specifications outlined in standard TS 138.141-1 for local area applications. Measurement results revealed two significant lobes pointing towards the front and rear of the antenna in the E-plane, with a bandwidth of 270 MHz within the range of 3.38 to 3.65 GHz, a gain of -12.6 dB, and an efficiency of 93.8%. It was concluded that the antenna is suitable for local area applications with transmission powers higher than 0 dBm.

KEYWORDS: <ANTENNAS>, <5G TECHNOLOGY>, <MICROSTRIP>, <MICROWAVES>, <RADIATION PATTERN>, <GAIN>, <RADIO COMMUNICATIONS>.



Lic. Maritza Larrea Mg.
0603370784

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicación inalámbrica han evolucionado a lo largo de las últimas décadas, aumentando el alcance, la eficiencia y la capacidad para transferir información a largas distancia, volviéndose uno de los medios de comunicación más utilizados, permitiendo el ahorro de costos y llegar a lugares que sería más complicado llegar si se necesita usar medios guiados.

Desde la llegada de la primera red celular las tecnologías de comunicación inalámbrica han evolucionado en diferentes generaciones, siendo la 5G la próxima generación de comunicación inalámbrica que aportara mejoras significativas en las velocidades de transmisión para una mayor velocidad de transmisión.

Los equipos para 5G se componen de los elementos similares de una estación de transmisión y recepción con elementos mejorados para las nuevas mejoras de tasa de transmisión, uno de los elementos que debe tener capacidad para la transferencia de información es la antena, para que la transmisión y recepción entre los dispositivos sea estable y eficiente.

Las antenas pueden diseñarse con diferentes materiales y para un amplio rango de frecuencias, siendo las antenas microstrip una de las formas con las que se puede experimentar y desarrollar antenas para aplicaciones de comunicación inalámbrica.

Este documento estudia el arte de las antenas microstrip para desarrollar una antena que opere a una frecuencia de 3.45 GHz, con un ancho de banda de 3.3 GHz a 3.6 GHz, y de las comunicaciones 5G cuyas propiedades y arquitecturas se especifican por las organizaciones encargadas del desarrollo de las nuevas tecnologías y de regularlas, 3GPP y UIT.

Se consideran seis diseños diferentes de antenas microstrip, que se desarrollaron en el software de simulación electromagnética HFSS, implementando solo el mejor diseño en una baquelita de fibra de vidrio para circuitos impresos. Se considera mediciones de intensidad de potencia de campo eléctrico con el generador de señales Anritsu MG3692C y el analizador de espectros Anritsu MS2724C, a distancias de 2.5 m a 5 m y de varias frecuencias con separación de subportadora de 15 KHz.

Los resultados obtenidos para el posterior análisis de datos se representan por medio de ilustraciones procesadas con el software MATLAB, para observar como la antena responde a medida que la distancia de medición aumenta y la variación de potencia captada en diferentes frecuencias para canales 5, 10 y 15 MHz con subportadoras de 15, 30 y 60 KHz, como se establece dentro de las normas para las estaciones base de 5G.

CAPÍTULO I

1 DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

El 5G es la quinta generación de redes móviles, cuyos requisitos son definidos en términos de nuevos servicios y mercados por SA1 para diferentes usos de 5G. Uno de los requisitos de esta tecnología es la Banda ancha móvil mejorada (eMBB) la cual es superior a los de 4G, tanto en tasas de datos, densidad de tráfico/conexión, movilidad de usuarios, etc. Lo cual permite contemplar varios escenarios es posible abordar áreas de servicio que se pueden desplegar y dar cobertura a áreas urbanas, rurales, oficina y hogar, permitiendo tener conectividad en áreas locales y amplias, además y aplicaciones de transmisión masivas y de alta velocidad. Por lo que se espera alcanzar velocidades de hasta 50 Mbps en enlaces descendentes exteriores y de 1 Gbps en interiores (5GLAN), y la mitad de estos valores para el enlace ascendente.

Otro de los requisitos de 5G con las Comunicaciones Críticas (CC) y Comunicaciones Ultra Confiables y de Baja Latencia (URLLC), donde los escenarios requieren un soporte de muy baja latencia y muy alta disponibilidad del servicio de comunicaciones. La latencia al depender del retraso en la interfaz de radio y algunos factores pueden depender del propio sistema 5G, pero el impacto puede reducirse mediante interconexiones adecuadas entre el sistema 5G y los servicios o servidores fuera del sistema 5G, por lo que en el sector industrial es uno de los que más podría explotar esta tecnología al buscar la automatización industrial, pues se espera una alta confiabilidad de esta tecnología de un 99.9999%, pudiendo utilizar una tasa de datos experimentada de hasta 100 Mbps y una latencia de extremo a extremo de 50 ms (3GPP TR 21.915. V 15.0.0)

Si bien la tecnología 5G ya está siendo expandida de poco a poco en países como E.E.U.U, España y otros países avanzados, los costos que implica el cambio de tecnología de 4G a 5G es uno de los factores por lo que países con menor capacidad adquisitiva aún no han iniciado el cambio de tecnología, por lo cual el éxito de los servicios depende de los gobiernos y reguladores nacionales, quienes mediante una planificación deberán determinar la velocidad, el alcance y la calidad de los servicios 5G, permitiendo un acceso oportuno a una cantidad y tipo de espectro que sea adecuada y asequible, bajo las condiciones apropiadas. (GSMA, 2019)

Por otro lado, en países latinoamericanos la introducción al 5G es algo que llevara tiempo y una fuerte inversión, sin embargo, las planificaciones para la migración al 5G es algo que las entidades

gubernamentales van desarrollando de poco a poco. Según el documento de GSMA (2020) “5G y el Rango 3.3-3.8 GHz en América Latina”, estima que para 2025 4G represente el 67% de las conexiones en América Latina, mientras que 5G se espera que alcance un 7%. En el mismo documento, Ecuador atribuye el rango de 3.3-4.2 GHz en su totalidad para los servicios móviles. La Agencia de Regulación y Control de Telecomunicaciones (Arcotel) presentó un informe técnico sobre el uso y la canalización de los rangos 3,3-3,4 GHz y 3,4-3,6 GHz en el año 2018, considerando el uso de 3.3-3.6 GHz con 300 MHz para 5G.

Firdausi, A., Damayanti, L., Hakim, G. P. N., Umairah, U., & Alaydrus, M. (2021) realizan una antena microstrip de banda dual para comunicaciones 5G, la cual opera en 29 GHz y 38 GHz, con grandes anchos de banda de 4.5 GHz y 3.75 GHz respectivamente, lo cual demuestra que se puede hacer una implementación de la antena. El trabajo de Sandi, E., Rusmono, A. D., Diamah, A., & Vinda, K. (2020) es otro ejemplo de que es posible diseñar este tipo de antenas para comunicaciones 5G.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo diseñar una antena microstrip que opere en el rango de frecuencias de 3.3-3.6 GHz considerado en Ecuador para 5G?

1.3 Sistematización del problema

¿La bibliografía relacionada a las antenas microstrip y la tecnología 5G es detallada para poder diseñar una antena que cumpla los requerimientos de 5G?

¿Qué requerimientos debe cumplir el diseño de la antena para satisfacer los requerimientos de la tecnología 5G?

¿La antena implementada operara en el rango de frecuencias y con un ancho de banda adecuado para 5G?

¿La antena microstrip será eficiente para usarla en la conectividad de la tecnología 5G?

1.4 Justificación Teórica

Los dispositivos para el uso de la tecnología 5G deben ser apropiados para cumplir con los requerimientos antes mencionados, y uno de los principales dispositivos para soportar las altas tasas de datos de transmisión es la antena, por lo que el diseño de la antena es importante para que la tecnología sea eficiente, como lo demuestran Firdausi, A., Damayanti, L., Hakim, G. P. N., Umairah, U., & Alaydrus, M. (2021).

Las antenas de parche microstrip, tienen una versatilidad de su geometría, lo cual las vuelve ideales para muchas situaciones, pudiendo tener una facilidad de integrarse con circuitos integrados de microondas, pero también tienen la desventaja de tener una baja ganancia y un ancho de banda estrecho. (Dheyab, E., & Qasem, N., 2016)

Las antenas pueden tener el mismo comportamiento para la recepción como para la emisión, ya que se caracterizan por parámetros como el ancho de banda como el margen de frecuencias en la que los parámetros de la antena cumplen unas determinadas características, la directividad como la densidad de potencia radiada en una dirección, la ganancia como la relación entre la densidad de potencia radiada en una dirección a una determinada distancia y la potencia total entregada a la antena, entre otras más como la eficiencia y el patrón de radiación. (Huidobro, 2013). Los cuales pueden sufrir de pérdidas por el ambiente que los rodea.

La ETSI (2021) especifica por medio del documento TS 138 141-1 las especificaciones técnicas de las estaciones base (BS) para pruebas de conformidad, especificando los parámetros y límites que deben tener las BS transmisoras o receptoras para la realización de pruebas, y especifican dos tipos de BS, la 1-C y la 1-H. Para el desarrollo de este trabajo se empleará el tipo 1-C ya que este tipo puede usarse para una antena conectada, como el caso de este trabajo, o varias antenas conectadas haciendo uso de dispositivos externos como amplificadores y filtros, los cuales pueden emplearse o no, dependiendo del caso.

Tal como especifica GSMA (2020) en “5G y el Rango 3.3-3.8 GHz en América Latina”, América Latina tiene un largo camino que recorrer para que la tecnología 5G pueda implementarse, pero se puede seguir desarrollando estudios con los cuales se pueda mejorar la conectividad de los dispositivos, por lo que el desarrollo de antenas que puedan cumplir con los requerimientos de 5G podría brindar beneficios a la tecnología.

1.5 Justificación aplicada

Para el desarrollo de la antena, como muestra la Ilustración 1-1, primero se llevará a cabo el diseño de la antena en un software de simulación como HFSS para ir haciendo pruebas en la simulación para ir comprobando que la antena opera en el rango de frecuencias determinado y ver los parámetros de la antena como la ganancia, el patrón de radiación, la efectividad, tratando de tener una buena ganancia para la emisión y recepción. Una vez desarrollada la antena se debe imprimir en una placa PCB, el cual puede ser RF-4 o algún otro que se encuentre disponible en el mercado, teniendo en cuenta que las características del PCB para el desarrollo y simulación de la antena en el software.

El método que se usará para la impresión de la antena será imprimir la antena parche en un sticker que se adhiere a la placa de PCB para después sumergir la placa en ácido para retirar el metal no necesario de la placa. La impresión de la antena en el sticker se realizará en un local dedicado en esto, ya que tienen equipos que pueden hacer la impresión de tal manera que las medidas de la antena resultante no varíen mucho con las medidas de la antena simulada.

Una vez que el metal no necesario sea removido de la placa, al retirar el sticker quedará la antena microstrip, y se le soldará un conector SMA hembra para poder conectar a los equipos. Se realizará dos antenas, una para ser el transmisor y otra el receptor. Una vez implementada la antena se realizará la medición de los parámetros de la antena como el patrón de radiación, la eficiencia y la ganancia con ayuda del generador de señales Anritsu MG3692C y el analizador de espectros Anritsu MS2724C, para después comparar los resultados simulados con los reales.

Después se realizará una prueba usando las especificaciones técnicas de la 3GPP de la norma TS 38.104 v17.7.0 (2022), empleando una configuración de BS tipo 1-C sin dispositivos externos para poner a prueba la antena y medir la cobertura de la antena en un entorno normal según el anexo B del documento ETSI TS 138 141-1 v16.6.0 (2021), y realizar la prueba usando la cámara anecoica, para observar la variación de la potencia entre ambas pruebas.

1.6 Objetivos

1.6.1 *Objetivo general*

Diseñar e implementar una antena microstrip que opere en el rango de frecuencia de 3.3 a 3.6 GHz para comunicación 5G.

1.6.2 *Objetivos específicos*

- Estudiar el estado de arte sobre los métodos de diseño de antenas microstrip y de la tecnología 5G.
- Diseñar y simular la antena microstrip en HFSS que opere en el rango de frecuencia para la tecnología 5G de 3.3 a 3.6 GHz buscando una ganancia alta.
- Implementar la antena microstrip y realizar mediciones de los parámetros del patrón de radiación, directividad y eficiencia de la antena con ayuda de los equipos de radiofrecuencia de la ESPOCH.
- Evaluar el desempeño de la antena siguiendo la norma TS 138 141-1 de pruebas de conformidad usando el modelo de la BS tipo 1-C para evaluar la potencia y la cobertura de la antena.

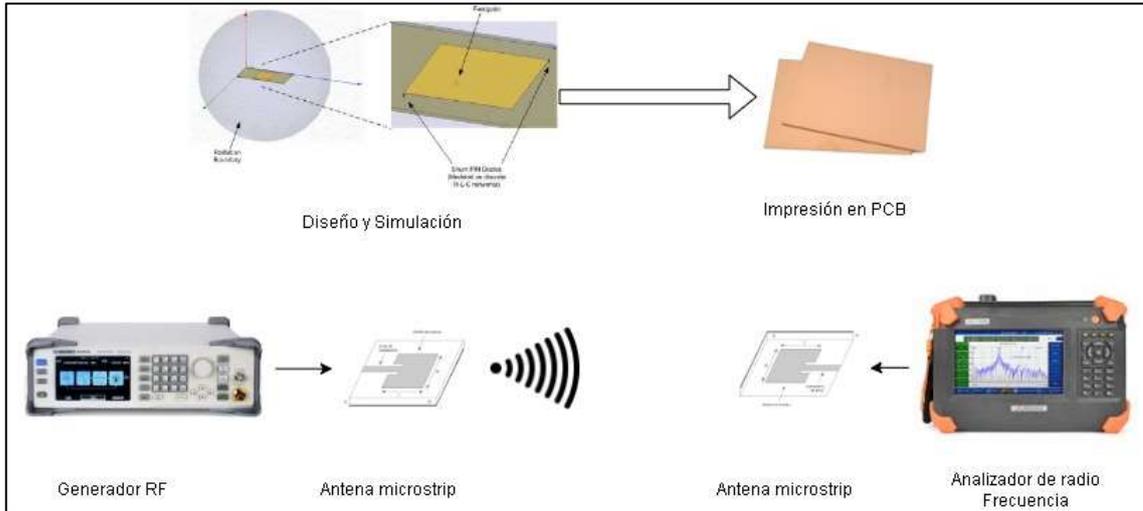


Ilustración 1-1: Esquema de desarrollo

Realizado por: Bonilla, M., 2022

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.1 5G

El aumento de la demanda de consumidor, promoviendo el aumento del tráfico con el incremento del número de dispositivos y servicios, requiriendo una mayor asequibilidad y mejoras de experiencia requiriendo soluciones innovadoras, considerando que para 2025 se estima que habrá 50.000 millones de dispositivos a Internet. Esta tecnología es capaz de conectar personas, cosas, datos, aplicaciones, sistemas de transporte y entornos para comunicaciones inteligentes, ya que esta red tiene la capacidad de transportar un volumen de datos a gran velocidad de manera fiable y procesar grandes cantidades de datos con el menor retardo posible.

Con la tecnología 5G se puede dar soporte a aplicaciones como ciudades inteligentes, video 3D, trabajo y juegos en la nube, servicios médicos a distancia, realidad virtual, con la capacidad de establecer comunicaciones entre maquina a máquina en la automatización de la industria, ya que las redes 3G y 4G tienen dificultades para ofrecer estos servicios.

Las redes 5G tiene objetivos muy ambiciosos al ofrecer altas velocidades y mayor capacidad para las comunicaciones masivas de maquina a máquina y baja latencia para la prestación de servicios, aportando una alta fiabilidad para aplicaciones en calidad en un factor crítico en el tiempo. Sin embargo, también tiene que enfrentar retos considerables, como el aumento de la capacidad y velocidades de datos, teniendo la necesidad de un mayor espectro y tecnologías capaces de hacer uso de este recurso con la mayor eficiencia posible.

El aumento del espectro deben ser frecuencias mayores de 24 GHz, lo cual puede ser uno de los problemas que más se deben considerar, pues las características de propagación intrínsecas del rango de frecuencias, teniendo cortos rangos de cobertura, aumentando la complejidad de la infraestructura, requiriendo desplegar equipos radioeléctricos en diversas instalaciones. Con ello, las conexiones entre estaciones base y la red modular son otro problema, ya que se busca tener disponibilidad.

Sin olvidar que el espectro radioeléctrico, al ser un recurso limitado y escaso debe ser regulado, de modo que las bandas de frecuencia sean distribuidas para ser utilizadas en servicios específicos, permitiendo la convivencia de los servicios sin que interfieran con los servicios adyacentes, al

cumplir con normas técnicas que son establecidas por los entes que regulan esta distribución. Por lo que se debe aplicar regulaciones a escala mundial para evitar la interferencia entre las redes de la tecnología 5G. (UIT, 2022)

2.1.1 Requisitos de 5G

La nueva generación de comunicación celular proporciona varias mejoras, según 3GPP TS 22.261 (2022) con lo que se espera pueda cumplir con los siguientes requisitos:

- Banda ancha móvil mejorada (eMBB)

Las tasas de datos, densidad de tráfico/conexión, movilidad de usuarios son algunos de los requerimientos que deben ser superiores a 4G, contemplando varios escenarios de despliegue y cobertura de diferentes áreas de servicios y despliegues de reuniones masivas, vehículos y de alta velocidad como se observa en la Tabla 2-1, de modo que se espera enlaces descendentes con velocidades de 50 Mbps en escenarios exteriores y 1 Gbps en interiores y se espera que las velocidades de datos sean por lo menos la mitad para los enlaces ascendentes.

- Comunicaciones Críticas (CC), Ultra Confiables y de Baja Latencia (URLLC)

Se estima que en determinados escenarios se vaya a requerir tener un servicio de comunicaciones que soporte muy baja latencia y una alta disponibilidad, enfocado principalmente para servicios de automatización industrial. Como la latencia depende de diversos factores dentro de las interfaces de radio y del sistema de 5G, se puede reducir el impacto mediante interconexiones adecuadas entre el sistema 5G, esperando tener una confiabilidad del 99,9999 %, con una tasa de datos experimentada por el usuario de hasta 100 Mbps y una latencia de extremo a extremo de 50 ms, usando la capacidad del Edge Computing.

- Internet masivo de las cosas (mIoT)

Se estima que el sistema 5G sería capaz de admitir grandes densidades de dispositivos, por lo que entre los requisitos se incluye los aspectos operativos aplicados a una amplia gama de dispositivos y servicios de IoT anticipados en el marco de tiempo de 5G.

- Operaciones de red flexibles

Se refiere a un conjunto de especificidades que ofrecería el sistema 5G, para cubrir aspectos como la división de redes, la exposición de la capacidad de la red, la escalabilidad y la movilidad diversa, la seguridad, la entrega eficiente de contenido, la migración y el funcionamiento.

Tabla 2-1: Requisitos de rendimiento para escenarios de alta velocidad de datos y densidad de tráfico

	Guion	Velocidad de datos experimentada (DL)	Velocidad de datos experimentada (UL)	Capacidad de tráfico del área (DL)	Capacidad de tráfico del área (UL)	Densidad general de usuarios	factor de actividad	velocidad UE	Cobertura
1	macro urbano	50 Mbit/s	25 Mbit/s	100 Gbit/s/km ²	50 Gbit/s/km ²	10 000/km ²	20 %	Peatones y usuarios de vehículos (hasta 120 km/h)	Full network
2	macro rural	50 Mbit/s	25 Mbit/s	1 Gbit/s/km ²	500 Mbit/s/km ²	100/km ²	20 %	Peatones y usuarios de vehículos (hasta 120 km/h)	Full network (note 1)
3	punto de acceso interior	1 Gbit/s	500 Mbit/s	15 Tbit/s/km ²	2 Tbit/s/km ²	250 000/km ²	note 2	peatones	oficina y residencial
4	Acceso de banda ancha en una multitud	25 Mbit/s	50 Mbit/s	[3,75] Tbit/s/km ²	[7,5] Tbit/s/km ²	[500 000]/km ²	30 %	peatones	área confinada
5	Denso urbano	300 Mbit/s	50 Mbit/s	750 Gbit/s/km ²	125 Gbit/s/km ²	25 000/km ²	10 %	Peatones y usuarios de vehículos (hasta 60 km/h)	Centro
6	Servicios similares a la transmisión	Maximo 200 Mbit/s (por TV canal)	N/A or modest (e.g. 500 kbit/s por usuario)	N/A	N/A	[15] TV canales de [20 Mbit/s] en un transportista	N/A	Usuarios estacionarios , peatones y usuarios en vehículos (hasta 500 km/h)	Full network
7	Tren de alta velocidad	50 Mbit/s	25 Mbit/s	15 Gbit/s/train	7,5 Gbit/s/train	1 000/train	30 %	Usuarios en trenes (hasta 500 km/h)	a lo largo de los ferrocarriles
8	vehículo de alta velocidad	50 Mbit/s	25 Mbit/s	[100] Gbit/s/km ²	[50] Gbit/s/km ²	4 000/km ²	50 %	Usuarios en vehículos (hasta 250 km/h)	a lo largo de las carreteras
9	Conectividad de aviones	15 Mbit/s	7,5 Mbit/s	1,2 Gbit/s/plane	600 Mbit/s/plane	400/plane	20 %	Usuarios en aviones (hasta 1 000 km/h)	

Fuente: 3GPP TS 22.261. V19, 2022

Realizado por: Bonilla, M., 2023

2.1.2 Arquitectura NSA y SA

El paso a la nueva generación de red celular no será inmediatamente, ya que los costos de cambio de 4G a 5G serían demasiado elevados y con beneficios poco atractivos para los inversores, por lo que se define la arquitectura "Non-Stand Alone" (NSA) que permite usar la red principal de infraestructura LTE y EPC combinada con la "Red de Acceso" (AN) de Radio 5G y su interfaz

de "Nueva Radio" (NR), permitiendo usar la tecnología NR sin reemplazo de red. Esta arquitectura permite tener los beneficios de 5G mientras se utilizan los servicios 4G con menor latencia.

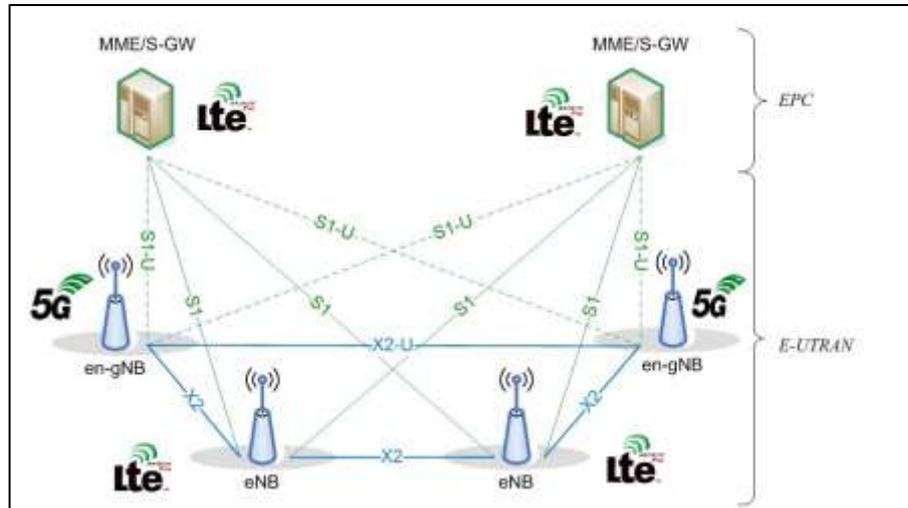


Ilustración 2-1: Arquitectura NSA

Fuente: 3GPP TR 21.915 V15.0.0, 2019

La NSA también se conoce como "Conectividad dual E-UTRA-NR (EN-DC)" u "Opción de arquitectura 3" y se puede considerar como un paso temporal hacia el despliegue de "5G completo", donde la red de acceso 5G está conectada a la red central 4G, como se observa en la Ilustración 2-1 donde la arquitectura 5G interactúa con las demás tecnologías. En la arquitectura NSA ofrece conectividad dual, a través de 4G AN (E-UTRA) y 5G AN (NR). Por lo tanto, también se denomina "EN-DC", por "Conectividad dual E-UTRAN y NR". (3GPP TR 21.915, 2019)

A medida que los sistemas LTE van a ser reemplazados por los sistemas 5G, la arquitectura NSA pasaría a estar completamente conectado por 5G, pasando a ser una arquitectura llamada "Stand-Alone" (SA), admitiendo el conjunto completo de servicios 5G como se muestra en la Ilustración 2-2.

2.1.3 Frecuencias

La NR hace uso de dos "Rangos de Frecuencia" (FR), el FR1 que se encuentra en el rango de 450 - 7125 MHz y FR2 en el rango de 24250 - 52600 MHz o de ondas milimétricas., los FR tiene otra diferencia aparte de los rangos de frecuencias, y esa es la metodología de prueba que tiene cada uno de los FR, teniendo dos metodologías, la "Conducida" y "por aire (OTA)".

La metodología "Conducido" es un método pasivo, usado cuando los conectores de antena todavía están accesibles, mientras que "OTA" se usa cuando los conectores de antena no están accesibles, como en un contexto MIMO masivo. Para FR1 se puede usar las dos metodologías, pero para RF2 solo se puede usar la metodología OTA. (3GPP TR 21.915, 2019)

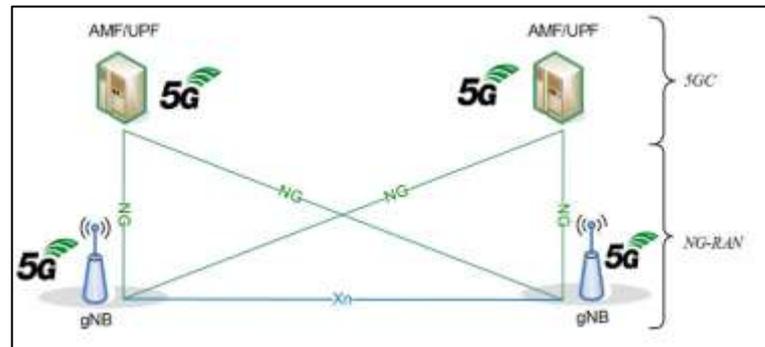


Ilustración 2-2: Arquitectura SA

Fuente: 3GPP TR 21.915 V15.0.0,2019

2.2 Características de las Antenas 5G

2.2.1 Sistema de antena avanzado

Un sistema de antena avanzado (AAS) es una combinación de una radio AAS que se conforma de un conjunto de antenas donde el hardware y el software se relacionan estrechamente para la transmisión y recepción de señales de radio, y algoritmos para procesar las señales para respaldar la ejecución de las funciones AAS, las funciones ASS o técnicas de múltiples antenas favorecen tener una ganancia significativa en el rendimiento, permitiendo tener una adaptabilidad y capacidad de dirección mucho mayores, de tal manera que los patrones de radiación de la antena se adaptan al tráfico variante en el tiempo y a las condiciones de propagación de radio multitrayecto, permitiendo recibir o transmitir múltiples señales simultáneamente con diferentes patrones de radiación. (Butovitsch, et al. 2018)

2.2.2 Beamforming

La formación de haces o beamforming es una capacidad que permite dirigir la energía de radio por un canal de radio a un receptor específico, esto es posible al ajustar la fase y la amplitud de las señales, haciendo que las señales se junten en una formación de haces se dirijan a un receptor UE, aumentando la intensidad de la señal recibida y capaz de adaptarse al entorno, aumentando el rendimiento para los enlaces ascendentes y descendientes al reducir la interferencia con otros UE. (Butovitsch, et al., 2018)

2.2.3 MIMO y MU-MIMO

La entrada múltiple y la salida múltiple (MIMO) es una tecnología que utiliza múltiples antenas que permiten la transmisión de datos de múltiples capas para un solo UE (MIMO de usuario único) con un máximo de ocho capas de transmisión para DL y cuatro para UL. También es posible la transmisión de datos multicapa con múltiples UE en diferentes capas (MU-MIMO) con un máximo de doce capas de transmisión para transmisión DL y UL.

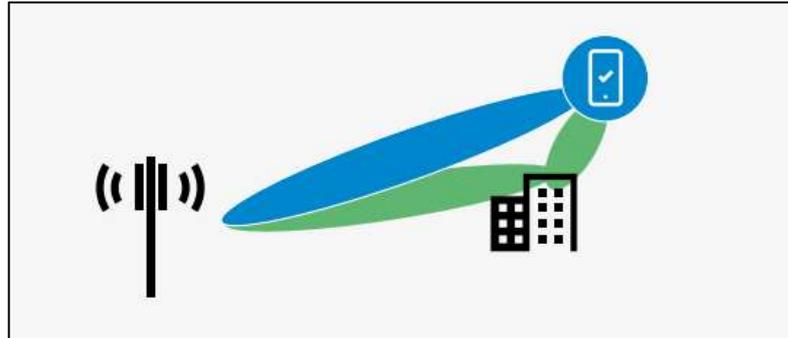


Ilustración 2-3: Representación de MIMO para un usuario, con diferentes colores para representar los haces

Fuente: Butovitsch, et al., 2018

Es posible usar un libro de códigos para la transmisión de datos multicapa UL, donde el gNB selecciona la matriz de pre-codificación aplicada para la transmisión PUSCH, también es posible realizar una transmisión UL sin basarse en el libro de códigos, transmitiendo múltiples SRS precodificados y luego el gNB selecciona las capas de transmisión deseadas para PUSCH según la recepción de los SRS captados.

Ya que es posible la operación multihaz donde cada señal/canal se transmite en un haz direccional, se puede formar haces de transmisión DL gNB realiza la formación de haces de transmisión a un bloque SS/PBCH, después un UE mide la señal de referencia recibida en la capa física (L1-RSRP) para informar el bloque SS/PBCH o el recurso CSI-RS con el valor máximo de L1-RSRP como un informe de haz L1-RSRP para que el gNB puede decidir la formación de haces de transmisión de gNB para el UE en función del L1-RSRP informado. (3GPP TR 21.915, 2019)

En la Ilustración 2-3 se observa la representación de como el dispositivo final recibe varias señales, tanto una señal directa como varias señales que se reflejan en superficies, mientras que la Ilustración 2-4 muestra como una Estación Base es capaz de transmitir a varios dispositivos que se encuentren dentro de su área de cobertura para brindar comunicación entre dispositivos y los dispositivos que se encuentra fuera se conectan a la estación base más cercana

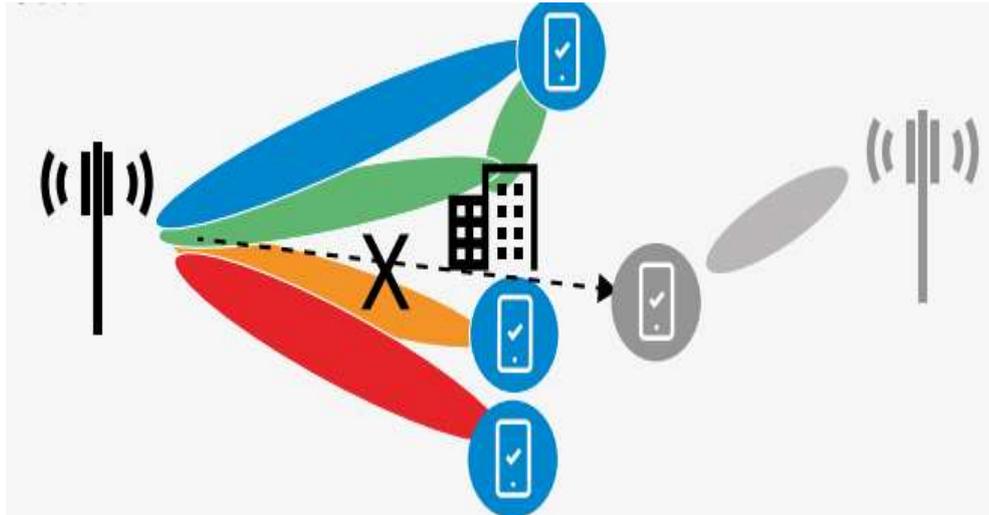


Ilustración 2-4: Representación de MU-MIMO, con diferentes colores para representar los haces

Fuente: Butovitsch, et al., 2018

2.3 Antena parche microstrip

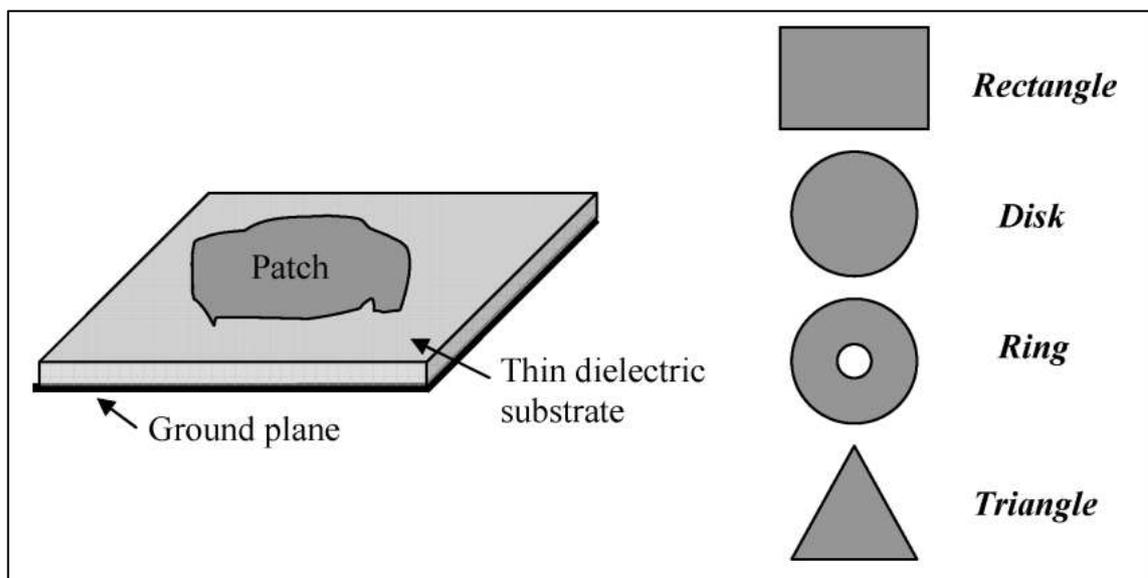


Ilustración 2-5: Estructura básica de una antena parche microstrip

Fuente: Lee, K. F., & Tong, K. F., 2016.

La idea de las antenas de parche microstrip surgió de la utilización de circuitos impresos tecnología no solo para los componentes del circuito y las líneas de transmisión, sino también para los elementos radiantes de un sistema electrónico. Primero se propuso por Deschamps, pero se prestó poca atención a su idea hasta que 1970 Desde entonces, esta clase de antenas ha sido objeto de un intenso investigación y desarrollo. Hay varios miles de trabajos publicados sobre el

tema, así como una serie de libros. La estructura básica de la antena de parche microstrip se muestra en Ilustración 2-5, la cual consiste en una zona de metalización apoyada sobre un suelo plano por un sustrato dieléctrico delgado y alimentado contra el suelo en un lugar apropiado. En principio, la forma del parche puede ser arbitraria; en la práctica, el rectángulo, el círculo, el triángulo y el anillo anular son formas comunes. (Lee, K. F., & Tong, K. F.,2016)

2.4 Métodos de alimentación

En la Ilustración 2-6 se muestra las formas de alimentación de una antena parche, las cuales son descritas a continuación.

2.4.1 Sonda coaxial

Este es quizás el método de alimentación más común. La sonda coaxial suele tener una impedancia característica de 50 ohmios. Como la impedancia de entrada de la antena de parche varía con la ubicación de la fuente, la sonda debe estar en un punto de 50 ohmios del parche para lograr la coincidencia de impedancia. Hay una serie de términos asociados con la sonda coaxial.

Los conectores tipo N, TNC o BNC son para VHF, UHF o frecuencias de microondas más bajas. Los conectores OSM u OSSM se pueden utilizar en todas las frecuencias de microondas. OSSM, OS-50 o conector K son para frecuencias de ondas milimétricas. (Lee, K. F., & Tong, K. F.,2016)

2.4.2 Línea Microstrip

Un parche de microcinta se puede conectar directamente a una línea de transmisión de microcinta, cuando se tiene una impedancia más alta que 50 ohmios en el parche se pueden usar secciones de transformadores de un cuarto de onda para evitar el desajuste de impedancia, permitiendo un acoplamiento de impedancias.

Otro método para igualar la impedancia de la antena es extender la línea de microcinta dentro del parche, como se muestra en la Ilustración 2-6.

Con el enfoque de alimentación de línea de microcinta, se puede diseñar y grabar químicamente una matriz de elementos de parche y sus líneas de división de potencia de microcinta en el mismo sustrato con un costo de fabricación relativamente bajo por elemento.

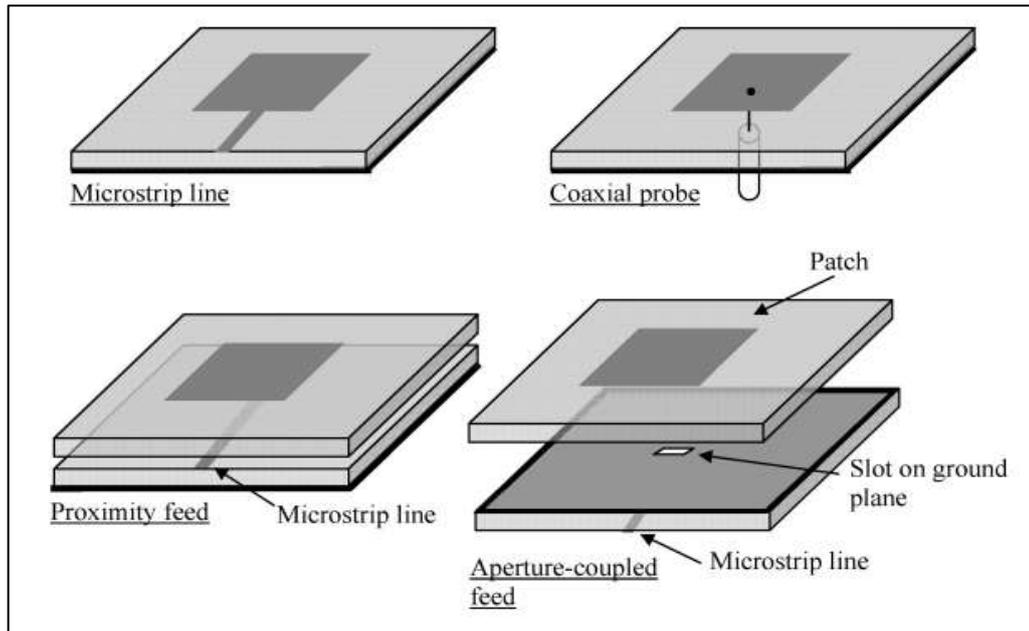


Ilustración 2-6: Métodos de alimentación de antenas parche microstrip

Fuente: Lee, K. F., & Tong, K. F., 2016.

Sin embargo, la radiación de fuga de las líneas de transmisión puede ser lo suficientemente grande como para elevar los niveles de lóbulo lateral o de polarización cruzada de la radiación del conjunto. (Lee, K. F., & Tong, K. F., 2016)

En la Ilustración 2-7 se muestra un ejemplo de cómo una línea microstrip alimenta la antena parche desde el puerto al que se conecta para poder transmitir la potencia.

2.4.3 Línea Microstrip acoplada por proximidad

También se puede usar una línea microstrip de extremo abierto para alimentar una antena de parche a través del acoplamiento de proximidad. Por ejemplo, el extremo abierto de una línea de 100 ohmios se puede colocar debajo del parche en su ubicación de 100 ohmios. También se puede colocar una línea microstrip abierta en paralelo y muy cerca del borde de un parche, para lograr la excitación a través del acoplamiento de campo marginal. Ambos métodos evitan cualquier conexión de soldadura, lo que en algunos casos podría lograr una mayor confiabilidad mecánica. (Lee, K. F., & Tong, K. F., 2016)

2.4.4 Acople de apertura

Se puede colocar una línea microcinta abierta en un lado del plano de tierra para excitar una antena de parche situada en el otro lado a través de una ranura abierta en el plano de tierra, esta técnica

de acoplamiento de ranura o acoplamiento de apertura se puede utilizar para evitar la conexión por soldadura, así como para evitar que la radiación de fuga de la línea interfiera con la radiación del parche. Además, al utilizar un sustrato grueso, este método de alimentación permite que el parche logre un ancho de banda más amplio (>10 %) en comparación con la alimentación de la sonda coaxial. Se obtiene un ancho de banda aún más amplio (alrededor del 20%) si se utiliza una ranura resonante. Cuando dos resonadores (ranura y parche) tienen una resonancia diferente pero muy próxima, se logra un ancho de banda más amplio. La principal desventaja de este método de alimentación es la radiación posterior de la ranura. (Lee, K. F., & Tong, K. F., 2016)

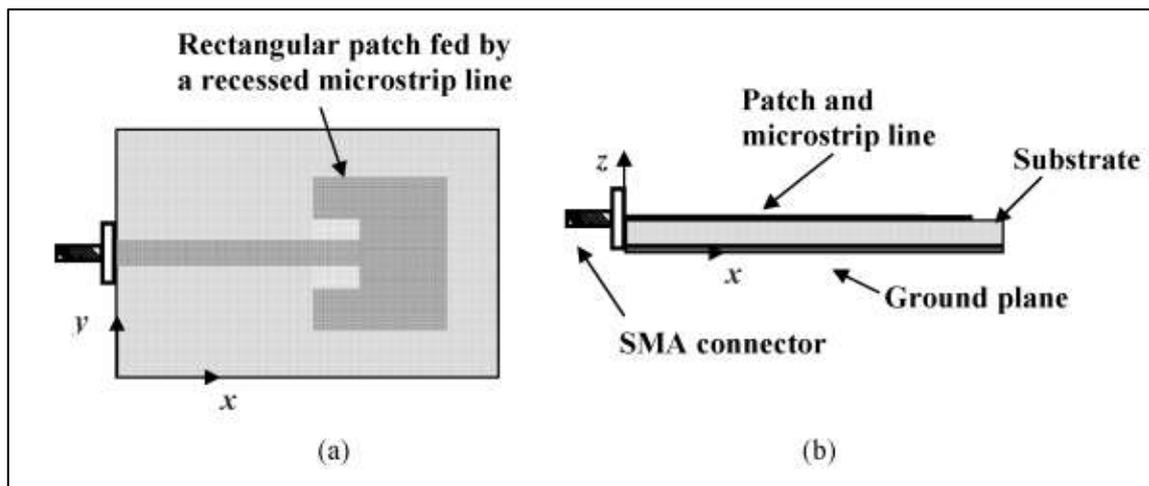


Ilustración 2-7: Geometría de una línea de alimentación microstrip (a) vista superior (b) vista lateral

Fuente: Lee, K. F., & Tong, K. F., 2016.

2.5 Patrones de Radiación

Según BALANIS A. (2016) una antena tiene algunos parámetros, siendo el patrón de radiación un parámetro definido como “una función matemática o representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales, determinado en la región de campo lejano (far-field) y representa un función de las coordenadas direccionales”, y se suele representar en una escala logarítmica, comúnmente en decibeles (dB) lo que suele permitir la acentuación de detalles del patrón que tiene valores muy bajos.

En el patrón de radiación se puede observar lóbulos que son “parte del patrón de radiación limitada por regiones de intensidad de radiación”, teniendo dos tipos de lóbulos, un lóbulo principal o “haz principal” que contiene la “máxima radiación”, por lo general apunta en una

dirección de $\theta = 0$, y los lóbulos “menores” que suelen estar exceptos del lóbulo principal por lo que suele ser de un menor tamaño y adyacentes o posterior al lóbulo principal.

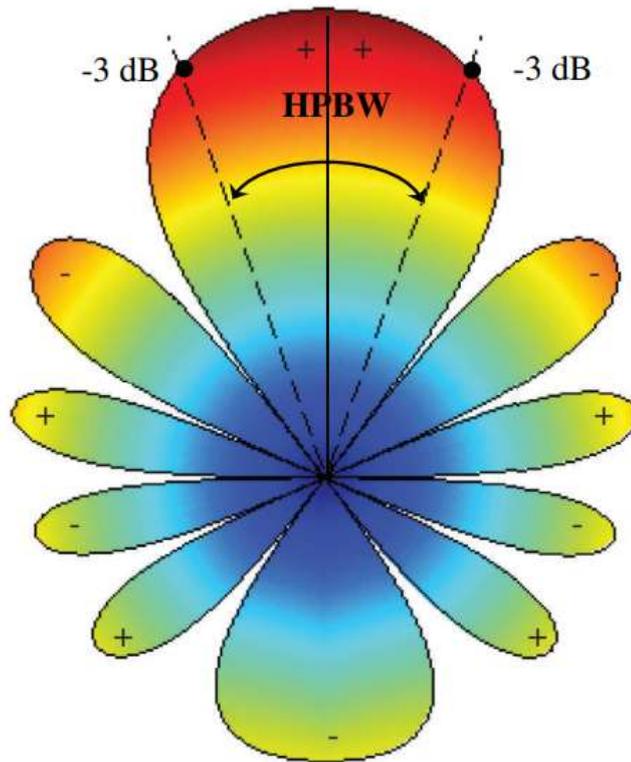


Ilustración 2-8: Patrón de Radiación en dB

Fuente: BALANIS, Constantine A., 2016.

En la Ilustración 2-8 se observa un patrón de radiación donde se observa los diferentes lóbulos, el lóbulo principal que es el más grande estableciendo la dirección de radiación de la antena, el resto de los lóbulos son los lóbulos menores donde los cercanos al lóbulo principal son los lóbulos laterales y el lóbulo que está en sentido contrario al lóbulo principal es el lóbulo posterior.

Hay dos patrones principales, en el plano E se “contiene el vector de campo eléctrico” y el plano H que “contiene el vector de campo magnético”, en ambos campos se puede observar una dirección de máxima radiación, el plano E es el plano de elevación con $\varphi = 0$, mientras que el plano H es el plano azimutal con $\theta = \pi/2$.

2.5.1 Otros parámetros

En un patrón de radiación se puede observar algunos parámetros, siendo los más destacados:

Uno de los parámetros de un patrón es el “*ancho de banda*” que es definido como “la separación angular entre dos puntos idénticos en el lado opuesto del máximo del patrón”, se suele usar el

ángulo que se encuentra en la mitad del valor de la intensidad de radiación, el “Half-Power Beamwidth (HPBW)”, o aquellos en que el patrón se encuentra a -10 dB del máximo del patrón.

La “*ganancia*” es una medida útil que describe el “rendimiento” de la antena, generalmente en la dirección de máxima radiación, definido como “la relación entre la intensidad radiada y la intensidad de potencia aceptada por la antena”.

La “directividad” puede entenderse como la dirección de máxima intensidad de radiación, por lo es considerada como “una relación entre la intensidad de radiación promedio en todas las direcciones y la intensidad de radiación en una dirección determinada”.

La antena puede tener pérdidas que afectan a su “eficiencia”, este parámetro toma en cuenta las pérdidas que pueden ser provocadas por desajustes en la línea de transmisión provocando reflexiones “ e_r ”, pérdidas de conducción “ e_c ” y pérdidas por el dieléctrico “ e_d ”, por lo que la Eficiencia total “ e_0 ” se puede expresar con el coeficiente de reflexión de voltaje “ Γ ”, que a su vez se puede expresar en términos de impedancia de entrada de la antena “ Z_{in} ” y la impedancia de la línea de transmisión “ Z_0 ”, como se indica en la ecuación (1).

$$e_0 = e_r * e_c * e_d = e_r * e_{cd} = e_{cd}(1 - |\Gamma|^2) = e_{cd}\left(1 - \left|\frac{Z_{in}-Z_0}{Z_{in}+Z_0}\right|^2\right) \quad (1)$$

La eficiencia de radiación de la antena “ e_{cd} ” se suele considerar que no tiene pérdidas, por lo que se le suele asignar el valor de 1, y permite relacionar la potencia total radiada “ P_{rad} ” y la potencia de entrada total “ P_{in} ”, como se muestra en la ecuación (2).

$$P_{rad} = e_{cd} * P_{in} \quad (2)$$

2.6 Zonas de Radiación

Una antena se ve rodeada de tres zonas de campo que se dividen en: Campo Cercano reactivo, Campo Cercano radiante (Near-field), Campo Lejano (Far-field). Estas regiones permiten identificar la estructura de campo de cada zona de radiación, pero no suelen tener cambios abruptos en las configuraciones de campo cuando se cruza el límite de un campo a otro, se puede identificar la separación de los campos mediante las ecuaciones (3) y (4), donde λ es la “longitud de onda” y D es la “dimensión” más grande de la antena. (BALANIS, Constantine A.,2016)

$$R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda} \quad (3)$$

$$R_2 = (2 * D^2)/\lambda \quad (4)$$

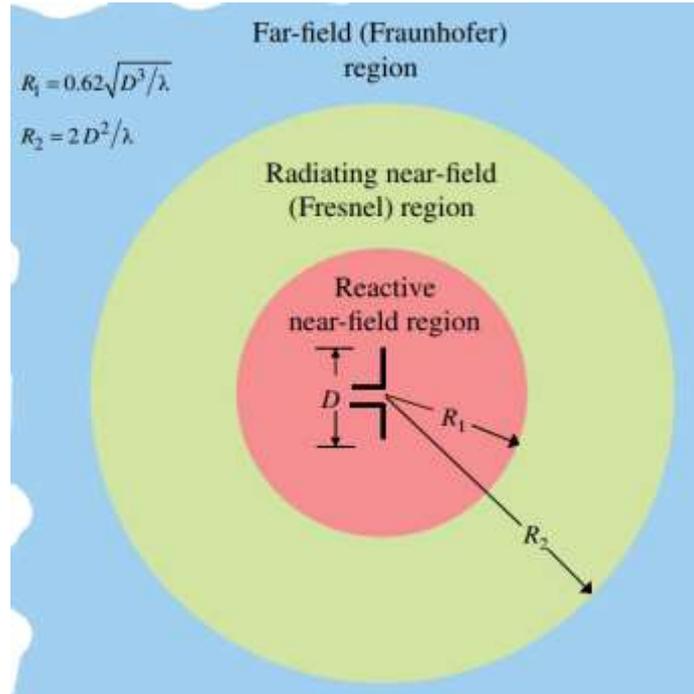


Ilustración 2-9: Campos de radiación de una antena

Fuente: BALANIS, Constantine A., 2016.

2.6.1 Campo Cercano Reactivo

Esta zona de radiación es “la parte del campo cercano que rodea inmediatamente a la antena en la que predomina el campo reactivo”, este campo se limita a una distancia de R_1 de la ecuación (3) y en casos de dipolos muy cortos o radiador equivalente puede limitarse a una distancia de $\lambda/2\pi$. (BALANIS, Constantine A.,2016)

2.6.2 Campo Cercano – Near-field

Esta zona de radiación también llamado “región de Fresnel” se define como “una región del campo de una antena entre la región reactiva del campo cercano reactivo y campo lejano, suelen predominar los campos de radiación y su distribución del campo angular depende de la distancia desde la antena”, esta región puede no existir si la dimensión máxima de la antena es inferior a la longitud de onda. Esta zona se suele limitar entre las distancias de R_1 y R_2 de las ecuaciones (3) y (4). (BALANIS, Constantine A.,2016)

2.6.3 Campo Lejano – Far-Field

Esta zona, también llamada “Fraunhofer”, es “la región donde la distribución del campo angular es independiente de la distancia desde la antena”, si la antena tiene una distancia máxima D esta

zona suele existir a distancias mayores de R_2 de la ecuación (4), en esta zona los componentes del campo son transversales y la distribución angular es independiente de la distancia radial (BALANIS, Constantine A.,2015). En la Ilustración 2-9 se puede apreciar las tres zonas o regiones que tiene una antena, observando la distancia que separa los límites de cada zona a distancia definidas por las ecuaciones (3) y (4).

2.7 Técnicas de adaptación de impedancia para Microstrip

La coincidencia de impedancia es un campo de investigación en casi todos los aspectos de la tecnología, para la transmisión de diferentes tipos de señal es importante que la terminación sea adecuada para reducir los reflejos y preservar la integridad de la señal con un mayor rendimiento de datos absolutos. De no haber un acoplamiento de impedancia en la red de RF provocará que la energía se refleje hacia la fuente desde el punto donde la impedancia se desacopla, generando una reflexión de onda estacionaria, regresando una porción de la energía en lugar de transmitirla a la carga, por lo tanto, habrá menos energía entregada desde la entrada a la carga y las ondas estacionarias pueden dañar y sobrecalentar el dispositivo de RF debido al aumento del nivel de potencia máxima. Con un acoplamiento adecuado se puede reducir el error de amplitud y fase, la reducción de la pérdida de potencia y mejorar la relación señal/ruido.

La adaptación de impedancia es un paso desafiante en el diseño de una antena para lograr parámetros de rendimiento óptimos como pérdida de retorno, eficiencia, ganancia, entre otros, ayudando a sintonizar la frecuencia de la antena de una manera mucho más fácil y rápida que modificar la geometría de la antena. Otro punto que se ve beneficiado es el ancho de banda de la antena porque los circuitos de adaptación de impedancia agregan algunas resonancias adicionales. (Sharma, S., Tripathi, C. C., & Rishi, R., 2017)

2.7.1 Transformador de un cuarto de onda

La antena de parche microstrip se puede combinar con la línea de alimentación ($Z_0 \Omega$) mediante el uso de una “línea de transmisión de un cuarto de longitud de onda” (l_1) como se muestra en la Ilustración 2-10.

El objetivo de agregar un transformador de cuarto de onda es hacer coincidir la “impedancia de entrada” de la antena Z_a exactamente con la “impedancia de la línea de alimentación” (Z_0). La “impedancia de entrada” al comienzo de la línea de un cuarto de longitud de onda viene dada por la ecuación (5), donde “ Z_q ” es la impedancia de del transformador de cuarto de onda.

$$Z_{in} = Z_0 = \frac{Z_q^2}{Z_a} \quad (5)$$

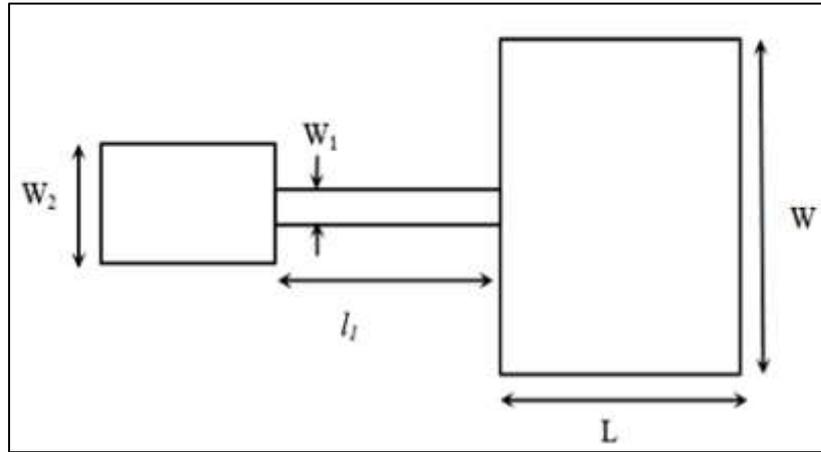


Ilustración 2-10: Transformador de cuarto de onda

Fuente: Sharma, S., Tripathi, C. C., & Rishi, R., 2017

Calculando la impedancia del transformador de cuarto de onda “ Z_q ” tal que $Z_{in} = Z_0$ la impedancia de entrada “ Z_{in} ” se puede adaptar a una frecuencia de funcionamiento particular. La impedancia del transformador de cuarto de onda “ Z_q ” inversamente proporcional al ancho W_1 de la tira. La impedancia de entrada de la antena se aproxima mediante la ecuación (6), haciendo de la longitud de onda “ λ_0 ” y el ancho “ W ” de la antena, la ecuación (7) hace uso de las dimensiones “ L ” y “ W ” y la constante dieléctrica “ ϵ_r ”, y para el cálculo de la impedancia del transformador de lambda cuartos, considerando que la línea de alimentación “ Z_0 ” tiene un valor de 50 ohm se puede usar la ecuación (8). (Sharma, S., Tripathi, C. C., & Rishi, R., 2017)

El ancho del transformador de cuarto de onda se puede calcular usando el valor Z_q en la ecuación (9), de la cual se despeja el ancho “ W_1 ”.

$$Z_a = \frac{45 \cdot \lambda_0^2}{W^2} \quad (6)$$

$$Z_a = \frac{90 \cdot \epsilon_r^2}{\epsilon_r - 1} \left(\frac{L}{W} \right)^2 \quad (7)$$

$$Z_q = \sqrt{50 \cdot Z_a} \quad (8)$$

$$Z_q = \left(\frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) \ln \left(\frac{8d}{w_1} + \frac{w_1}{4d} \right) \quad (9)$$

Y la longitud de transformador de cuarto de onda se calcula con: $L1 = \frac{\lambda_g}{4\epsilon_{re}}$

2.7.2 Transformador multisección

El método de transformador multisección se utiliza para diseñar redes de adaptación de banda ancha. El transformador multisección utiliza más de un transformador de cuarto de onda y, dependiendo de la respuesta en la región de operación, se puede dividir en dos tipos. (Sharma, S., Tripathi, C. C., & Rishi, R., 2017)

La Ilustración 2-11 muestra como tres secciones de $\lambda/4$ se acoplan para que la impedancia Z_1 se acople, donde cada acople tendrá una impedancia que permita que entre todas las secciones se acoplen.

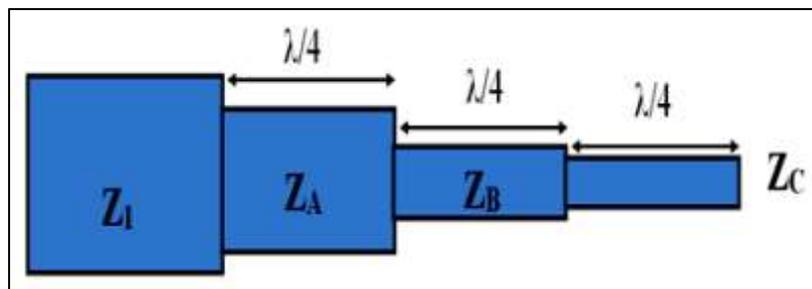


Ilustración 2-11: Transformador de onda multisección de 3 secciones

Fuente: Sharma, S., Tripathi, C. C., & Rishi, R., 2017

2.7.3 Transformador multisección tipo Chebyshev

Un transformador multisección Chebyshev ofrece anchos de banda más grandes en comparación con un transformador binomial multisección para el mismo número de secciones. Pero el incremento en el ancho de banda del transformador Chebyshev es a costa de una mayor ondulación en la banda operativa. Podemos determinar polinomios de Chebyshev de orden superior utilizando la fórmula recursiva de la ecuación (10). (Sharma, S., Tripathi, C. C., & Rishi, R., 2017)

$$T_{nx} = 2xT_{(n-1)}(x) - T_{n-2}(x) \quad (10)$$

Primero hay que determinar el valor requerido de N secciones para cumplir con los requisitos de ancho de banda y ondulación, después se determina la función de Chebyshev con la ecuación (11) donde "A" es la amplitud del coeficiente y "N" la cantidad de secciones.

$$\Gamma(\theta) = A * e^{(-j*N*\theta)} T_n(\text{Cos}(\theta)\text{Sec}(\theta_m)) \quad (11)$$

$$\Gamma_m = A = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} * \frac{1}{T_N * \text{sec}(\theta_m)} \quad (12)$$

$$\sec(\theta_m) = \cosh \left[\frac{1}{N} \cosh^{-1} \left(\frac{1}{2\Gamma_m} \left| \frac{Z_L}{Z_0} \right| \right) \right] \quad (13)$$

Con la ecuación (12) se determina el plano máximo Γ_m , la cual se expresa con las impedancias de la línea de transmisión “ Z_0 ” y de la antena o carga “ Z_L ”, y la ecuación (13) indica como calcular el valor de $\sec(\theta_m)$ conociendo el valor de Γ_m .

El transformador es simétrico: $\Gamma_0 = \Gamma_n$ y $\Gamma_1 = \Gamma_{(n-1)}$

Por lo que la ecuación (14) muestra una sintaxis general para el cálculo de los coeficientes de reflexión de las secciones, donde el valor de $G(\theta)$ se obtiene de la ecuación (15), ambas ecuaciones dependen de la cantidad de secciones “ N ”. La ecuación (16) se puede usar para el cálculo de las impedancias, despejando “ Z_{n+1} ”.

$$\Gamma(\theta) = 2e^{-jN\theta} [\Gamma_0 \cos(N\theta) + \Gamma_1 \cos((N-2)\theta) + \Gamma_n \cos((N-2n)\theta) + G(\theta)] \quad (14)$$

$$G(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{\Gamma_N}{Z_n} & \text{para } N \text{ par} \\ \frac{\Gamma_{N+1}}{Z_n} \cos(\theta) & \text{para } N \text{ impar} \end{cases} \quad (15)$$

$$\Gamma(\theta) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{Z_{N+1}}{Z_n} \right) \quad (16)$$

Longitud de la sección: $l = \frac{\lambda_0}{4}$

2.7.4 Transformador multisección tipo binomial

Este tipo de transformador permite una aproximación del coeficiente de reflexión para la sección N . El transformador de adaptación de tipo binomial se escribe de acuerdo con la serie binomial como se indica en la ecuación (17).

Donde A es la amplitud del coeficiente y C_n es el “coeficiente binomial” que se puede calcular usando la ecuación (18) y los coeficientes de reflexión se pueden calcular usando la ecuación (19) la cual se puede expresar igual a la ecuación (16).

$$\Gamma(\beta l) = A(1 + e^{-2j\beta l})^N = A \sum_{n=0}^N C_n^N e^{-j2n\beta l} \quad (17)$$

$$C_n^N = \frac{N!}{(N-n)!n!} \quad (18)$$

$$\Gamma_n = \frac{Z_{n+1} - Z_n}{Z_{n+1} + Z_n} \approx \frac{1}{2} \ln \left(\frac{Z_{n+1}}{Z_n} \right) \quad (19)$$

En la práctica un transformador de 2 o 3 secciones es suficiente, por lo que no hay necesidad de diseñar más secciones N. (Sharma, S., Tripathi, C. C., & Rishi, R., 2017)

2.8 Método parche rectangular

El parche rectangular es una de las configuraciones más utilizadas ya que es fácil de analizar y con técnicas de arreglos se puede aumentar la ganancia de la antena y con una técnica de parche combinada se puede aumentar el ancho de banda de la antena (Firdausi, A., Damayanti, L., Hakim, G. P. N., Umairah, U., & Alaydrus, M., 2021).

La ecuación (20) calcula el ancho geométrico “ W ” donde “ c ” es la velocidad de la luz, “ f ” la frecuencia que utiliza la antena y constante dieléctrica “ ϵ_r ”; la ecuación (21) calcula la constante dieléctrica efectiva “ ϵ_{reff} ” donde “ h ” es el ancho del dieléctrico.

La ecuación (22) sirve para calcular la longitud adicional del parche “ ΔL ” provocado por el campo marginal al final de la estructura; la ecuación (23) facilita el cálculo de la longitud geométrica; la ecuación (24) calcula la distancia “ d ” que se debe tener para separar las antenas cuando se hace un arreglo de antenas.

Estas ecuaciones se pueden usar para el diseño de antenas microstrip de parche rectangular.

$$W = \frac{c}{2f\sqrt{\frac{\epsilon_r+1}{2}}} \quad (20)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r+1}{2} + \frac{\epsilon_r-1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1+\frac{12h}{W}}} \right) \quad (21)$$

$$\Delta L = \left[0.412h \left(\frac{(\epsilon_{reff}+0.3)\left(\frac{W}{h}+0.264\right)}{(\epsilon_{reff}-0.258)\left(\frac{W}{h}+0.8\right)} \right) \right] h \quad (22)$$

$$L = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (23)$$

$$d = \frac{c}{2*f_r} = \frac{3x10^8}{2*f_c*10^9} \quad (24)$$

2.9 Antena Log-periodic

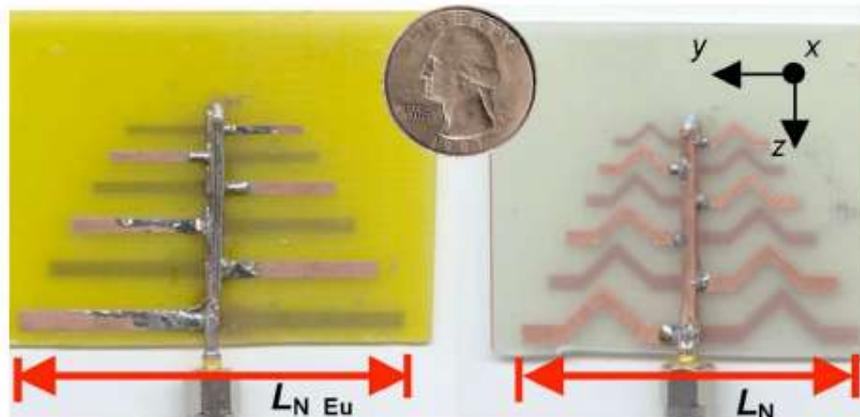


Ilustración 2-12: Ejemplo de diseño de antenas log-periódicas

Fuente: ANAGNOSTOU, Dimitris E., 2008

Este tipo de antenas son muy utilizadas en aplicaciones de comunicación HF, TV UHF, mediciones EMC, donde se debe considerar un espacio físico pequeño y de bajo peso, son capaces de proporcionar ganancia y directividad con una relación de polarización cruzada baja junto con un ancho de banda amplio al componerse de elementos radiantes euclidianos, estos elementos se reducen progresivamente de tamaño desde la parte posterior hacia el frente, teniendo un espaciado entre los elementos que disminuye hacia el frente de la matriz, donde se encuentran los elementos más pequeños, teniendo características que se mantienen de forma casi constante y de alta ganancia en frecuencia dentro de la banda de operación, por lo que se les suele utilizar en aplicaciones de detección de señales. (ELECTRONICSNOTES)

La Ilustración 2-12 muestra dos antenas log-periodic que son más grandes que la moneda con la que se le compara, la primera es una antena que usa dipolos para formar la antena, haciendo uso de los dos lados del sustrato sobre el que se implementó la antena, la segunda antena es similar, pero con la diferencia que está ya no usa dipolos rectos.

2.10 Antenas 5G

Las comunicaciones inalámbricas 5G tienen retos de demanda para múltiples usuarios y ancho de banda, por lo que las antenas para estas comunicaciones deben tener la capacidad para comunicarse con los UE y estas antenas denominadas MIMO permiten que cada usuario tenga un canal, reduciendo la interferencia entre los usuarios para garantizar una alta tasa de datos, baja latencia, eficiencia energética y alto rendimiento. Pero la fabricación de la antena tiene retos

debido a la reducción de las dimensiones de la antenna a altas frecuencias por lo que es más complicado diseñar una antenna de alta ganancia.

Un ejemplo del desarrollo de las antenas para aplicaciones de 5G es la antenna MIMO desarrollado por Ravi Kiran, Slyusar Vadym y Kumar Jayendra (2022), trabajo donde se puede observar las dimensiones de los parámetros, donde realizan una antenna que opera en la frecuencia de 28,12 GHz que usa cuatro celdas Split-Ring-Resonador (RSS) que se comportan como un circuito resonante LC paralelo, teniendo una mejora significativa en el ancho de banda y la ganancia para garantizar una alta velocidad de transmisión de datos y una baja latencia.

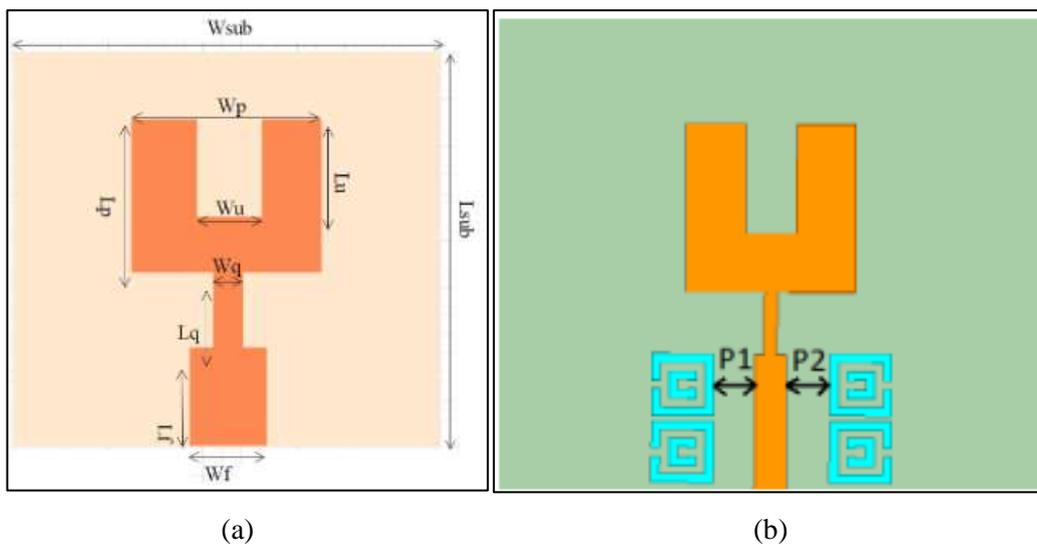


Ilustración 2-13: Diseño de la configuración de la antenna: (a) sin SRR, (b) con SRR

Fuente: Ravi Kiran, Slyusar Vadym y Kumar Jayendra, 2022

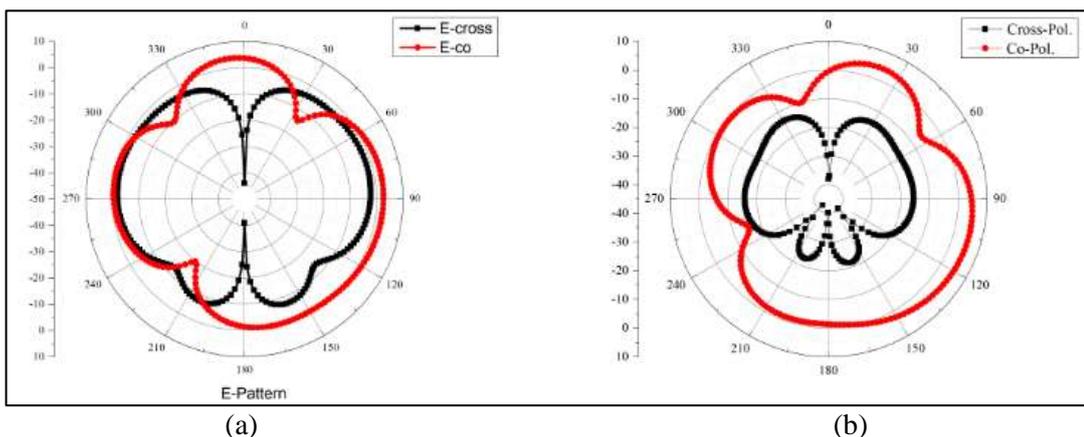


Ilustración 2-14: Patrón de radiación de la antenna a 28.12 GHz (a) Sin SRR (b) Con SRR

Fuente: Ravi, Kiran; Slyusar, Vadym; Kumar, Jayendra, 2022

Como se observa en la Ilustración 2-13, se presenta dos antenas para operar a altas frecuencias que son la misma, la diferencia es que la segunda incorpora los RSS, y la Ilustración 2-14 muestra como los RSS modifican al patrón de radiación de la misma antena.



Ilustración 2-15: Antena dipolo doblada ranurada

Fuente: Deepthi, John, 2022

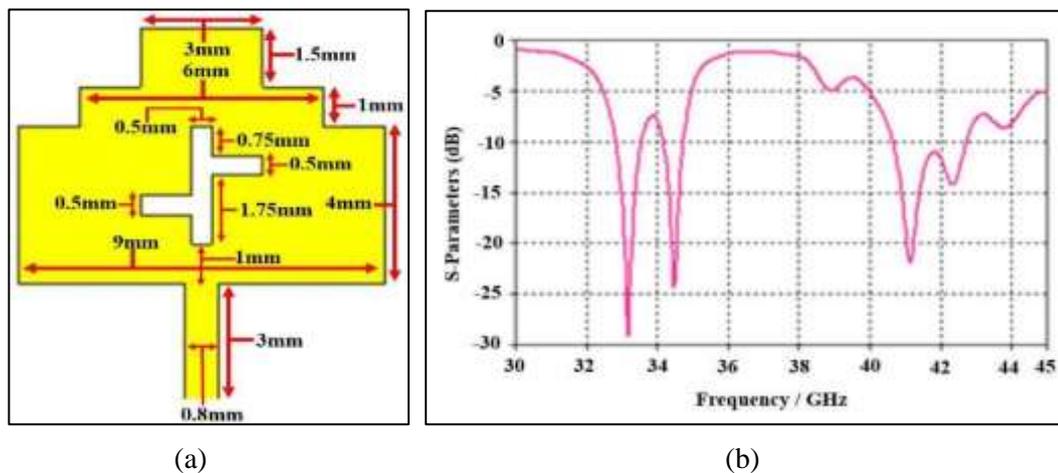
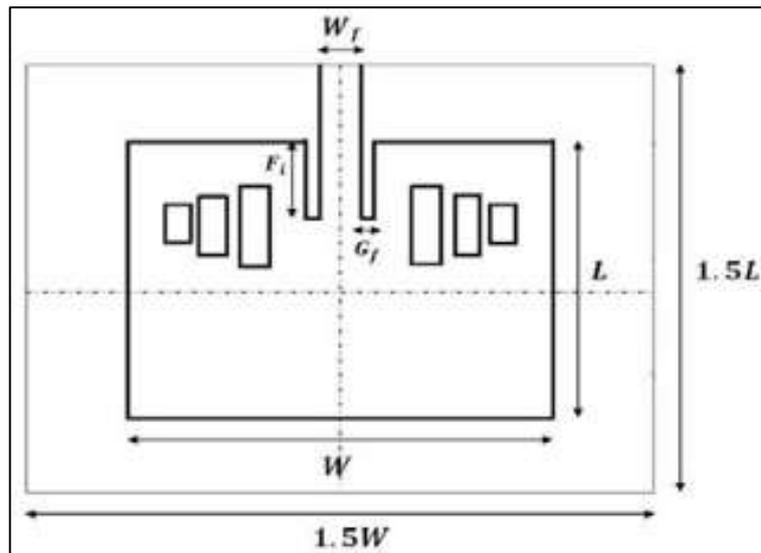


Ilustración 2-16: (a) Antena ranurada (b) Comportamiento multibanda de los parámetros S

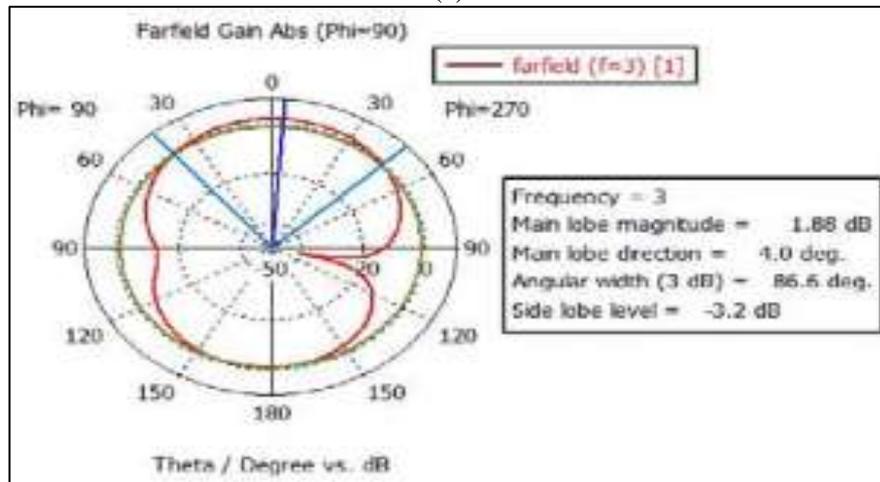
Fuente: Shareef, Oras, 2022

Las nuevas tecnologías de comunicación 5G beneficiaran muchas industrias como la atención médica, sector donde también se está experimentando con antenas flexibles a partir de materiales textiles conductivos para el diseño de la antena, pero que también tienen un largo camino que recorrer ya que el desgaste producido por la flexión, estiramiento, entre otras situaciones que provoca un desgaste al rendimiento de la antena puede generar cambios en el patrones de

radiación y ganancia, la frecuencia de resonancia, sin olvidar que se debe considerar la ubicación de la antenna en el cuerpo, pues la variación de la superficie curva varia la ganancia, afectando el rendimiento, por lo que se tiene que optimizar la flexión de la antenna para que la frecuencia de resonancia, la ganancia y el resto de parámetros tengan un impacto insignificante en el rendimiento, la antenna que se muestra en la Ilustración 2-15 es un ejemplo de los avances que se van realizando para lograr la flexibilidad de las antenas para adaptarse a diferentes industrias. Aunque estas antenas deben tener cuidado con los límites de la Tasa de Absorción Especifica (SAR) por seguridad en las redes WBAN. (Deepthi Mariam John, et al. 2022)



(a)



(b)

Ilustración 2-17:(a) Estructura de Parche ranurado y (b) Patrón de Radiación de campo lejano

Fuente: Swarna, Sadiya, 2019

Otra antena se conforma de un parche en forma de escalera de espejos para que aumente la probabilidad de la antena muestre resonancias múltiples adyacentes, véase la Ilustración 2-16, además de que se agregó una ranura vertical que es intersecada por dos líneas horizontales en el medio de la estructura para proporcionar una mejor coincidencia de impedancia con la impedancia de referencia de 50 ohms, teniendo una dimensión de 10x10 mm, operando en un rango de frecuencias de 30 a 45 GHz con un ancho de banda aceptable. (Shareef Oras Ahmed, et al. 2022)

Como se observa en el ejemplo de la Ilustración 2-17, la inserción de ranuras provoca que la antena tenga varias respuestas en diferentes frecuencias, otro ejemplo de antenas con ranuras que opera a altas frecuencias superiores a 30 GHz, teniendo un patrón de radiación hemisférico teórico, siendo bidireccional y simétrico que es más adecuada para WLAN, teniendo una magnitud del lóbulo principal de 1,89 dB y con un VSWR de 1,5 en el rango de banda de 2,8 a 4,6 GHz. (Swarna Sadiya Afrin, et al. 2019)

La antena de la Ilustración 2-17 (a) del documento de Swarna (2019) que opera a 3GHz y en el patrón de radiación se observa algunos datos relacionados al lóbulo de radiación, otro ejemplo de las antenas 5G es la antena que se presenta en el documento de Muttair Karrar (2021) que diseña una antena MIMO de 4 puertos, otro modelo de antena es una semicircular que opera en el rango de 3GHz a 11.5 GHz que se realiza por Usman Mushammad (2019)

2.11 Normas de testeo

La norma TS 138 141-1 o TS 38.141-1, que es la versión más actualizada, que contiene Especificaciones técnicas de la Estación Base o “Base Station (BS)”, en esta norma se especifica tres tipos de estaciones, las de tipo 1-C, tipo 1-H y tipo 1-O o tipo 2-O, donde cada uno de estos tipos se diferencia por la cantidad de dispositivos que pueden conectarse, donde la estación tipo 1-C permite conectar una antena final que se conecta a los equipos por medio de puertos, mientras que el resto de los tipos de estaciones bases se caracterizan por conectar arreglos de antenas. Los requerimientos de las BS para conectores multibanda se especifican en algunas cláusulas.

La cláusula 6 especifica las características de las estaciones de transmisión donde se da a conocer los requerimientos mínimos de las estaciones tipo 1-C y 1-H, los requerimientos regionales, las potencias para diferentes modulaciones, la calidad de la señal e intermodulación.

La cláusula 7 también se especifica para BS receptoras tipo 1-C y 1-H, que especifica los requerimientos de las estaciones para la recepción de la señal, considerando diferentes canales

con determinados anchos de banda y subportadoras para determinar el nivel de potencia de sensibilidad de la estación, como el de la Tabla 2-3.

2.11.1 Estación Base tipo 1-C para pruebas

Este tipo de estación base permite conectar la antena al transmisor o receptor mediante un conector determinado como puerto A, considerando esta configuración para condiciones normales de funcionamiento, también es posible utilizar aparatos externos como amplificadores, filtros o la combinación de estos dispositivos. (3GPP TS 38.104, 2022)

La estación base tipo-c se compone de la estación base a la que se conectara por medio del puerto A los equipos externos como amplificadores de señal, filtros y otro tipo de elementos para tratar la señal, en caso de que se los vaya a usar, para después conectar la antena al puerto B o se puede conectar la antena directamente al puerto A, esto se aplica tanto en la estación transmisora como se muestra en la Ilustración 2-18, o para una estación receptora como se ilustra en la Ilustración 2-19.

Tabla 2-2: Límites de potencia nominal de salida de la estación base tipo 1-C

Clase BS	<i>Prated, c, AC</i>
BS de área amplia	(Nota)
BS Rango Medio	≤ 38 dBm
BS Área local	≤ 24 dBm
NOTA: No existe un límite superior para la potencia de salida nominal de la estación base de área amplia.	

Fuente: 3GPP TS 38.104. V17.7.0, 2022

Realizado por: Bonilla, M., 2023

Tabla 2-3: Niveles de sensibilidad de referencia de BS de área local de NR

Ancho de banda del canal BS (MHz)	Espaciamiento de subportadoras (kHz)	Nivel de potencia de sensibilidad de referencia, P_{REFSENS} (dBm)
5, 10, 15	15	-93.7
		-93.7
10, 15	30	-93.8
10, 15	60	-90.9
20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	15	-87.3
		-87.3
20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100	30	-87.6
20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100	60	-87.7

Fuente: 3GPP TS 38.104. V17.7.0, 2022

Realizado por: Bonilla, M., 2023

Para la transmisión en este tipo de estación se especifican los valores de salida de potencia que se observa en la tabla 2-2, en donde se especifican los valores de potencia de transmisión según el área que se desee cubrir.

La 3GPP sugiere que la estación receptora use los niveles de sensibilidad que se presentan en la tabla 2-3, donde se especifican los parámetros a tener en cuenta para ajustar la sensibilidad del equipo receptor.

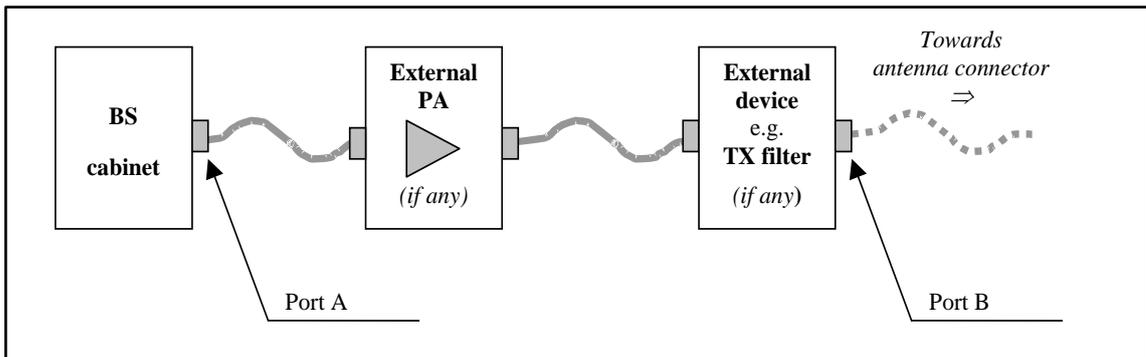


Ilustración 2-18: Interfaz de la estación base transmisora tipo 1-C

Fuente: 3GPP TS 38.104. V17.7.0, 2022

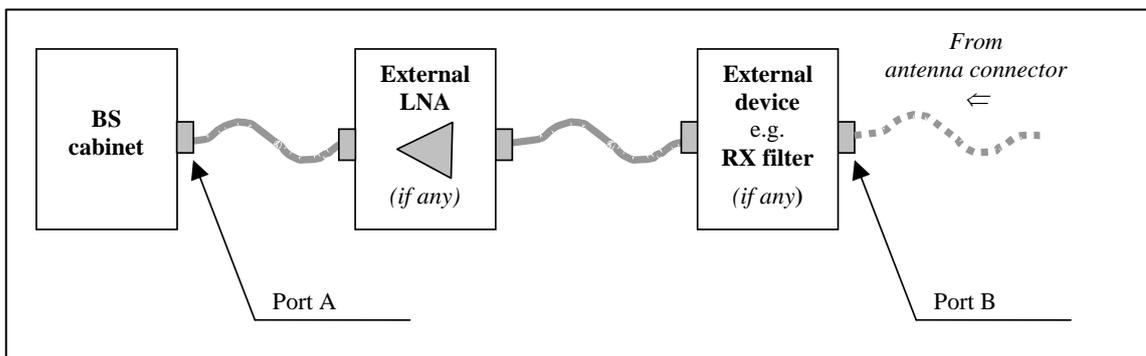


Ilustración 2-19: Interfaz de la estación base receptora tipo 1-C

Fuente: 3GPP TS 38.104. V17.7.0, 2022

CAPÍTULO III

3 MARCO METODOLÓGICO

3.1 Descripción de los procesos

Para la realización de este trabajo se comienza con la recopilación de información de información referente a las antenas microstrip y de la tecnología 5G para proceder al diseño de la antena mediante el software ANSYS HFSS para probar diferentes diseños buscando que la antena tenga un ancho de banda mayor a 8 dB como mínimo para cubrir el rango de frecuencias de 3.3 a 3.6 GHz.

Una vez se tenga el diseño se procederá a implementarlo en FR4 para proceder hacer medidas en los equipos de medición del laboratorio de microondas.

3.2 Metodologías

Para este trabajo se utilizará dos metodologías, de investigación y experimentación para el diseño de la antena, para su posterior implementación y realización de las pruebas.

3.2.1 Metodología de investigación

Se reviso una investigación mediante textos publicados para revisar toda la información disponible desde conocimientos básicos hasta lo más específico a tener en cuenta, para poder revisar documentos de investigación referentes a las antenas y publicaciones referentes que se puede encontrar mediante el navegador de Google School, y publicaciones que se pueden encontrar en la web de SearchGate para leer varios documentos de investigación que se han realizado por profesionales para poder tener una orientación de que podría ser lo más adecuado para el desarrollo de la antena.

3.2.2 Metodología de Experimentación

Para el diseño de la antena se usó el software de Ansys HFSS mediante la versión de estudiante gratuita que tiene a disposición en la web de Ansys, con este software se experimentó el diseño de la antena desde un simple modelo de una antena Patch rectangular, después con un diseño de una antena triangular para después probar con un diseño de antena log-periódica. En cada diseño de la antena se realizaron simulaciones para tratar de comprobar que la antena opere en el rango de frecuencia especificado de 3,3 a 3,6 GHz, buscando cubrir ese rango de frecuencias y tener

una ganancia considerable, claro que hay que considerar que se está haciendo un diseño para implementar en FR4. A continuación se coloca los diseños realizados para ir observando cómo reaccionan para ver cuál sería la mejor opción, entre cada diseño se realizaron varias intentos para que cada antenna se acerque lo más posible a la frecuencia central de 3.45 GHz para ver como la ganancia y el ancho de banda reaccionan en a medida que se acercan o se va a modificando la antenna para que se aproxime a esa frecuencia.

3.3 Requerimientos de la antenna

Para el diseño de la antenna se establecerá los siguientes requerimientos que se observan en la tabla 3-1, como la antenna será implementada en una baquelita de FR4 cuyos parámetros se observa en la tabla 3-2.

Tabla 3-1: Requerimientos de la antenna

Requerimiento	Valor
Fc	3.45 GHz
Ancho de Banda	0.3 GHz
Ganancia	-10 dB

Realizado por: Bonilla, M., 2023

Tabla 3-2: Parámetros de FR4

Parámetro	Valor
Espesor	1.5 mm
Permitividad Relativa	4.4
Dielectric Loss Tangent	0.02

Realizado por: Bonilla, M., 2023

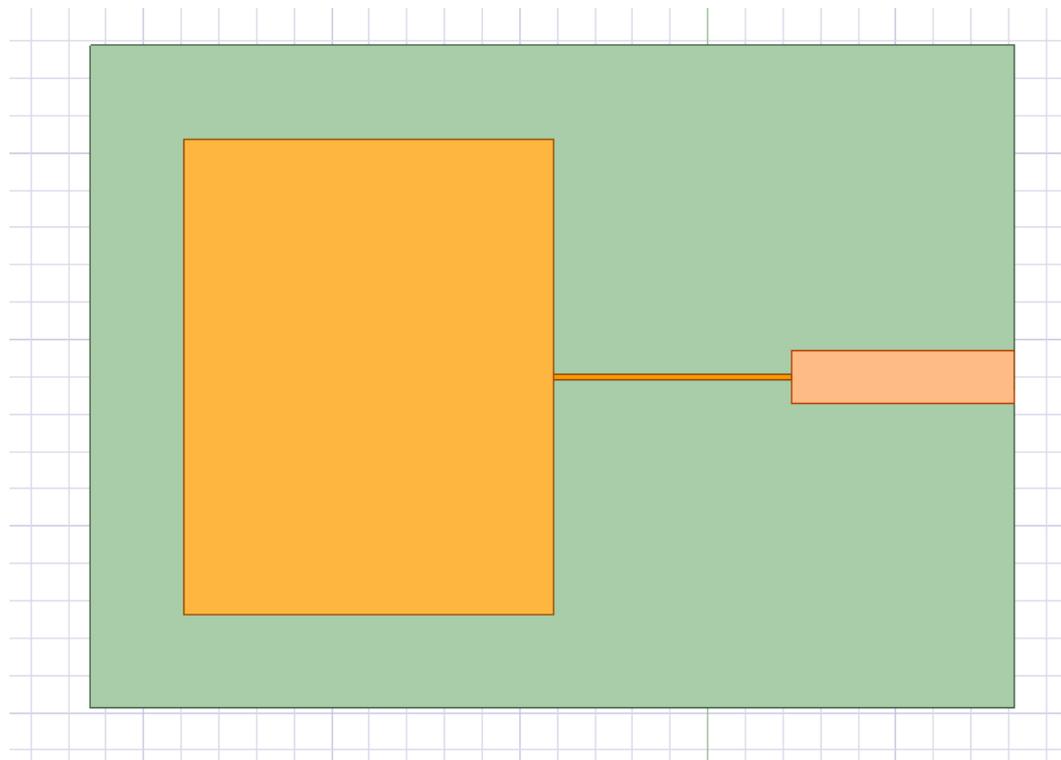
3.4 Propuestas de diseño

3.4.1 Primera propuesta

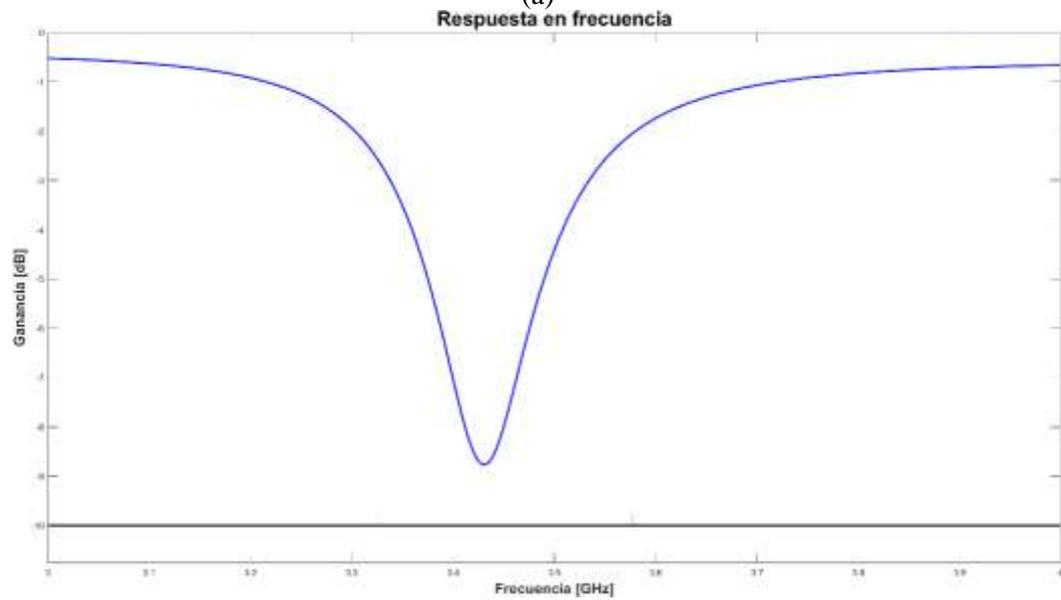
Para el desarrollo de la antenna se empezó probando con una antenna de parche rectangular, como se observa en la Ilustración 3-1 (a), usando un acoplador de $\lambda/4$ para conectarse a una línea de 50Ω para conectar mediante el conector SMA, esta antenna acercarse a la frecuencia de operación como se observa en la Ilustración 3-1 (b), con una frecuencia central de 3.43 GHz, pero que no tiene una ganancia muy alta, apenas de -8.7 dB, por lo que no cumple con uno de los requisitos para la antenna al no sobrepasar los -10 dB que se esperaba para la antenna.

También se observa los patrones de radiación de la antenna, donde la Ilustración 3-2 (a) muestra el plano-E el cual tiene una dirección fija a donde apunta la antenna, por lo que tendría una directividad que cubriría casi los 180° que estarían frente a la antenna, pero en el plano-H como se

observa en la Ilustración 3-2 (b) se observa una distribución irregular del campo de modo que la antena no tendría una radiación igual.



(a)



(b)

Ilustración 3-1: (a) Primera propuesta de la antena - patch rectangular (b) Respuesta en frecuencia del primer diseño de la antena

Realizado por: Bonilla, M., 2023

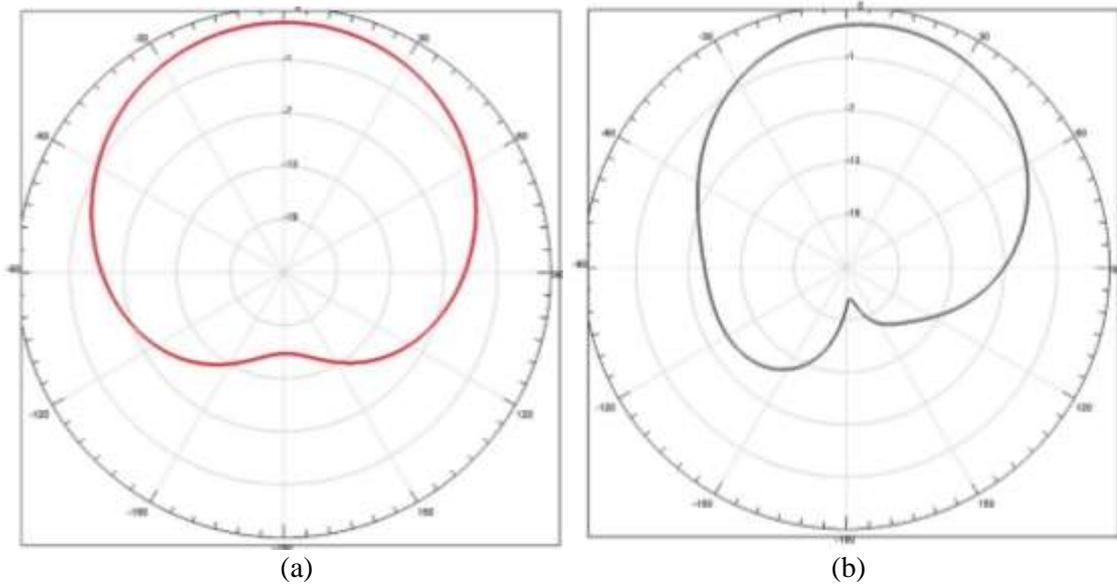
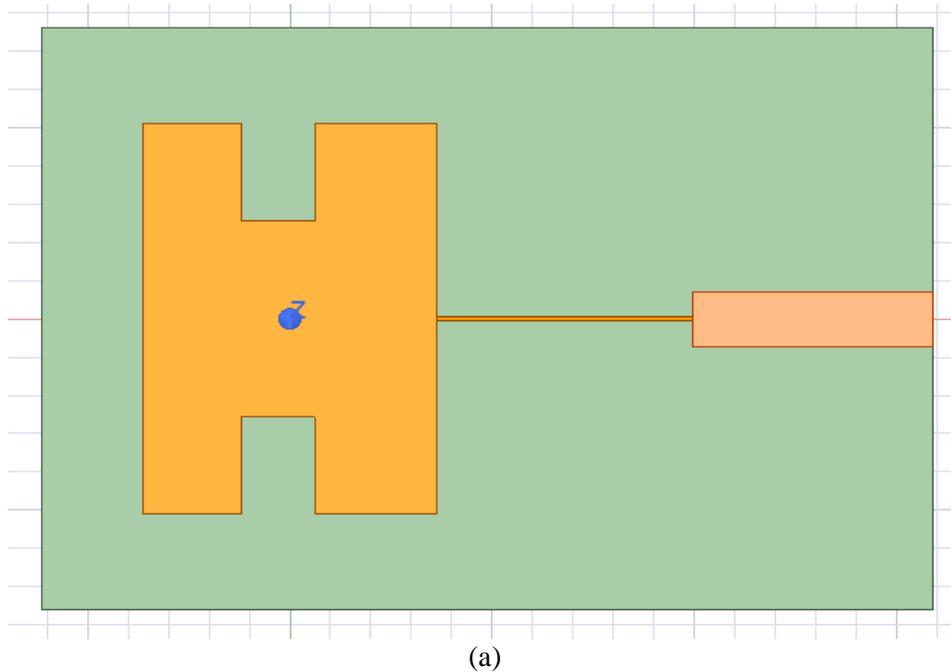


Ilustración 3-2: Patrones de Radiación de la antena rectangular (a) Plano-E (b) Plano-H

Realizado por: Bonilla, M., 2023

3.4.2 Segunda propuesta

A partir de la primera propuesta se procede a realizar unos cortes a los lados de la antena, como se observa en la Ilustración 3-3, con este cambio se logra tener una mejor ganancia, la cual logra superar los -10 dB, alcanzando aproximadamente -12.23 dB, teniendo un ancho de banda que van desde los 3.434 GHz a los 3.468 GHz, dando un ancho de banda de 34 MHz.



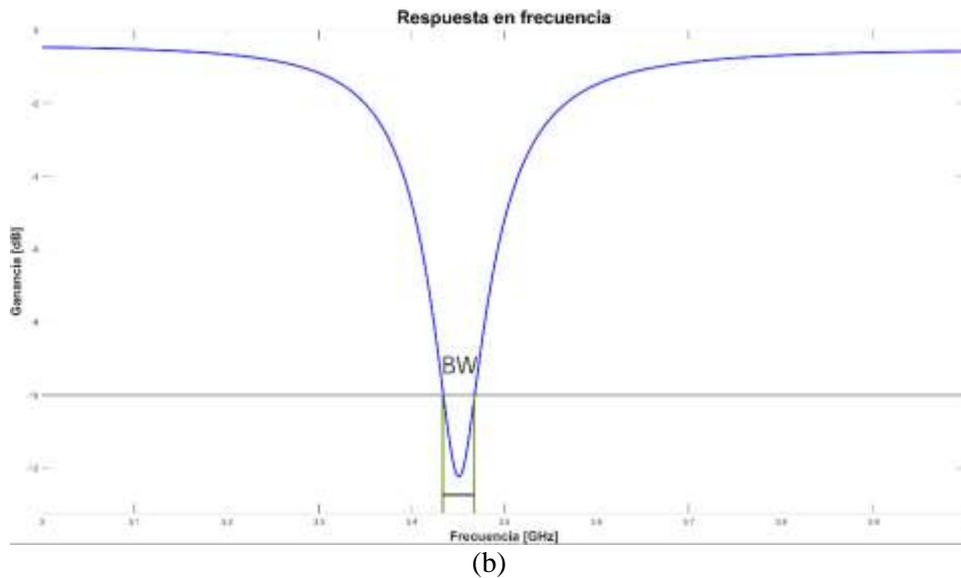


Ilustración 3-3: (a) Segunda propuesta de la antena (b) Respuesta en frecuencia de la segunda propuesta

Realizado por: Bonilla, M., 2023

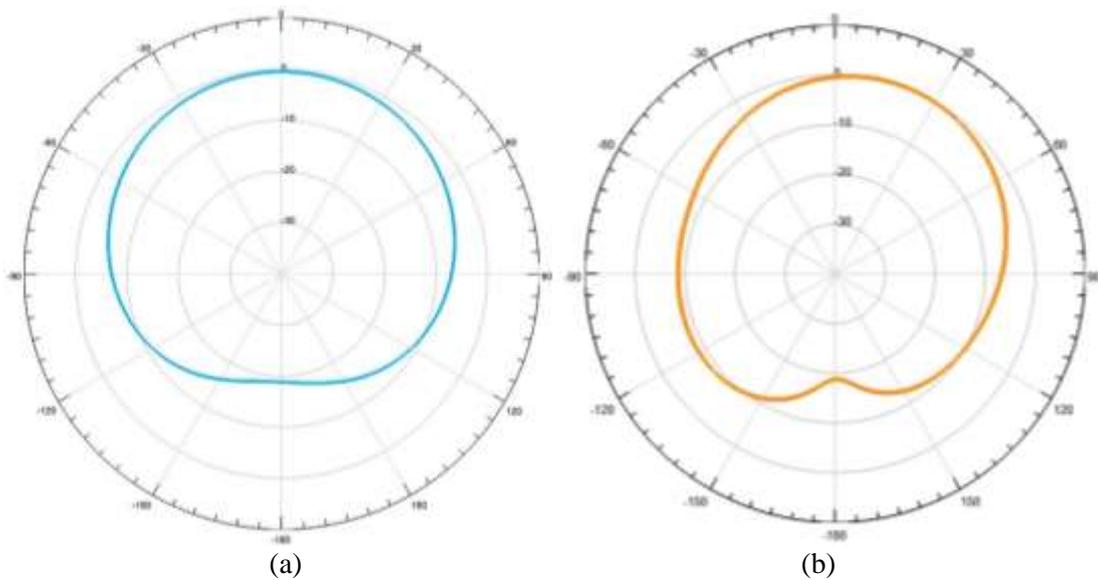
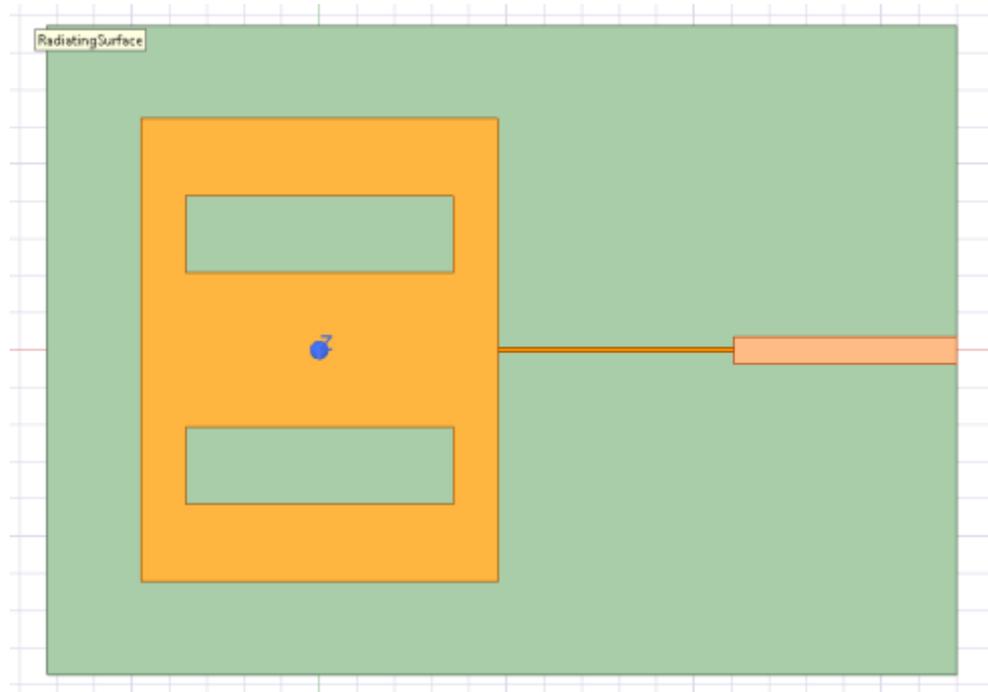


Ilustración 3-4: Patrones de Radiación de la segunda propuesta (a) Plano-E (b) Plano-H

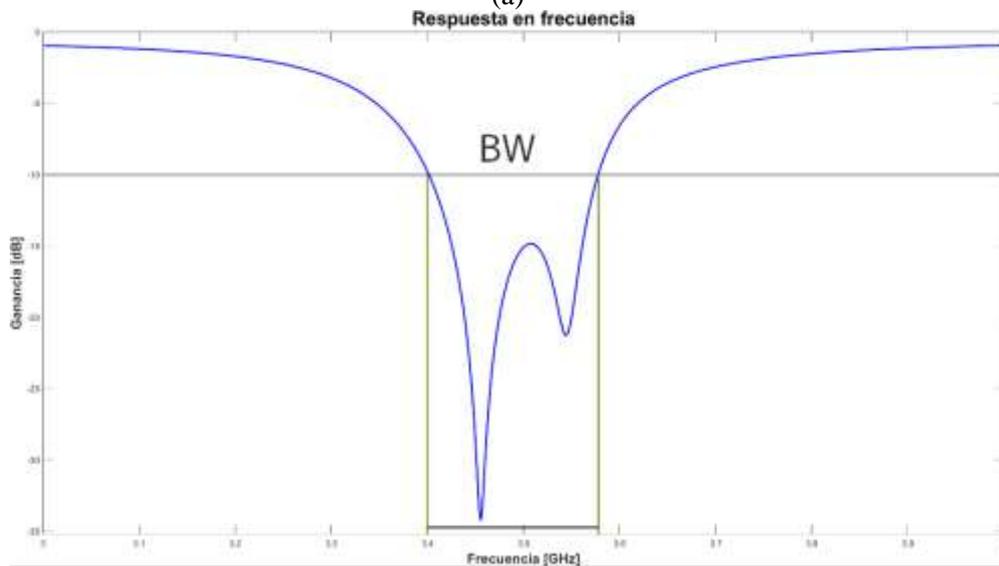
Realizado por: Bonilla, M., 2023

Aunque esta vez la antena logro superar la ganancia en comparación a la primera propuesta tiene un ancho de banda pequeño en comparación a lo que se desea alcanzar, por lo que esta propuesta también se descarta. Por último, en la Ilustración 3-4 se observa los patrones de radiación que tiene esta antena al usar la misma base de la primera propuesta la similitud de los patrones no es para nada extraño.

3.4.3 Tercera propuesta



(a)



(b)

Ilustración 3-5: (a) Tercera propuesta de la antena (b) Respuesta en frecuencia de la tercera propuesta

Realizado por: Bonilla, M., 2023

En esta propuesta, que surge a partir de la primera, se realizan dos cortes o gaps como se observa en la Ilustración 3-5, en este diseño se logró obtener una ganancia de -34.24 dB y logra tener un ancho de banda más amplio que va desde los 3.4 GHz hasta los 3.58 GHz, teniendo un ancho de

banda 180 MHz aproximadamente, siendo la mejor propuesta por el momento, pero como se requiere que el ancho de banda sea más amplio para cubrir el rango de frecuencia de 3.3 a 3.6 GHz por lo que también se descarta este diseño.

Al observar la Ilustración 3-6 de los patrones de radiación se puede apreciar que aún conservan su similitud a la primera propuesta, siendo el patrón del plano-H el único que en todas las propuestas se ha visto modificado un poco, y que cada uno de estos patrones tienen similitud al anterior, pero van variando.

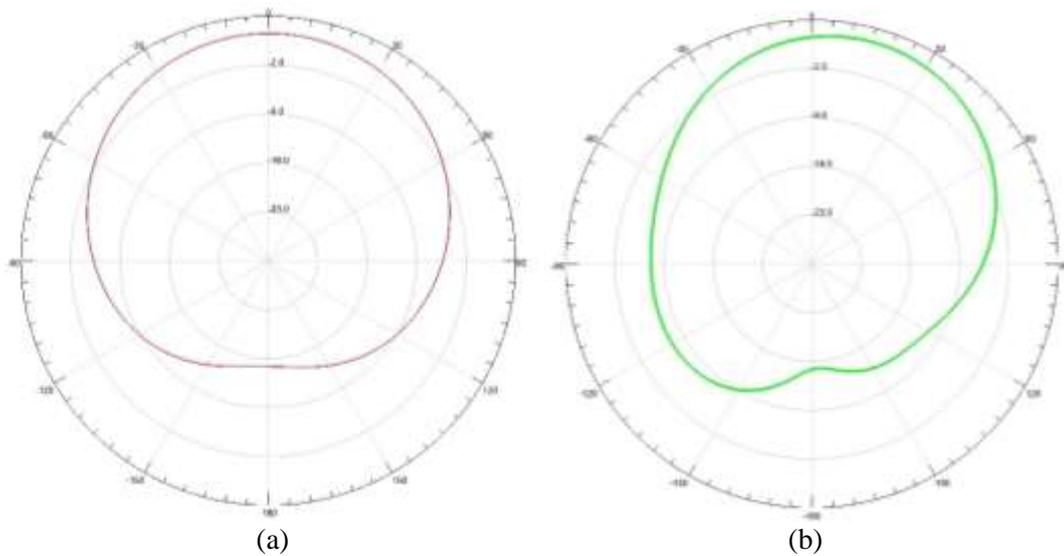
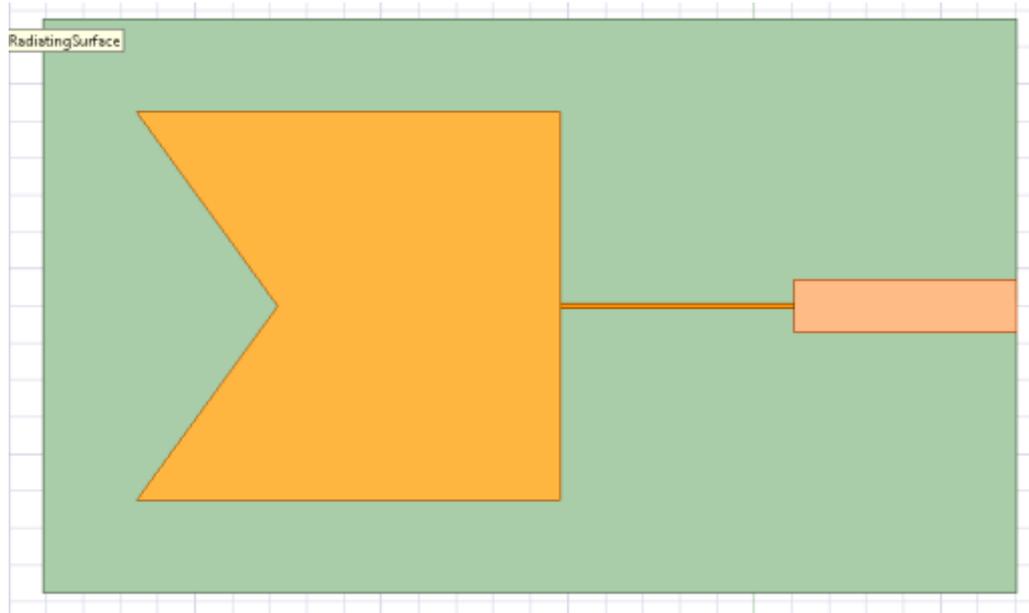


Ilustración 3-6: Patrones de Radiación de la Tercera propuesta (a) Plano-E (b) Plano-H

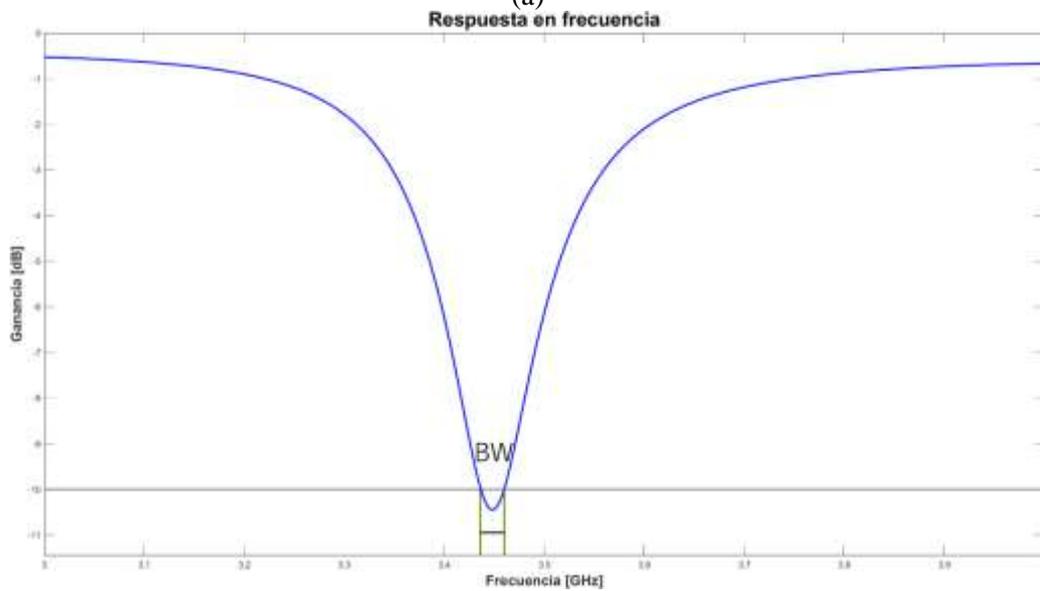
Realizado por: Bonilla, M., 2023

3.4.4 Cuarta propuesta

Para la cuarta propuesta en lugar de cortar partes de la antena se agrega dos secciones triangulares en la parte superior de la antena, una vez más partiendo de la primera propuesta, como se observa en la Ilustración 3-7, esta propuesta logra alcanzar una ganancia de -10.45 dB aproximadamente, pero este diseño también tiene problemas con el ancho de banda, el cual va desde los 3.44 hasta los 3.46 GHz, con un pequeño ancho de banda de 20 MHz, por lo que no parece que esta propuesta vaya a ser muy efectiva.



(a)



(b)

Ilustración 3-7: (a) Cuarta propuesta de la antena (b) Respuesta en frecuencia de la cuarta antena

Realizado por: Bonilla, M., 2023

Los patrones de radiación de esta propuesta, de la Ilustración 3-8, también se asemejan a las propuestas anteriores, pero en este caso el patrón del plano-E parece que fuera a ser un círculo con su lado inferior achatado, si bien en las propuestas anteriores se asemejan en este caso parece que se está podría tener una mayor cobertura, por otro lado, el plano-H sigue siendo muy irregular.

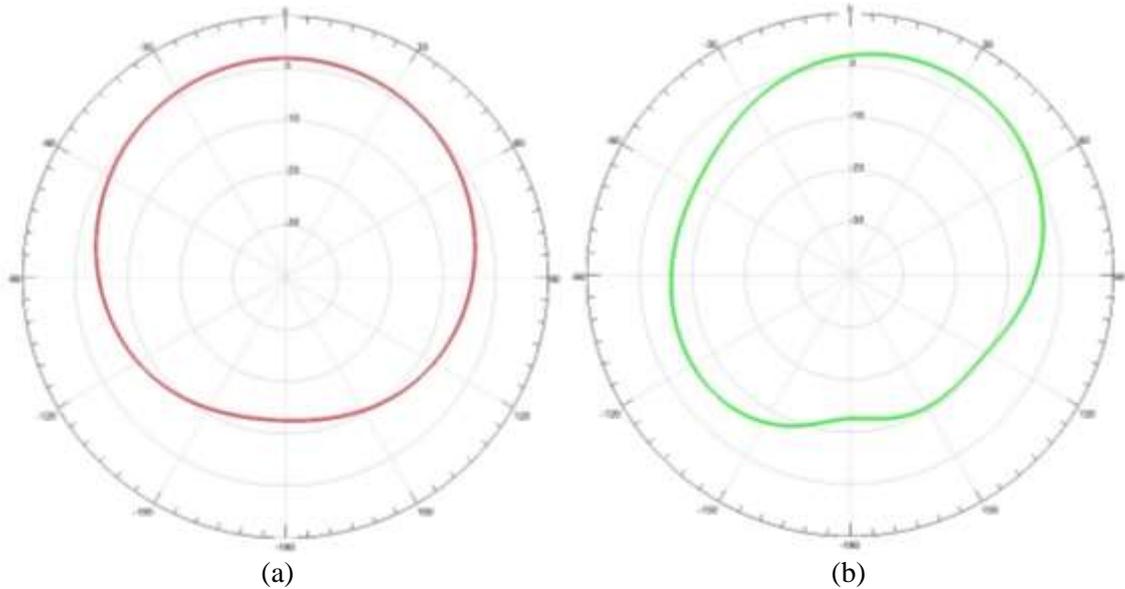


Ilustración 3-8: Patrones de Radiación de la Cuarta propuesta (a) Plano-E (b) Plano-H

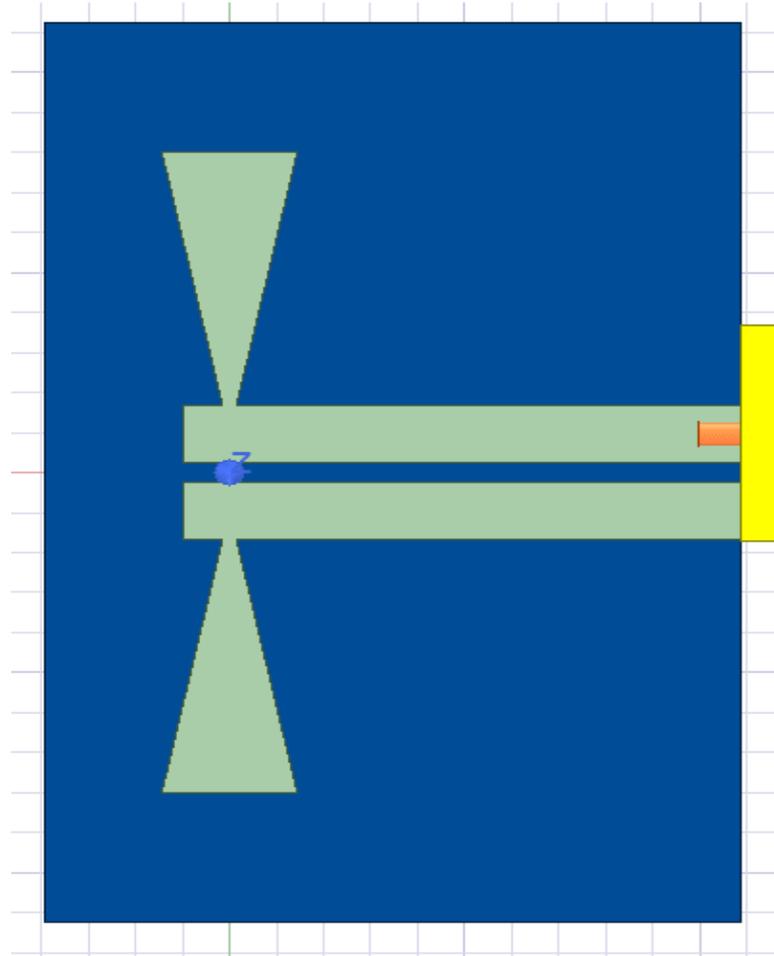
Realizado por: Bonilla, M., 2023

3.4.5 Quinta propuesta

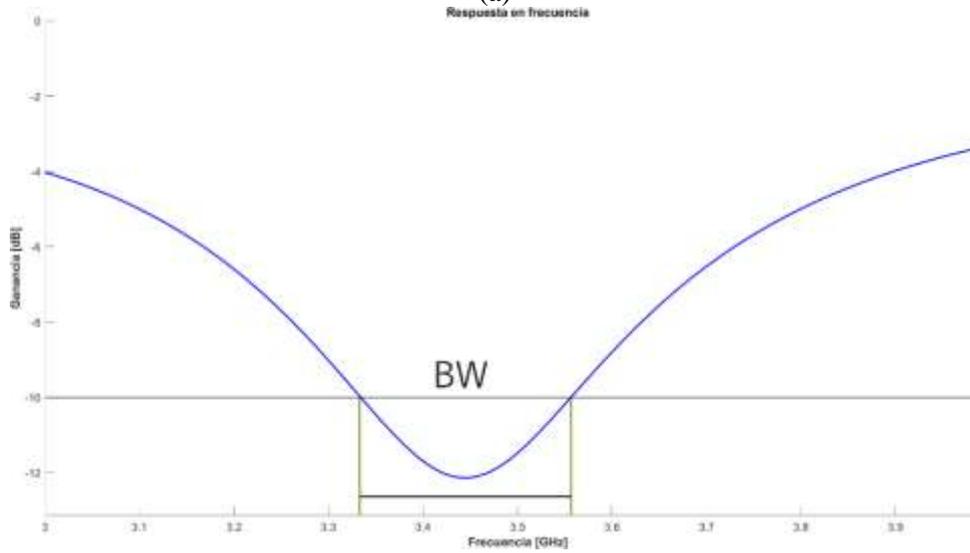
Debido a los resultados obtenidos de los primeros diseños se cambió de un modelo rectangular a uno triangular, en este diseño la antena triangular se conecta por medio de una línea de 50 ohms para conectarse mediante el conector, pero para este diseño no se usa una de las caras del FR4 como tierra, en lugar de eso se usa el mismo diseño de la antena como un reflejo para que haga de efecto de tierra, observe la Ilustración 3-9 (a), esperando que con este diseño se logre tener una buena ganancia y con un buen ancho de banda.

Como se observa en la Ilustración 3-9 (b) este diseño logra alcanzar una ganancia de -12.13 dB, algo a tener en cuenta es que este diseño logra tener un buen ancho de banda que va desde 3.33 a los 3.56 GHz, con un ancho de banda de 230 MHz, con esta propuesta se logra aproximar a lo deseado, faltando unos 70 MHz para alcanzar los 300 MHz para lo requerido.

En los patrones de radiación se observa que la antena tiene capacidad de irradiar en dos sentidos en el plano-E, Ilustración 3-10 (a), mientras que en el plano-H se observar que este es casi una circunferencia perfecta, Ilustración 3-10 (b), por lo que esta antena se vería limitada en el plano-E pero tendría mayor cobertura en el plano-H.



(a)



(b)

Ilustración 3-9: (a) Quinta propuesta de la antena (b) Respuesta en frecuencia de la quinta propuesta de la antena

Realizado por: Bonilla, M., 2023

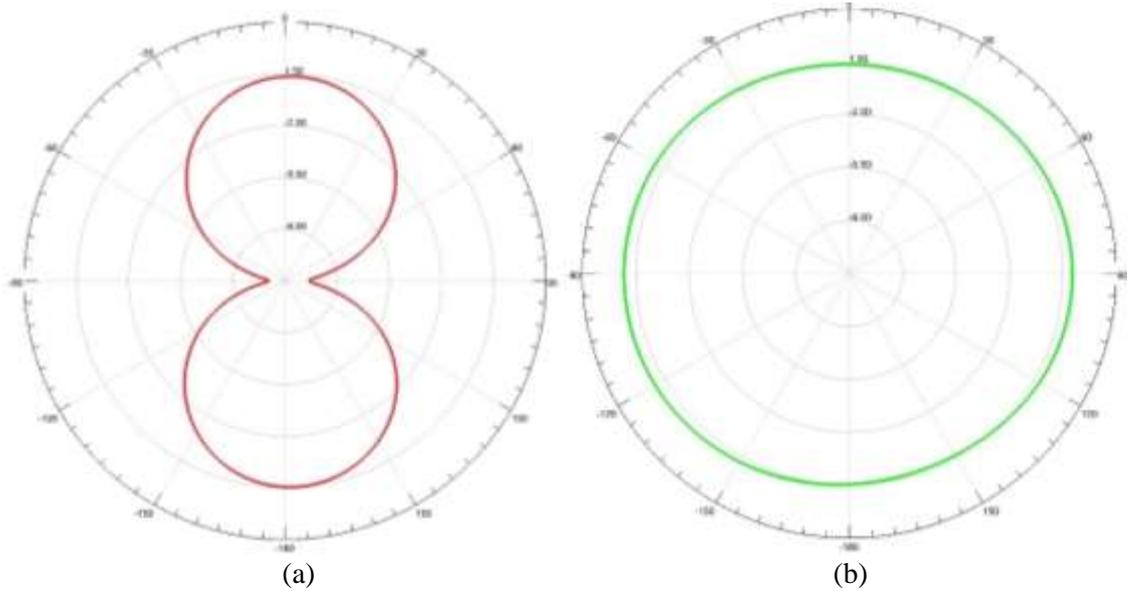


Ilustración 3-10: Patrones de Radiación de la Quinta propuesta (a) Plano-E (b) Plano-H

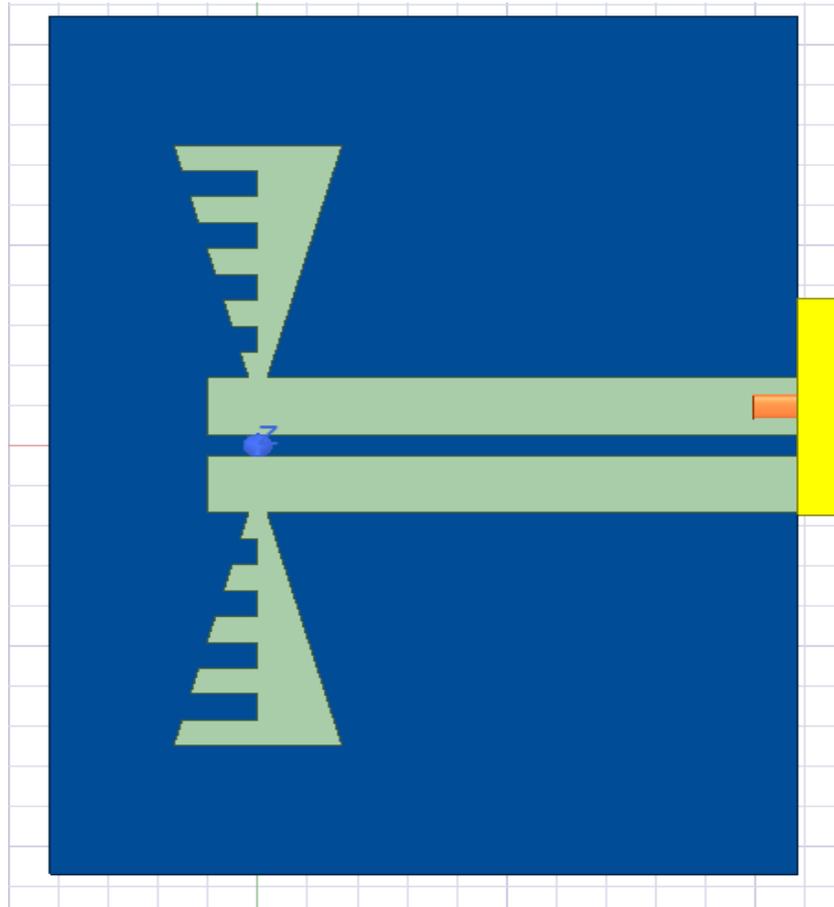
Realizado por: Bonilla, M., 2023

3.4.6 Sexta propuesta

A partir de la quinta propuesta se probó hacer cortes en el lado superior de la antena como una antena log-periódica con la intención de aumentar el ancho de banda, como se observa en la Ilustración 3-11 (a), debido a estos cambios realizados se logra tener una ganancia de -13.76 dB, logrando que la frecuencia central sea de 3.45 GHz y tener un ancho de banda amplio que cubre el rango de frecuencia de 3.325 a 3.577 GHz al sobrepasar los -10 dB, logrando tener un ancho de banda de 252 MHz, como se aprecie en la Ilustración 3-11 (b), siendo la propuesta que más se acerca a los requerimientos establecidos.

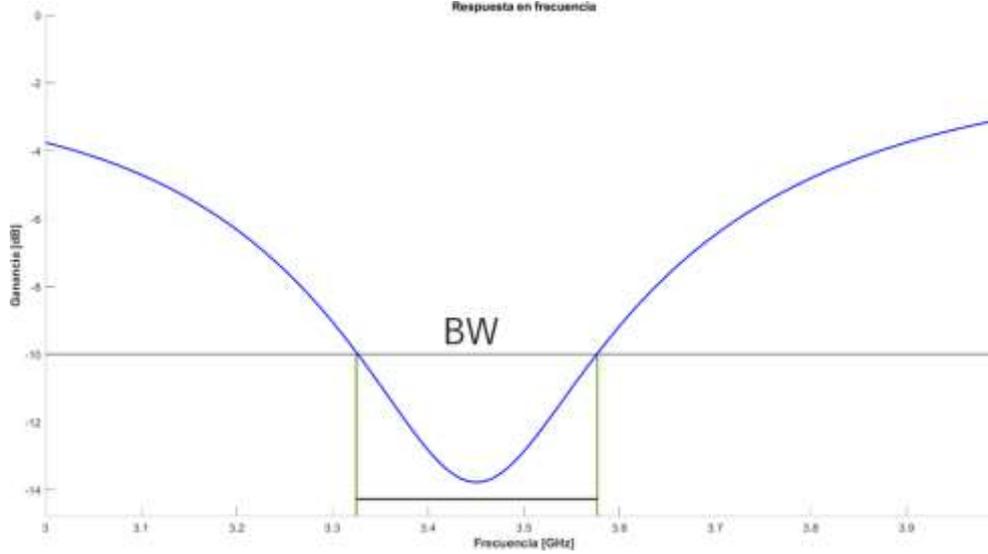
Los patrones de radiación que se ven en la Ilustración 3-12 son iguales a los de la propuesta anterior, por lo que parece que los cortes realizados en el parche no afectaron mucho al patrón de radiación para su propagación.

Debido a que el diseño tiene dimensiones cada vez más pequeños que pueden ser complicados de implementar, ya que las dimensiones pequeñas que requieren de medidas precisas para obtener los resultados planteados pueden verse afectados al no poder respetar las medidas milimétricas, por lo que se considera usar este diseño para implementar.



(a)

Respuesta en frecuencia



(b)

Ilustración 3-11: (a) Sexta propuesta de la antena (b) Respuesta en frecuencia de la sexta propuesta de la antena

Realizado por: Bonilla, M., 2023

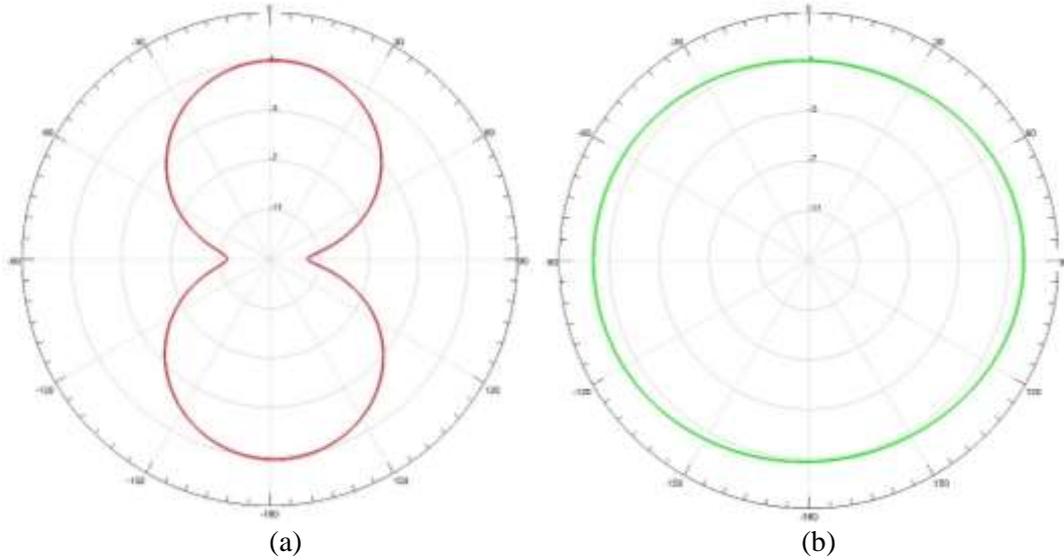


Ilustración 3-12: Patrones de Radiación de la sexta propuesta (a) Plano-E (b) Plano-H

Realizado por: Bonilla, M., 2023

3.5 Materiales

Para este trabajo se utilizaron los siguientes materiales que enlistan en la tabla 3-3.

Tabla 3-3: Lista de elementos o materiales

Elementos físicos
- Computador personal, laptop HP
- Baquelita de cobre FR4
- Acido Férrico
- Cautín o soldador eléctrico
- Estaño
- Conectores SMA
Elementos de software
- ANSYS HFSS Student versión

Realizado por: Bonilla, M., 2023

CAPÍTULO IV

4 IMPLEMENTACIÓN Y PRUEBAS DEL PROTOTIPO

4.1 Propuesta

Con el paso del tiempo desde la aparición de las primeras redes celulares se ha mejorado y evolucionado facilitando la conectividad de dispositivos móviles, con la próxima generación de tecnología 5G acercándose cada vez más al público general, se propone el diseño de un prototipo de una antena que funcione en el rango de frecuencias de 3.3 a 3.6 GHz, que es la banda de frecuencias que probablemente sean utilizadas en el país de Ecuador, según el documento de la GSMA(2020), para tratar de enfocar su uso para comunicaciones 5G.

4.2 Prototipo propuesto implementado

El prototipo de la antena es implementado en una baquelita de FR4, tras las diversas pruebas realizadas para llegar al diseño del prototipo, como está demostrado en la metodología experimental, se procede a implementar el prototipo para realizar las pruebas.

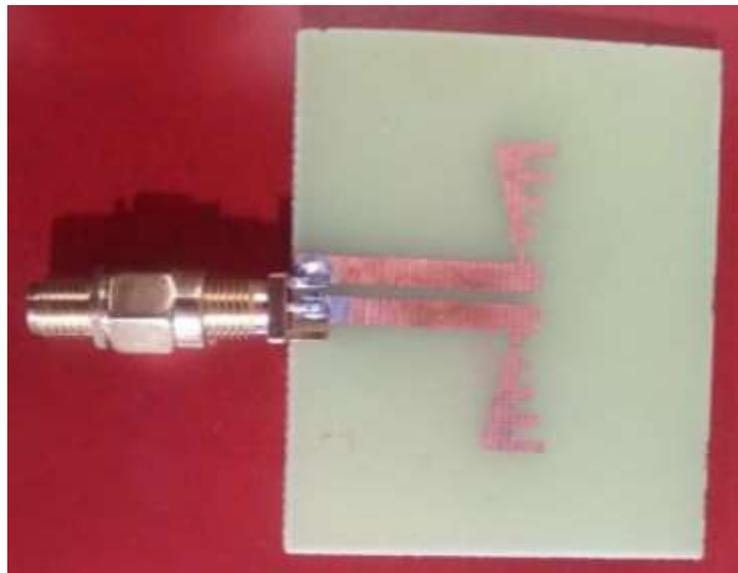


Ilustración 4-1: Antena implementada en FR4

Realizado por: Bonilla, M., 2023

Para la implementación se imprimió el modelo en un sticker o adhesivo cortado con una impresora de corte, ya que se espera que la precisión de las máquinas eviten que las dimensiones de la antena se vean afectadas y tener la menor variación posible a los resultados simulados, para después

mandar el FR4 con el sticker aplicado al acido y tener la antena como se muestra en la Ilustración 4-1.

Para medir la respuesta en frecuencia de la antena se usó el equipo VNA para tomar los datos y comprobar si las dimensiones de la antena fueron afectadas al momento de implementar la antena, en la Ilustración 4-2 se puede apreciar como el VNA muestra la respuesta de frecuencia de la antena en un rango de medición de 3 a 4 GHz.

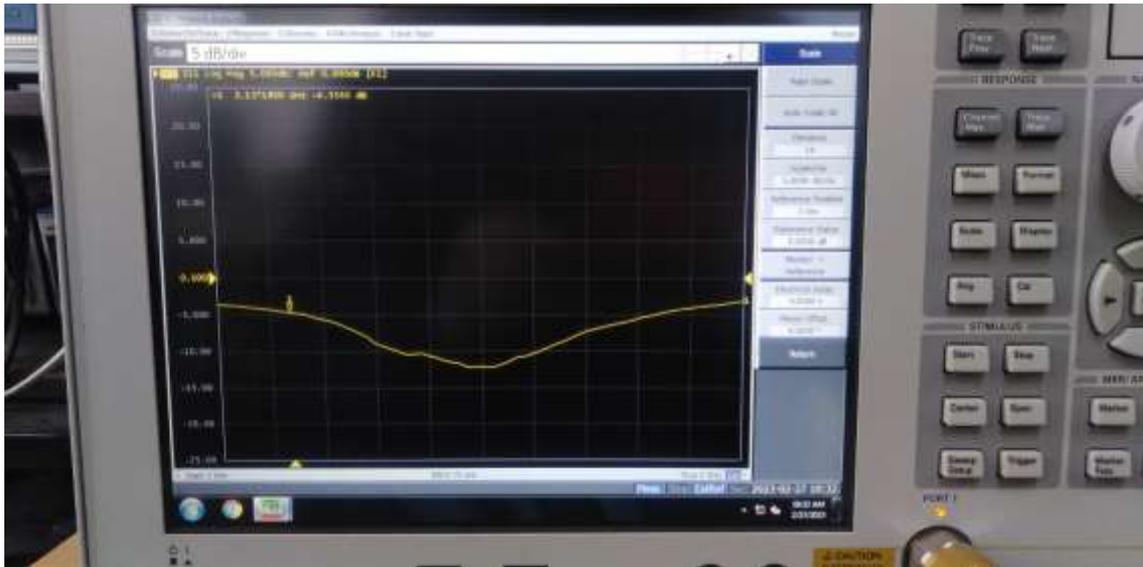


Ilustración 4-2: Respuesta en frecuencia de la antena en el equipo

Realizado por: Bonilla, M., 2023

Al comparar la respuesta en frecuencia de la antena ente las medidas simuladas y las medidas con el VNA que se observa en la Ilustración 4-3, la antena no tiene la respuesta en la frecuencia deseada de 3.45 GHz, moviéndose a una frecuencia superior aproximadamente a unos 3.47 GHz, debido a que al ser un modelo pequeño la técnica empleada para la implementación no facilita tener una precisión con la frecuencia central, además de producir una reducción de ganancia de 1.15 dB, al obtener una ganancia de 12.6 dB. Otro cambio que también se observa es que el ancho de banda de la antena es de 270 MHz, pero con un rango desde los 3.38 a los 3.65 GHz.

En la Ilustración 4-4 (a) y (b) se observa el patrón de radiación con $\Phi = 0$, medido de la antena implementada que, al comparar el patrón simulado, donde se puede apreciar que el patrón tiene cierta similitud, porque al medir el patrón de radiación con el analizador de espectros y el generador de señales, al momento de medir la señal esta variaba por lo que costaba tener una medición más acertada. La medición del patrón de radiación se realizó poniendo las antenas a una

separación de 15 cm, y con ayuda de un graduador se va observando la potencia que la antena capta a medida que una de las antenas va girando para cada uno de los planos.

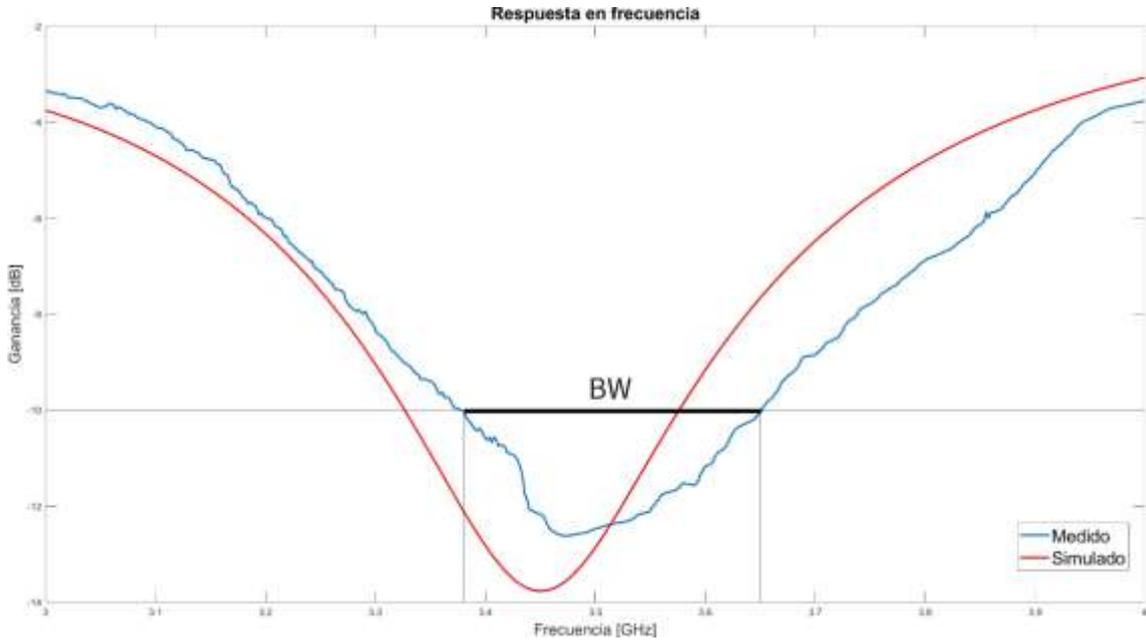


Ilustración 4-3: Comparación de la respuesta en frecuencia de la antena entre los datos medidos (azul) y los simulados

Realizado por: Bonilla, M., 2023

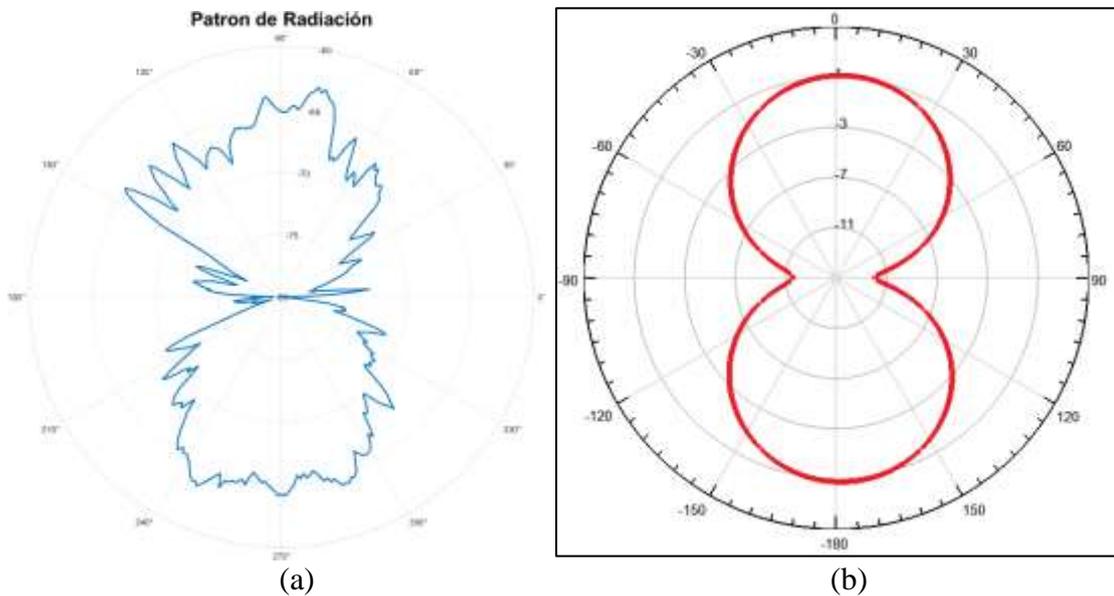


Ilustración 4-4: Patrón de Radiación $\Phi = 0$ (a) Medido y (b) Simulado

Realizado por: Bonilla, M., 2023

De igual manera en la Ilustración 4-5 (a) y (b) se observa el patrón de radiación con $\Phi = 90^\circ$, medido y simulado que son similares, por lo que se puede deducir que en este caso si es bien similar, como se observa que las gráficas si se asemejan.

Con el uso de la cámara anecoica y el software LabView se realizó las mediciones del patrón de radiación dando como resultado uno parecido al simulado y medido, mostrando que tiene una directividad que apunta al frente y hacia la parte trasera de la antenna, lo que permite que se hagan las mediciones como se muestra en la Ilustración 4-6, poniendo las antenas frente a frente para que se pueda transmitir y recibir la señal, y si se diera la vuelta a la antenna receptora unos 180° la antenna seguiría teniendo la capacidad captar la señal, pero si se le diera una vuelta de 90° no sería capaz de captar la señal o tendría muchas dificultad.

Si se compara las Ilustraciones 4-4 y 4-6, deja claro que las pruebas en la cámara anecoica permiten obtener un patrón más limpio ya que este da un entorno más práctico para que las ondas vayan de una antenna a otra, ya que, el patrón medido en condiciones normales termina opacado por la resistencia del aire.

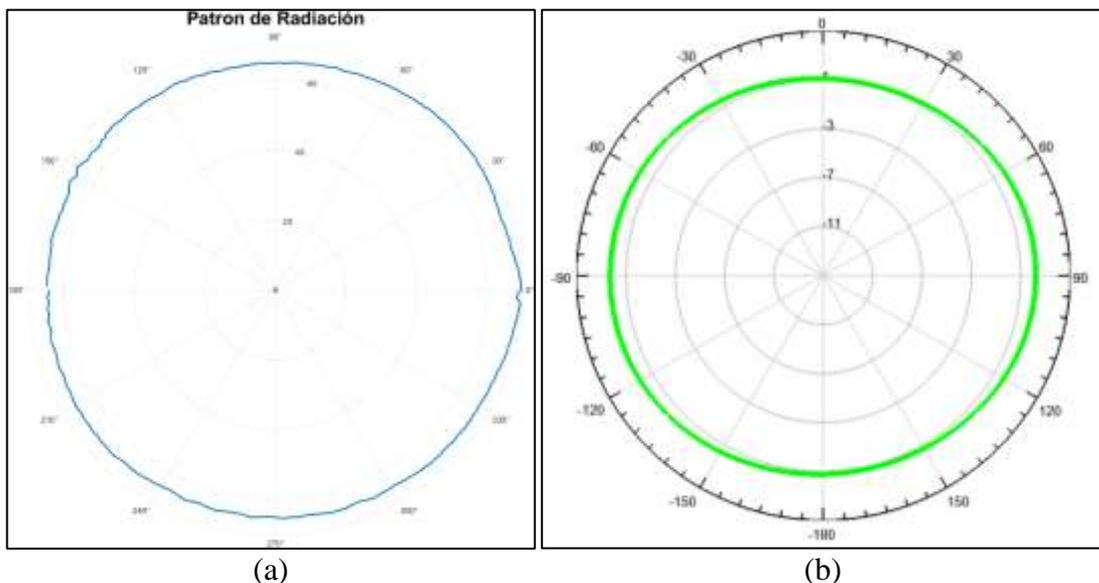


Ilustración 4-5: Patrón de Radiación $\Phi = 90^\circ$ (a) Medido y (b) Simulado

Realizado por: Bonilla, M., 2023

Lo siguiente es comprobar la cobertura de la antenna para determinar cuál sería la distancia que la antenna es capaz de alcanzar con diferentes potencias, las potencias que se usarían para realizar las mediciones serian -10 dBm, 0 dBm, 10 dBm y 20 dBm.

Por motivos prácticos y por limitaciones del equipo transmisor que solo puede transmitir hasta 20 dBm, se realizaron las mediciones para una BS de área local, como se especifica en la Tabla 2-2 que dice que la potencia radiada es de hasta 24 dBm, por lo que las mediciones se limitaron a realizarlas hasta una distancia de 5 m en el laboratorio de Microondas. Las mediciones se realizan a una distancia de R_2 para medir en Far-Field, usando en valor de “ D ” que se especifica en el Anexo A, por lo que según la ecuación (4):

$$R_2 = \frac{2 * D^2}{\lambda} = \frac{2 * (29.86 \times 10^{-3})^2}{\frac{3 \times 10^8}{3.45 \times 10^9}} = 0.02050 = 20.50 \text{ mm} = 2.05 \text{ cm}$$

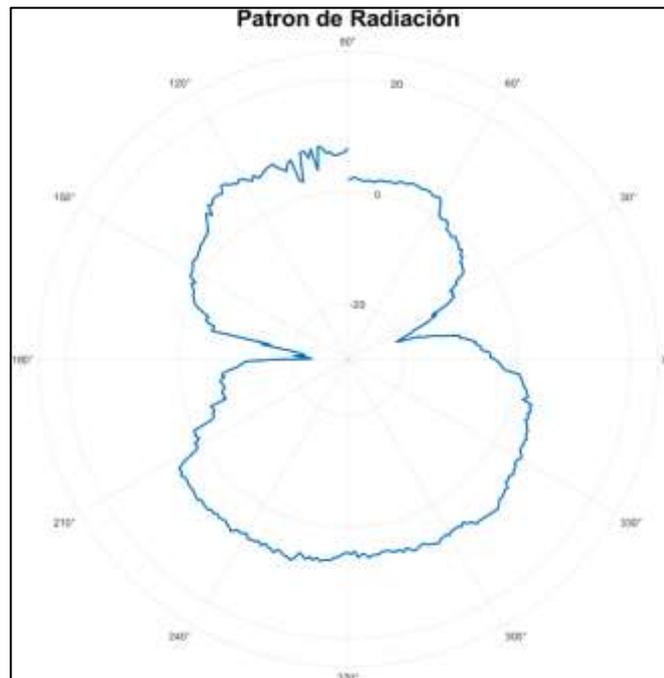


Ilustración 4-6: Patrón de Radiación medido en la cámara anecoica

Realizado por: Bonilla, M., 2023

Según la ecuación (3) para esta antena el Far-Field comienza a los 2.05 cm, aproximadamente, por lo que para las mediciones se comienza desde los 2.5 cm, midiendo la potencia de recepción cada 2.5 cm hasta llegar a los 30 cm, a partir de ahí se comienza a medir cada 5 cm hasta llegar a cubrir 1 m, entre los 1 y 2 metros se realizan las mediciones cada 10 cm y a partir de los 2 metros se mide cada 20 cm hasta llegar a los 5 metros, esto para poder observar cómo varía la intensidad de la señal a medida que aumenta la distancia entre la antena transmisora y receptora, tratando de captar el haz de la antena transmisora para poder recibir la mayor potencia posible en la receptora apuntando las antenas como se ve en la Ilustración 4-7. Tras realizar las mediciones se gráfica

todo en la Ilustración 4-8 donde se observa como la intensidad de la señal va cayendo a medida que se aumenta la distancia entre las antenas.



Ilustración 4-7: Mide la cobertura de la antena

Realizado por: Bonilla, M., 2023

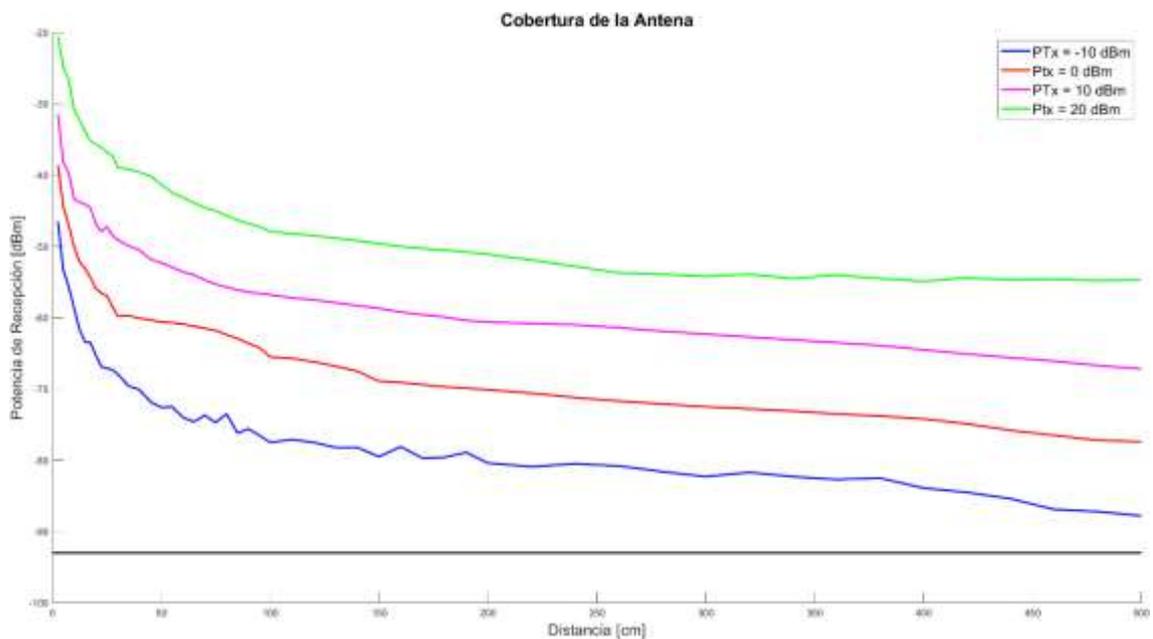


Ilustración 4-8: Mide la cobertura de la antena

Realizado por: Bonilla, M., 2023

Para la sensibilidad del receptor se estableció una sensibilidad de potencia de -93.7 dBm como indica en la Tabla 2-3, al analizar la Ilustración 4-8 se observa que incluso con una baja potencia

de -10 dBm la antena puede cubrir los 5 metros de cobertura, por lo que con la potencia más alta es posible tener una cobertura mayor para un área local, considerando que las antenas tienen línea de vista libre, por lo que en situaciones normales con obstáculos el área de cobertura puede verse reducido.

Para conocer la eficiencia de la antena se usó la ecuación (1), donde $Z_0 = 50$ ohm es la impedancia de la línea de transmisión y $Z_{in} = 42.84 - j22.6$ ohm es la impedancia de entrada de la antena, este valor se obtuvo de la simulación, para la eficiencia de radiación se considera que no hay pérdidas en el dieléctrico y por conductividad, por lo que $e_{cd} = 1$,

$$e_0 = e_{cd} * \left(1 - \left| \frac{42.84 - j22.6 - 50}{42.84 - j22.6 + 50} \right|^2 \right) = 0.93844$$

Después de realizar el cálculo de la eficiencia se obtiene un valor 0.93844, indicando que la antena tiene un 93.8% de eficiencia, perdiendo un 6.2% de la potencia que recibe por las reflexiones provocadas por problemas de acoplamiento.

Para las siguientes mediciones, utilizando la Tabla 2-3 se realizó las mediciones con 5 m de separación entre las antenas cambiando la frecuencia, ya que en la tabla hay varios canales con diferentes anchos de banda, teniendo separaciones de subportadoras de 15 KHz, 30 KHz y 60 KHz, solo se realizaron las medidas para los canales de 5 MHz, 10 MHz y 15 MHz para las mismas potencias con la que se midió la cobertura. Las variaciones de frecuencia se realizaron desde los 3.45 GHz por ser la frecuencia central, tomando medidas cada 15 KHz hasta llegar a los límites del canal de 15 MHz, ya que la separación de las subportadoras es múltiplo de 15 KHz al tomar estas medidas se puede extraer para los canales más pequeños.

Debido a que el canal de 15 MHz es el más grande y todos los canales tienen una separación de subportadora de 15 KHz y el resto de los espaciamientos son múltiplos de este valor se pudo medir todos los datos para este canal y después separar los datos para los canales más pequeños, dando los siguientes resultados.

La Ilustración 4-9 muestra como en todo el canal la potencia que la antena receptora recibe tiene pequeñas variaciones, las cuales pueden deberse a diversos factores, pero no muestra una variación que pueda considerarse significativa que pueda provocar una mala recepción de la señal, ni que la señal de -10 dBm se vea afectada para que el receptor tenga problemas para captar la señal. Este canal de 5 MHz al ser el más pequeño cubre el rango de frecuencias desde los 3447.5 MHz hasta los 3452.5 MHz, pero la separación de 15 KHz permite apreciar como la potencia recibida va variando.

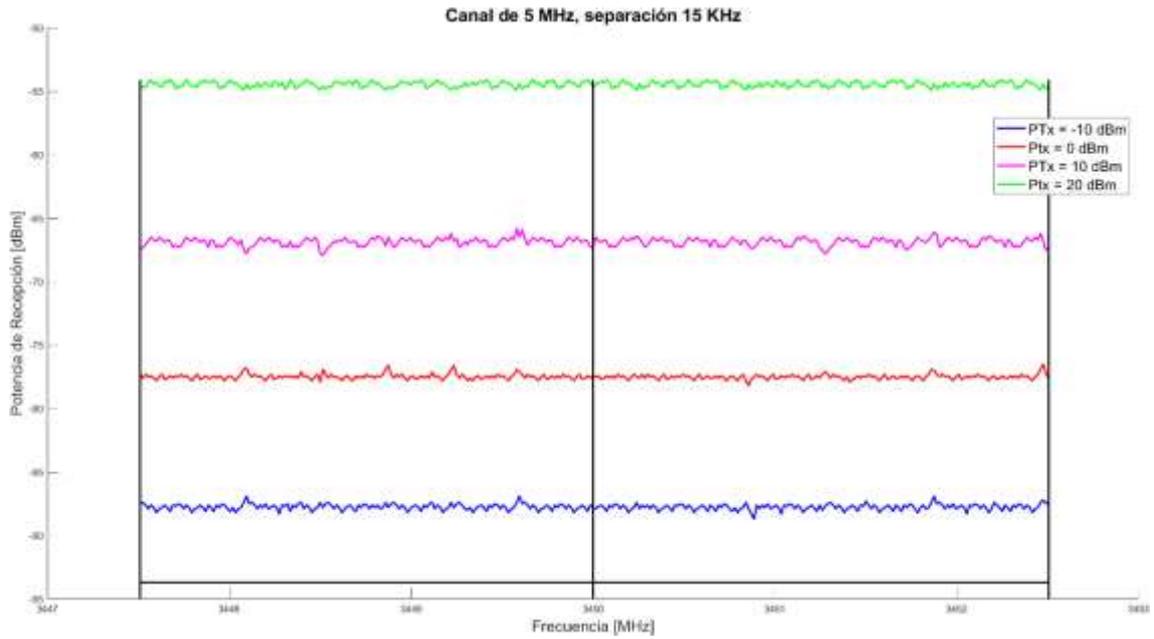


Ilustración 4-9: Mediciones de canal de 5 MHz con separación de subportadora de 15 KHz

Realizado por: Bonilla, M., 2023

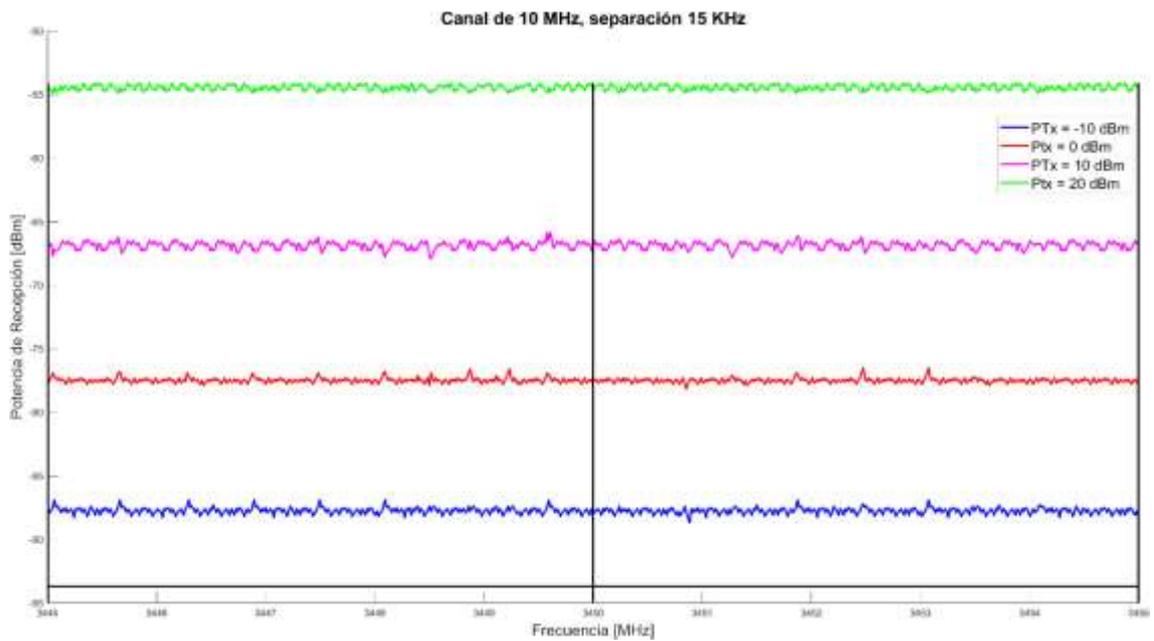


Ilustración 4-10: Mediciones de canal de 10 MHz con separación de subportadora de 15 KHz

Realizado por: Bonilla, M., 2023

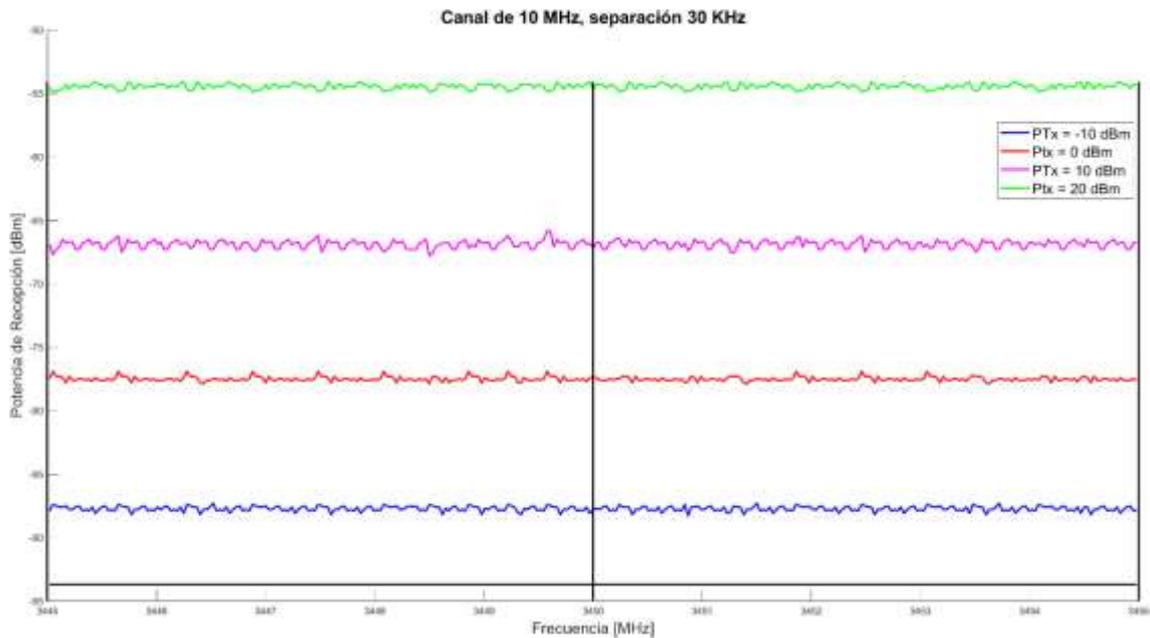


Ilustración 4-11: Mediciones de canal de 10 MHz con separación de subportadora de 30 KHz

Realizado por: Bonilla, M., 2023

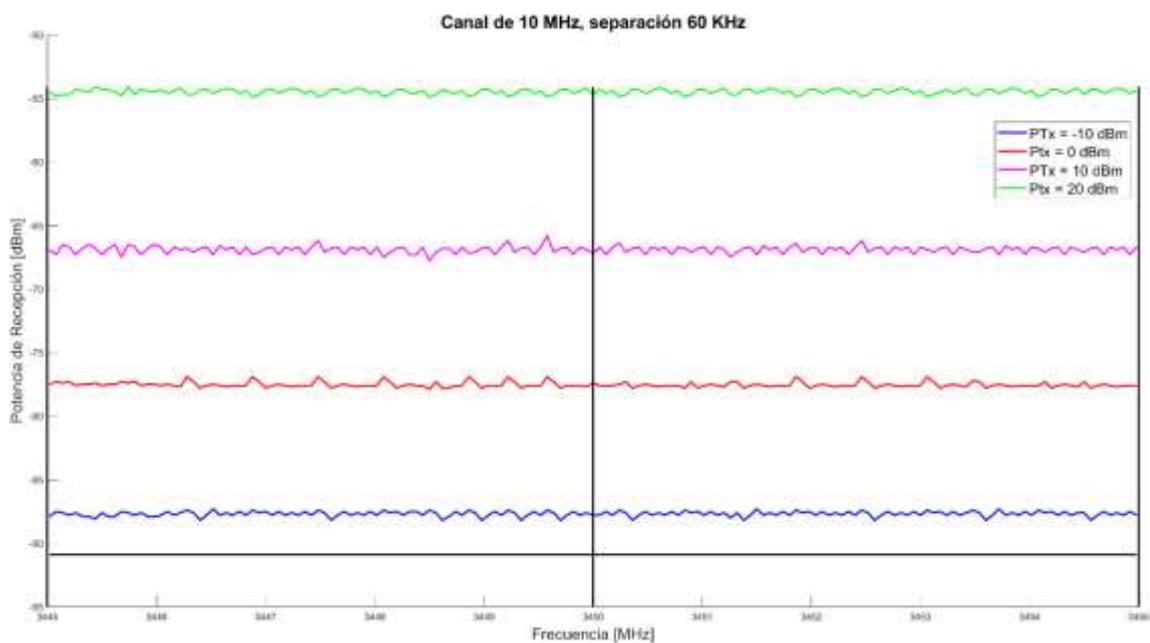


Ilustración 4-12: Mediciones de canal de 10 MHz con separación de subportadora de 60 KHz

Realizado por: Bonilla, M., 2023

En el canal de 10 MHz al tener un rango más amplio de frecuencia tiene mucha más información, donde la Ilustración 4-10 muestra una variación con varios picos como que es más vulnerable al ruido del ambiente, como que cada subportadora puede verse afectada a interrupciones al tener una separación de 15 KHz, algo que disminuye en la Ilustración 4-11 mostrando un resultado un

poco más limpio, reduciendo la variación de la potencia que tiene cada subportadora, mientras que en la Ilustración 4-12 las medidas se muestran con ciertas frecuencias con baja variación y otras donde la potencia cae o sube con un poco de fuerza sobresaliendo un poco, algo que es normal ya que la señal puede afectada por el medio e interferencias. El canal cubre el rango de frecuencias de 3445 MHz hasta los 3455 MHz.

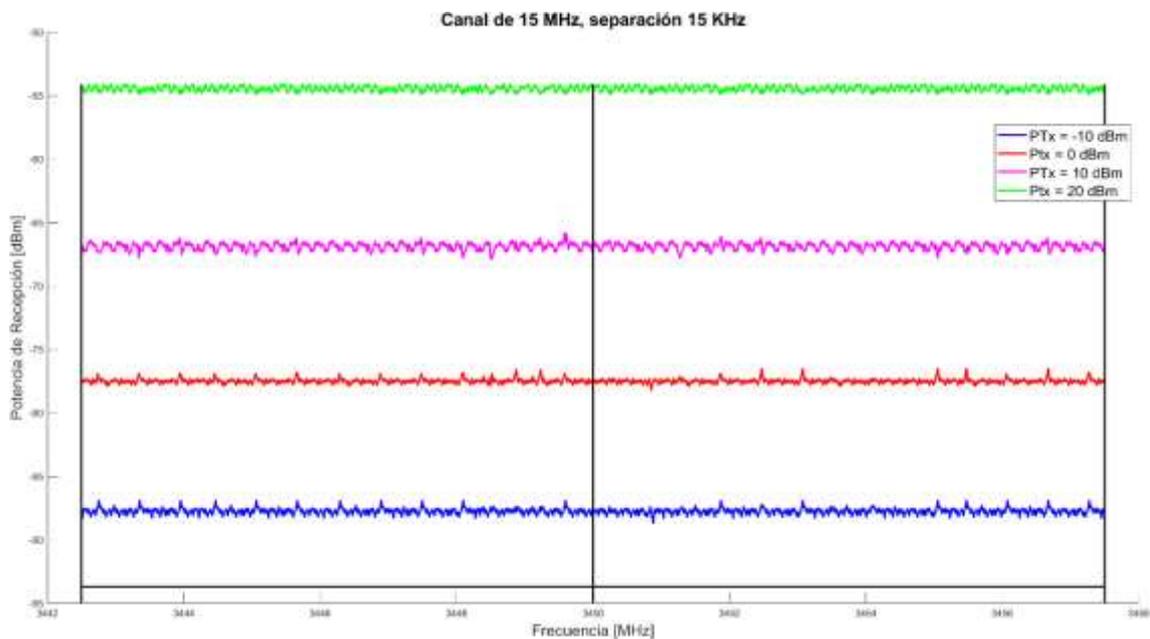


Ilustración 4-13: Mediciones de canal de 15 MHz con separación de subportadora de 15 KHz

Realizado por: Bonilla, M., 2023

De manera similar al canal de 10 MHz el canal de 15 MHz muestra más variaciones al tener una cantidad de subportadoras más elevada, brindando un panorama más amplio para observar como la señal llega en las diferentes frecuencias, la Ilustración 4-13 al tener la separación más pequeña permite ver como la potencia que se radia en cada frecuencia se ve afectada por el medio y las interferencias que se encuentre, algo que parece ir reduciendo en las Ilustraciones 4-14 y 4-15, de igual forma como se ve en el canal de 10 MHz, solo que al tener una mayor cantidad de subportadoras esta reducción parece muy leve en el canal de 15 MHz.

Al observar las Ilustraciones de todos los canales se observa que con todas las potencias se puede transmitir entre las dos antenas sin problema, pero que para potencias de transmisión muy bajas como la potencia de -10 dBm, si bien está por encima de la sensibilidad recomendada, las transmisiones con esta potencia podrían verse vulnerables a pérdidas por interferencia o por no lograr captar el haz de la antena transmisora.

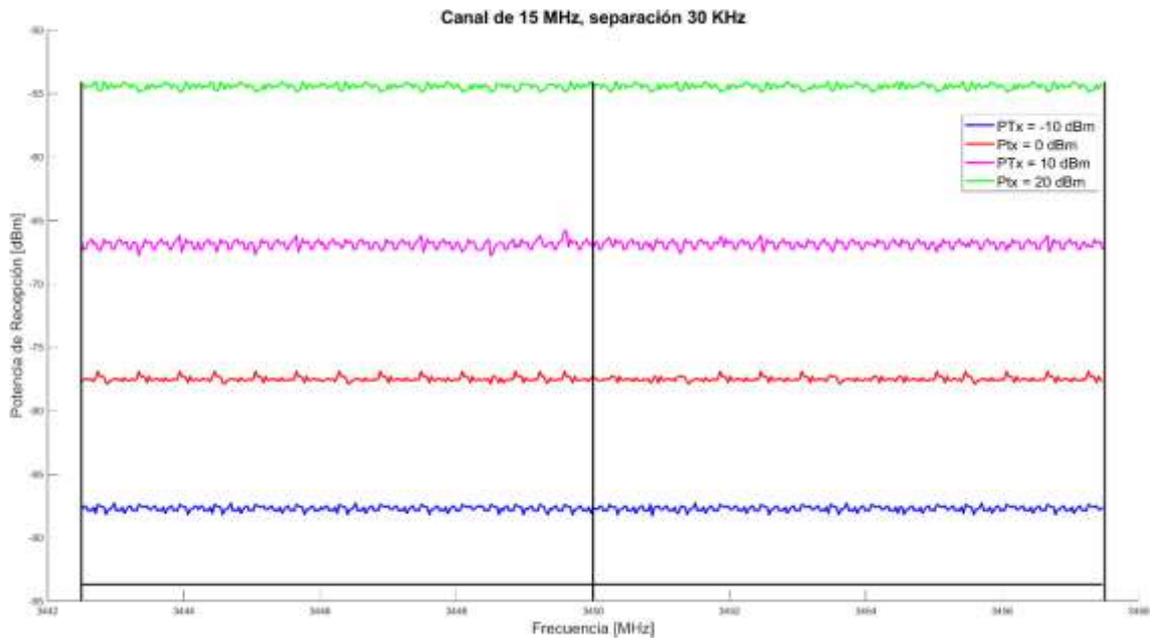


Ilustración 4-14: Mediciones de canal de 15 MHz con separación de subportadora de 30 KHz

Realizado por: Bonilla, M., 2023

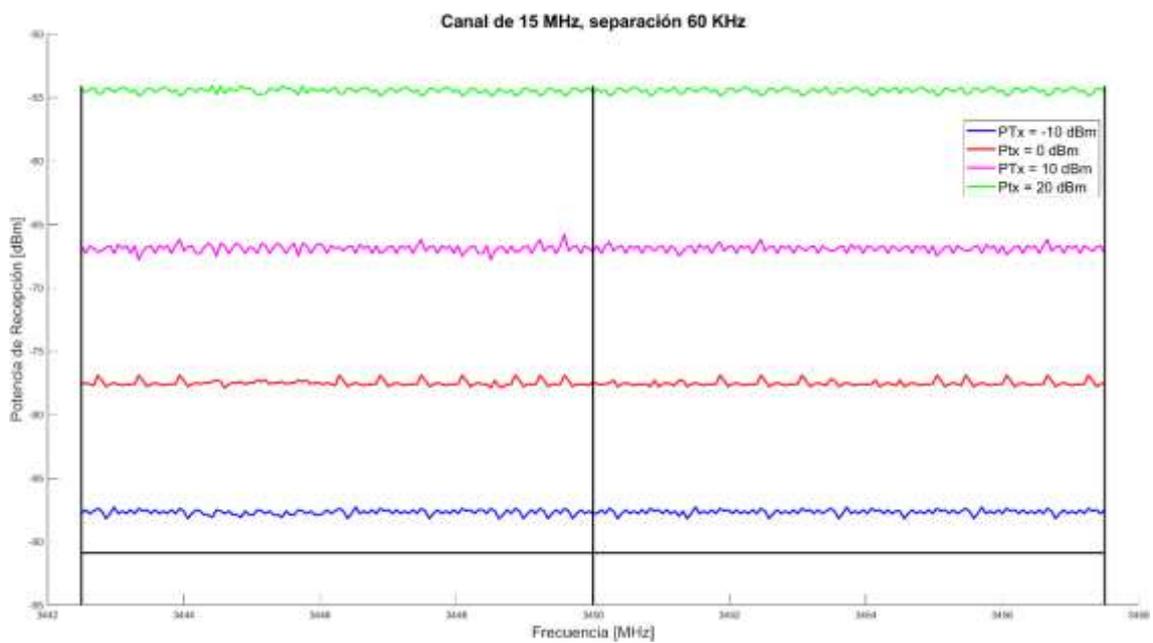


Ilustración 4-15: Mediciones de canal de 15 MHz con separación de subportadora de 60 KHz

Realizado por: Bonilla, M., 2023

CONCLUSIONES

- El estudio del arte realizado ha reforzado los conocimientos referentes a antenas microstrip y tecnología 5G aportando bases sólidas para aplicar en el diseño de la antena.
- En un principio el diseño de la antena debía cubrir un rango de frecuencias de 3.3 a 3.6 GHz, pero por las pequeñas dimensiones de la antena que podrían ser afectadas al momento de implementar, se decidió usar el sexto diseño simulado en HFSS que tiene un ancho de banda de 252 MHz en el rango de frecuencias de 3.325 a 3.577 GHz y una ganancia de -13.76 dB.
- La antena implementada tiene una eficiencia del 93.8% y el patrón de radiación es similar al simulado, pero por las propiedades del material y las dimensiones pequeñas del diseño el ancho de banda se incrementó a 270 MHz, pero desplazándose al rango de frecuencias de 3.38 a 3.65 GHz y la ganancia se redujo a los -12.6 dB.
- El desempeño de la antena al realizar las mediciones, considerando las potencias de transmisión y la sensibilidad de recepción de la norma TS 138.141-1, demuestra que tiene una buena cobertura para aplicaciones de área local y que puede trabajar con canales de 5, 10 y 15 MHz.

RECOMENDACIONES

- Probar implementar la antena en otro material con mejores propiedades que el FR4 para observar si la antena mejora en ganancia y como se afectaría el ancho de banda.
- Tratar de implementar la antena por otras técnicas de remover el cobre, ya que las pequeñas dimensiones de la antena modifican la respuesta en frecuencia.
- Realizar test para canales de mayor ancho de banda ya que en este trabajo solo se realizó las mediciones para canales de 5, 10 y 15 MHz.
- Mejorar el acople de la antena a la línea de transmisión por medio de acopladores para evitar perder la potencia que se suministra a la antena.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **3GPP TR 21.915. V 15.0.0.** *Technical Specification Group Services and System Aspects.* [en línea],
- [2] **GSMA.** *Espectro 5G Posición de política pública de la GSMA.* [en línea], 2019. Disponible en: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2019/10/5G-Spectrum-Positions-SPA.pdf>
- [3] **GSMA.** *5G y el Rango 3,3-3,8 GHz en América Latina.* [en línea], 2020. Disponible en: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2020/11/5G-and-3.5-GHz-Range-in-Latam-Spanish.pdf>
- [4] **FIRDAUSI, A., DAMAYANTI, L., HAKIM, G. P. N., UMAISAROH, U., & ALAYDRUS, M.** *Design of A Dual-Band Microstrip Antenna for 5G Communication.* [en línea], 2021. *Journal of Integrated and Advanced Engineering (JIAE)*, 1(1), 65-72.
- [5] **SANDI, E., RUSMONO, A. D., DIAMAH, A., & VINDA, K.** *Ultra-wideband Microstrip Array Antenna for 5G Millimeter-wave Applications.* *J. Commun.*, 2020,15(2), 198-204.
- [6] **DHEYAB, E., & QASEM, N.** *Design and optimization of rectangular microstrip patch array antenna using frequency selective surfaces for 60 GHz.* *International Journal of Applied Engineering Research*, 2016, 11(7), 4679-4687.
- [7] **HUIDOBRO, José Manuel.** *Antenas de telecomunicaciones.* *Revista digital de acta*, 2013, vol. 18.
- [8] **ETSI TS 138 141-1. V16.6.0.** *5G; NR; Base Station (BS) conformance testing Part 1: Conducted conformance testing*
- [9] **3GPP TS 38.104. V17.7.0.** *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception.*
- [10] **ITU.** *5G – Quinta generación de tecnologías móviles.* [en línea], 2022. ITU. Retrieved July 1, 2022, Disponible en: <https://www.itu.int/es/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>
- [11] **3GPP TS 22.261. V19.0.0.** *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Service requirements for the 5G system; Stage 1.*
- [12] **PELIZA, Carlos; DUFOUR, Fernando; SERRA, Ariel.** *Redes 5g desde el Estado al Arte.* 2019.

- [13] **RIOFRÍO VACA, Adriana Elizabeth.** *Análisis del estado del arte e innovación en las tecnologías de sistemas de comunicaciones inalámbricas 5G.* 2016. Tesis de Licenciatura.
- [14] **AL-HETAR, Abdulaziz M.; AQLAN, Esmat AM.** *High performance & compact size of microstrip antenna for 5G applications.* En 2021 International Conference of Technology, Science and Administration (ICTSA). IEEE, 2021. p. 1-3.
- [15] **LEE, Kai Fong; TONG, Kin-Fai.** *Microstrip patch antennas.* En Handbook of Antenna Technologies. Springer, Singapore, 2016. p. 787-852.
- [16] **BALANIS, Constantine A.** *Antenna theory: analysis and design.* 4° ed. 2016, New Jersey. ISBN 97811186420601.
- [17] **SHARMA, Sonia; TRIPATHI, C. C.; RISHI, Rahul.** Impedance matching techniques for microstrip patch antenna. Indian Journal of Science and Technology, 2017, vol. 10, no 28, p. 1-16.
- [18] **ITU-R M.2150-1.** *Especificaciones detalladas de las interfaces radioeléctricas terrenales de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2020 (IMT-2020)*
- [19] **3GPP TS 37.105. V17.6.0.** *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Active Antenna System (AAS) Base Station (BS) transmission and reception (Release 17)*
- [20] **ELECTRONICSNOTES.** *Log Periodic Antenna: LPDA Aerial Array* » Electronics Notes. Electronics Notes: reference site for electronics, radio & wireless [en línea]. [sin fecha]. Disponible en: <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/log-periodic-lpda-antenna/log-periodic-basics.php>
- [21] **VON BUTOVITSCH, Peter, et al.** *Advanced antenna systems for 5G networks.* Ericsson White Paper, 2018.
- [22] **RAVI, Kiran Chand; SLYUSAR, Vadym; KUMAR, Jayendra.** *SRR Loaded Wideband Antenna 5G Application.* En 2022 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP). IEEE, 2022. p. 1-5.
- [23] **DEEPTHI, Mariam John, et al.** *Flexible Antennas for a Sub-6 GHz 5G Band: A Comprehensive Review.* Sensors, 2022, vol. 22, no 19, p. 7615.
- [24] **SHAREEF, Oras Ahmed, et al.** *Design of multi-band millimeter wave antenna for 5G smartphones.* Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2022, vol. 25, no 1, p. 382-387.

[25] **SWARNA, Sadiya Afrin, et al.** *Novel Microstrip Patch Antenna with Modified Ground Plane for 5G Wideband Applications*. Global Journal of Research in Engineering, 2019.

[26] **MUTTAIR, Karrar Shakir, et al.** *A new design of mm-Wave MIMO antenna with high isolation for 5G applications*. International Journal of Microwave and Optical Technology, 2021, vol. 16, no 4, p. 370-379.

[27] **USMAN, Muhammad, et al.** *Design of compact ultra-wideband monopole semi-circular patch antenna for 5G wireless communication networks*. Przegląd Elektrotechniczny, 2019, vol. 2, no 4, p. 223-226.

[28] **3GPP TS 38.141-1 V18.2.0.** *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 18)*

Betha Quintana



ANEXOS

ANEXO A: DIMENSIONES DE LA ANTENA

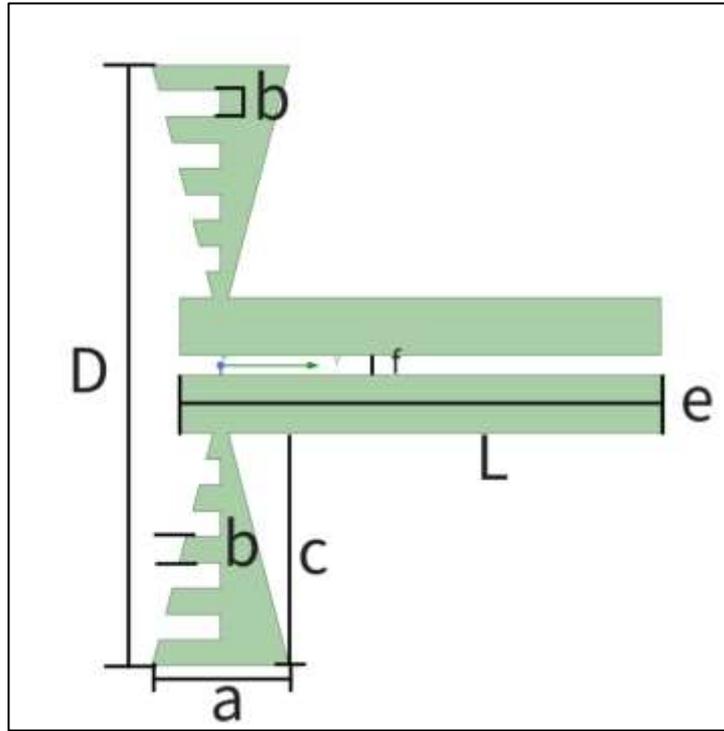


Ilustración A1-1: Medidas de la antena parche

Realizado por: Bonilla, M., 2023

Tabla Anexo A-1: Valores de las dimensiones de la antena

Lado	Valor [mm]
a	6.752
b	1.29
c	18.22
D	29.821
e	3.795
L	23.694
f	0.5

Realizado por: Bonilla, M., 2023

ANEXO B: MEDIDAS REALIZADAS

Tabla Anexo B-1: Mediciones del patrón de radiación medido

Angulo	prx [$\phi = 0$]	prx [$\phi = 90$]	Cámara [$\phi = 0$]
0	-80	-64.1	7.751
1	-78.6	-64.2	7.062
2	-77.1	-64.8	6.860
3	-75.8	-64.3	6.571
4	-74.2	-64.6	6.615
5	-73	-64.8	7.235
6	-74.6	-64.7	7.078
7	-75.3	-64.8	8.101
8	-76.4	-65.1	8.467
9	-77.1	-64.9	4.224
10	-77.8	-64.5	8.191
11	-77.6	-64.8	6.641
12	-77.4	-65.1	8.111
13	-77.2	-65.3	7.840
14	-77.3	-65.1	2.696
15	-77	-64.9	3.096
16	-76.5	-64.8	7.072
17	-76.1	-64.9	6.656
18	-75.8	-65	5.329
19	-75.2	-65.1	6.050
20	-74.8	-65.2	6.357
21	-74.5	-65	7.373
22	-74.3	-64.8	7.239
23	-74.1	-64.9	7.081
24	-73.8	-65.1	6.757
25	-73	-65.3	6.348
26	-73.2	-65.1	5.999
27	-73.6	-65	6.935
28	-74.1	-65.3	6.126
29	-74.5	-65.4	6.649
30	-74.7	-65.6	7.138
31	-74.3	-65.5	7.534
32	-73.8	-65.3	7.023
33	-72.9	-65.4	7.442
34	-71.5	-65.6	7.643
35	-71	-65.5	8.227
36	-71.5	-65.4	8.313
37	-71.9	-65.6	7.051
38	-72.3	-65.7	7.403
39	-72.5	-65.4	7.433
40	-72.9	-65.5	7.372
41	-72.6	-65.7	6.646
42	-71.9	-65.6	7.102
43	-70.9	-65.7	5.300
44	-69.6	-65.8	6.278
45	-69	-65.9	5.435
46	-68.9	-65.8	4.678
47	-68.7	-65.6	4.021
48	-68.1	-65.4	3.552
49	-68.2	-65.2	3.515
50	-68.4	-65.3	3.315
51	-68.2	-65.5	3.187
52	-67.9	-65.3	3.208
53	-67.2	-65.4	2.932
54	-67.5	-65.3	2.718
55	-67	-65.2	2.595
56	-67.8	-65.1	2.348
57	-69.5	-64.9	2.650

58	-69.2	-65	2.518
59	-68.7	-64.8	2.058
60	-68.5	-64.6	1.878
61	-69.4	-64.8	1.722
62	-69.1	-64.5	1.745
63	-68.4	-64.6	0.342
64	-67.1	-64.7	0.941
65	-66	-64.9	0.393
66	-66.5	-65.1	-0.158
67	-67.1	-65.3	-0.095
68	-67.9	-65.1	-0.498
69	-68.4	-64.8	-0.736
70	-68.1	-64.6	-1.118
71	-68.4	-64.7	-1.998
72	-67.5	-64.9	-3.198
73	-65.8	-65	-4.137
74	-64.7	-65.1	-3.713
75	-64	-65.2	-4.068
76	-63.9	-65.1	-5.608
77	-63.5	-64.8	-5.470
78	-63.1	-64.9	-5.272
79	-63.4	-64.7	-15.903
80	-63	-64.8	-14.447
81	-63.4	-64.6	-18.801
82	-63.6	-64.9	-20.710
83	-64.1	-65.1	-22.046
84	-64.7	-65.3	-21.756
85	-65	-65.2	-22.470
86	-64.7	-65	-20.344
87	-64.8	-64.9	-21.749
88	-65.1	-64.7	-23.180
89	-65.3	-64.8	-23.601
90	-65.2	-64.9	-17.522
91	-65.1	-65.1	-12.055
92	-64.8	-65.3	-11.324
93	-64.5	-65.2	-10.748
94	-64.1	-65	-10.291
95	-64	-65.2	-9.017
96	-64.6	-65.3	-7.933
97	-65.1	-65.1	-7.383
98	-65.7	-64.9	-7.883
99	-66.1	-65	-7.203
100	-66.3	-65.1	-7.029
101	-66.2	-65.2	-7.243
102	-66.3	-65.3	-7.420
103	-66.1	-65.4	-7.625
104	-66.2	-65.6	-7.038
105	-66	-65.5	-6.878
106	-66.3	-65.6	-7.119
107	-66.5	-65.4	-6.891
108	-66.9	-65.5	-7.293
109	-67.3	-65.3	-4.237
110	-68.7	-65.1	-4.474
111	-68.2	-64.9	-4.688
112	-67.5	-65.1	-4.074
113	-67.1	-65.3	-4.197
114	-67	-65.5	-3.683
115	-66.8	-65.7	0.168
116	-67	-65.6	0.147
117	-67.1	-65.4	0.289
118	-67.4	-65.5	-0.148
119	-67.8	-65.3	1.113
120	-68.2	-65.5	0.785

121	-67.3	-65.2	1.335
122	-66.8	-65.3	4.036
123	-66.1	-65.5	5.772
124	-65.7	-65.6	5.658
125	-65	-65.5	6.148
126	-65.6	-65.7	5.792
127	-66.1	-65.8	5.801
128	-67.5	-65.9	6.021
129	-67.9	-66.1	6.022
130	-68.7	-66	6.073
131	-68.2	-66.2	6.179
132	-67.3	-66.3	6.399
133	-66.7	-66.2	6.659
134	-65.7	-66.3	6.209
135	-65.2	-66.4	6.341
136	-65.8	-66.1	6.478
137	-66.3	-66.3	6.599
138	-67.5	-66.2	6.199
139	-68.2	-66.4	6.395
140	-69.3	-66.5	6.039
141	-68.7	-66.3	6.419
142	-67.3	-66.5	6.216
143	-66.5	-66.6	6.117
144	-65.5	-66.7	6.505
145	-64.9	-66.5	6.666
146	-65.2	-66.7	7.117
147	-66.1	-66.5	6.209
148	-67.5	-66.6	6.385
149	-68.9	-66.7	6.244
150	-73.6	-66.5	5.969
151	-74.1	-66.6	6.674
152	-74.9	-66.7	6.446
153	-75.4	-66.8	6.491
154	-76.1	-66.9	6.092
155	-77	-67	6.644
156	-76.2	-66.8	6.039
157	-75.8	-67.1	6.351
158	-74.9	-67.3	6.540
159	-73.4	-67	6.944
160	-72.8	-67.2	6.129
161	-73.3	-67.6	6.435
162	-74.1	-67.5	6.835
163	-75.3	-67.8	6.826
164	-75.9	-67.9	7.272
165	-76.4	-68.1	6.744
166	-75.9	-67.9	5.551
167	-74.5	-68.2	5.955
168	-73.9	-68.3	6.513
169	-73.6	-68.5	5.854
170	-72.9	-68.4	6.368
171	-73.2	-68.6	5.853
172	-73.5	-68.8	6.340
173	-73.9	-68.9	6.212
174	-74.3	-69.1	5.986
175	-74.1	-69.2	6.080
176	-74.8	-69.4	5.460
177	-75.6	-69.6	5.410
178	-77.2	-68.5	4.985
179	-78.6	-68.7	4.618
180	-79.4	-69.8	4.530
181	-78.9	-69.7	4.791
182	-77.6	-69.6	4.321
183	-78.5	-69.4	5.446

184	-77.2	-69.3	4.902
185	-76.2	-69.1	4.916
186	-76.3	-68.8	5.598
187	-76.4	-68.6	5.279
188	-76.9	-68.5	5.243
189	-77.6	-68.2	5.242
190	-78.1	-67.9	4.889
191	-77.9	-67.8	4.838
192	-77.6	-68	4.934
193	-78.1	-67.8	5.324
194	-78.6	-67.5	5.369
195	-79.2	-67.7	5.137
196	-78.4	-67.5	5.822
197	-78.6	-67.3	5.268
198	-77.9	-67.1	5.601
199	-77.4	-67.2	6.211
200	-77	-67.3	6.001
201	-75.9	-67.4	5.730
202	-74.6	-67.3	5.498
203	-72.1	-67.5	5.946
204	-70.6	-67.8	6.163
205	-69.9	-67.6	6.276
206	-70.2	-67.9	6.632
207	-70.9	-67.7	6.122
208	-71.3	-68	5.981
209	-71.7	-67.8	5.805
210	-72.6	-68.1	6.194
211	-71.8	-67.9	5.753
212	-71.2	-67.8	5.675
213	-70.2	-68.1	5.706
214	-69.3	-68.2	6.057
215	-68.5	-68.1	5.565
216	-69.1	-68.1	6.164
217	-70.3	-68	6.403
218	-70.8	-67.9	7.243
219	-70.4	-67.8	7.046
220	-71.4	-67.8	7.177
221	-70.6	-67.9	7.182
222	-69.2	-68	7.398
223	-68.5	-67.9	7.448
224	-68.1	-67.8	7.624
225	-67.8	-67.8	7.644
226	-68.2	-67.7	7.280
227	-68.5	-67.6	6.700
228	-68.1	-67.8	6.747
229	-68.7	-67.6	6.626
230	-69.3	-67.6	6.277
231	-68.1	-67.2	6.488
232	-67.5	-67.4	5.547
233	-66.7	-67.1	5.656
234	-66.1	-67.2	5.348
235	-65.6	-67	5.862
236	-65.3	-66.9	5.462
237	-65.7	-66.8	5.433
238	-65.3	-66.7	4.957
239	-65.4	-66.8	4.890
240	-65.2	-66.6	5.433
241	-64.9	-66.7	5.225
242	-64.5	-66.5	4.553
243	-64.1	-66.4	4.482
244	-63.7	-66.2	4.685
245	-63.8	-66.3	4.454
246	-63.5	-66.2	4.803

247	-63.8	-65.9	4.251
248	-64.1	-66.1	4.400
249	-64.5	-66	3.998
250	-64.8	-65.9	3.839
251	-65.1	-65.7	3.254
252	-64	-65.6	3.755
253	-64.7	-65.5	3.252
254	-64.6	-65.7	3.800
255	-64.8	-65.8	3.332
256	-64.7	-65.6	3.598
257	-64.9	-65.4	1.826
258	-65.1	-65.5	2.701
259	-64.7	-65.3	2.367
260	-65.4	-65.4	2.232
261	-65.8	-65.3	1.640
262	-65.6	-65.2	1.361
263	-65.3	-65.1	1.164
264	-65.1	-65.3	0.755
265	-65.2	-65.2	0.593
266	-64.9	-65.1	-1.886
267	-64.7	-64.9	-2.528
268	-64.5	-64.8	-2.935
269	-64.1	-64.9	-3.304
270	-64.29	-64.9	-3.940
271	-64.1	-64.8	-4.791
272	-64.4	-64.7	-4.643
273	-64.7	-64.9	-4.955
274	-65.1	-65.1	-6.223
275	-65.7	-64.8	-6.233
276	-65.4	-64.9	-6.502
277	-65.8	-64.7	-7.234
278	-65.4	-64.8	-7.142
279	-65.6	-64.6	-7.903
280	-65.9	-64.5	-8.688
281	-65.7	-64.7	-9.757
282	-65.3	-64.8	-9.722
283	-64.9	-64.6	-10.871
284	-65.1	-64.5	-12.761
285	-64.7	-64.7	-13.607
286	-64.9	-64.8	-14.917
287	-64.5	-64.9	-16.400
288	-64.2	-64.7	-16.698
289	-64.3	-64.9	-19.288
290	-64.2	-65	-20.823
291	-64.6	-65.2	-20.085
292	-64.5	-65.1	-19.193
293	-64.8	-64.9	-17.603
294	-65.6	-65.2	-17.323
295	-66.4	-65.3	-14.777
296	-66.1	-65.4	-13.651
297	-65.8	-65.2	-12.317
298	-65.7	-65.1	-13.180
299	-65.8	-64.9	-10.246
300	-65.9	-64.8	-8.802
301	-66.3	-64.9	-8.029
302	-67.1	-65	-8.234
303	-66.7	-65.1	-7.789
304	-67.5	-65.2	-8.206
305	-68.7	-65.3	-6.353
306	-68.5	-65.1	-6.370
307	-68.7	-65.3	-4.396
308	-69.1	-65.4	-3.984
309	-69.6	-65.5	-3.957

310	-69.9	-65.6	-3.507
311	-69.5	-65.4	-3.663
312	-68.8	-65.3	-2.559
313	-68.3	-65.5	-2.786
314	-67.9	-65.7	-1.817
315	-67.4	-65.8	-2.201
316	-68.1	-65.4	-1.751
317	-68.5	-65.7	-1.366
318	-69.3	-64.9	-1.355
319	-70.5	-65.3	-0.952
320	-71.4	-64.8	-1.413
321	-71.5	-64.6	-1.146
322	-71	-64.9	-1.029
323	-71.3	-65.3	-0.937
324	-71.2	-65.1	0.166
325	-71	-64.9	0.357
326	-71.3	-65.4	0.144
327	-71.6	-65.8	0.158
328	-71.4	-66.2	0.483
329	-71.9	-65.7	1.804
330	-72.4	-65.1	2.865
331	-72.6	-65.6	3.257
332	-72.3	-66.1	2.904
333	-72.8	-65.6	2.973
334	-73.1	-65.1	3.324
335	-73.4	-64.7	3.388
336	-73.1	-64.8	3.291
337	-72.8	-64.6	3.166
338	-72.5	-64.9	3.356
339	-71.8	-64.5	3.429
340	-71.2	-64.8	3.508
341	-71.6	-64.9	3.162
342	-72.5	-64.7	2.992
343	-73.8	-65	3.147
344	-74.6	-64.8	3.008
345	-75.7	-65.1	2.500
346	-75.2	-64.9	2.618
347	-75	-65.2	2.653
348	-74.8	-64.9	2.490
349	-75.1	-64.7	2.490
350	-74.9	-64.8	2.492
351	-75.6	-64.6	2.192
352	-76.1	-64.7	2.020
353	-77.6	-64.6	2.246
354	-78.8	-64.5	2.084
355	-79.8	-64.6	2.015
356	-80.2	-64.7	2.144
357	-79.7	-64.8	2.342
358	-79.9	-64.7	2.620
359	-80.3	-64.8	2.271
360	-80	-64.6	2.295

Realizado por: Bonilla, M., 2023

Tabla Anexo B-2: Potencia captada a determinada distancia de la antena

Distancia [cm]	Pr1 [-10 dBm]	Pr2 [0 dBm]	Pr3 [10 dBm]	Pr4 [20 dBm]
2.5	-46.5	-38.6	-31.5	-20.5
5	-53.3	-44.4	-38.2	-24.8
7.5	-55.7	-47.1	-39.7	-26.7
10	-58.7	-50.1	-43.4	-30.9
12.5	-61.7	-52.2	-43.8	-32.2
15	-63.4	-53.1	-44.1	-33.9
17.5	-63.5	-54.4	-44.6	-35.2
20	-65.3	-55.9	-46.9	-35.7
22.5	-66.9	-56.6	-47.9	-36.1
25	-67.1	-56.9	-47.2	-36.8
27.5	-67.3	-58.4	-48.4	-37.2
30	-67.9	-59.8	-49.1	-38.9
35	-69.6	-59.7	-49.9	-39.2
40	-70.1	-60.1	-50.5	-39.6
45	-71.8	-60.3	-51.8	-40.1
50	-72.6	-60.6	-52.3	-41.3
55	-72.5	-60.7	-52.9	-42.5
60	-74	-60.9	-53.6	-43.1
65	-74.6	-61.2	-54	-43.9
70	-73.7	-61.5	-54.7	-44.6
75	-74.7	-61.8	-55.3	-45
80	-73.5	-62.4	-55.7	-45.7
85	-76.2	-62.9	-56.1	-46.3
90	-75.6	-63.6	-56.4	-46.8
95	-76.5	-64.2	-56.6	-47.2
100	-77.5	-65.5	-56.8	-47.9
110	-77.1	-65.7	-57.2	-48.2
120	-77.5	-66.2	-57.5	-48.5
130	-78.2	-66.8	-57.9	-48.8
140	-78.2	-67.5	-58.3	-49.2
150	-79.5	-68.9	-58.7	-49.6
160	-78.1	-69.1	-59.2	-50
170	-79.7	-69.4	-59.6	-50.3
180	-79.6	-69.7	-59.9	-50.5
190	-78.9	-69.9	-60.4	-50.8
200	-80.4	-70.1	-60.6	-51.1
220	-80.9	-70.6	-60.8	-51.9
240	-80.5	-71.2	-61	-52.8
260	-80.8	-71.7	-61.4	-53.7
280	-81.6	-72.1	-61.9	-53.9
300	-82.3	-72.5	-62.3	-54.2
320	-81.7	-72.8	-62.7	-53.9
340	-82.3	-73.1	-63.1	-54.5
360	-82.7	-73.5	-63.5	-54
380	-82.5	-73.8	-63.9	-54.5
400	-83.9	-74.2	-64.5	-54.9
420	-84.5	-74.9	-65.1	-54.4
440	-85.4	-75.8	-65.6	-54.7
460	-86.9	-76.5	-66.1	-54.6
480	-87.2	-77.2	-66.7	-54.8
500	-87.8	-77.4	-67.2	-54.7

Realizado por: Bonilla, M., 2023

Tabla Anexo B-3: Potencia captada en subportadoras de 15 KHz

F [MHz]	Pr [-10 dBm]	Pr [0 dBm]	Pr [10 dBm]	Pr [20 dBm]
3442.5	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3442.515	-88.3	-77.4	-66.8	-54.6
3442.53	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3442.545	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3442.56	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3442.575	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3442.59	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3442.605	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3442.62	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3442.635	-88.2	-77.8	-66.4	-54.6
3442.65	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3442.665	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3442.68	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3442.695	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3442.71	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3442.725	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3442.74	-87.4	-76.9	-67.2	-54.7
3442.755	-86.9	-77.3	-67.3	-54.4
3442.77	-87.5	-77.3	-67.4	-54.8
3442.785	-87.4	-77.6	-67.3	-54.6
3442.8	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3442.815	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3442.83	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3442.845	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3442.86	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3442.875	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3442.89	-87.8	-77.9	-66.7	-54.7
3442.905	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3442.92	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3442.935	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3442.95	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3442.965	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3442.98	-87.3	-77.5	-67.3	-54.6
3442.995	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3443.01	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3443.025	-87.6	-77.4	-66.5	-54.2
3443.04	-87.8	-77.6	-66.6	-54.4
3443.055	-88.2	-77.8	-66.8	-54.6
3443.07	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3443.085	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3443.1	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3443.115	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3443.13	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3443.145	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3443.16	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3443.175	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3443.19	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3443.205	-87.8	-77.4	-67.5	-54.8
3443.22	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3443.235	-87.6	-77.8	-67.1	-54.7
3443.25	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3443.265	-88.2	-77.4	-66.5	-54.1
3443.28	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3443.295	-87.6	-77.8	-66.8	-54.3
3443.31	-87.9	-77.5	-66.9	-54.5
3443.325	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3443.34	-87.4	-76.9	-67.8	-54.9
3443.355	-86.9	-77.1	-66.9	-54.4
3443.37	-87.5	-77.3	-67.2	-54.8
3443.385	-87.4	-77.5	-67.3	-54.6
3443.4	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7

3443.415	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3443.43	-87.6	-77.4	-66.5	-54.7
3443.445	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3443.46	-87.5	-77.8	-66.8	-54.3
3443.475	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3443.49	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3443.505	-87.6	-77.7	-66.9	-54.5
3443.52	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3443.535	-88.3	-77.4	-66.8	-54.6
3443.55	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3443.565	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3443.58	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3443.595	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3443.61	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3443.625	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3443.64	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3443.655	-88.2	-77.8	-66.4	-54.6
3443.67	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3443.685	-87.4	-77.4	-66.7	-54.7
3443.7	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3443.715	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3443.73	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3443.745	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3443.76	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3443.775	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3443.79	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3443.805	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3443.82	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3443.835	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3443.85	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3443.865	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3443.88	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3443.895	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3443.91	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3443.925	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3443.94	-87.4	-76.9	-66.2	-54.9
3443.955	-86.9	-76.9	-66.8	-54.4
3443.97	-87.5	-77.3	-67.5	-54.8
3443.985	-87.4	-77.6	-67.3	-54.6
3444	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3444.015	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3444.03	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3444.045	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3444.06	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3444.075	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3444.09	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3444.105	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3444.12	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3444.135	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3444.15	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3444.165	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3444.18	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3444.195	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3444.21	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3444.225	-88.3	-77.4	-66.8	-54.6
3444.24	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3444.255	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3444.27	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3444.285	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3444.3	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3444.315	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3444.33	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3444.345	-88.2	-77.8	-66.4	-54.6

3444.36	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3444.375	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3444.39	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3444.405	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3444.42	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3444.435	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3444.45	-87.4	-76.9	-66.8	-54.7
3444.465	-86.9	-77.1	-67.5	-54.4
3444.48	-87.5	-77.3	-67.5	-54.8
3444.495	-87.4	-77.6	-67.3	-54.6
3444.51	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3444.525	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3444.54	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3444.555	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3444.57	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3444.585	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3444.6	-87.8	-77.9	-66.7	-54.7
3444.615	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3444.63	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3444.645	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3444.66	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3444.675	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3444.69	-87.3	-77.5	-67.3	-54.6
3444.705	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3444.72	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3444.735	-87.6	-77.4	-66.5	-54.2
3444.75	-87.8	-77.6	-66.6	-54.4
3444.765	-88.2	-77.8	-66.8	-54.6
3444.78	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3444.795	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3444.81	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3444.825	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3444.84	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3444.855	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3444.87	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3444.885	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3444.9	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3444.915	-87.8	-77.4	-67.5	-54.8
3444.93	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3444.945	-87.6	-77.8	-67.1	-54.7
3444.96	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3444.975	-88.2	-77.4	-66.5	-54.1
3444.99	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3445.005	-87.6	-77.8	-66.8	-54.3
3445.02	-87.9	-77.5	-66.9	-54.5
3445.035	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3445.05	-87.4	-76.9	-67.7	-54.9
3445.065	-86.9	-77.2	-67.2	-54.4
3445.08	-87.5	-77.3	-67.3	-54.8
3445.095	-87.4	-77.5	-67.3	-54.6
3445.11	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3445.125	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3445.14	-87.6	-77.4	-66.5	-54.7
3445.155	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3445.17	-87.5	-77.8	-66.8	-54.3
3445.185	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3445.2	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3445.215	-87.6	-77.7	-66.9	-54.5
3445.23	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3445.245	-88.3	-77.4	-66.8	-54.6
3445.26	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3445.275	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3445.29	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6

3445.305	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3445.32	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3445.335	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3445.35	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3445.365	-88.2	-77.8	-66.4	-54.6
3445.38	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3445.395	-87.4	-77.4	-66.7	-54.7
3445.41	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3445.425	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3445.44	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3445.455	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3445.47	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3445.485	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3445.5	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3445.515	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3445.53	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3445.545	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3445.56	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3445.575	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3445.59	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3445.605	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3445.62	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3445.635	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3445.65	-87.4	-76.9	-66.2	-54.9
3445.665	-86.9	-76.8	-66.8	-54.4
3445.68	-87.5	-77.3	-67.5	-54.8
3445.695	-87.4	-77.6	-67.3	-54.6
3445.71	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3445.725	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3445.74	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3445.755	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3445.77	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3445.785	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3445.8	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3445.815	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3445.83	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3445.845	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3445.86	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3445.875	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3445.89	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3445.905	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3445.92	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3445.935	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3445.95	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3445.965	-88.2	-77.8	-66.8	-54.6
3445.98	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3445.995	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3446.01	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3446.025	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3446.04	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3446.055	-88.3	-77.4	-66.8	-54.6
3446.07	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3446.085	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3446.1	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3446.115	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3446.13	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3446.145	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3446.16	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3446.175	-88.2	-77.8	-66.4	-54.6
3446.19	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3446.205	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3446.22	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3446.235	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3

3446.25	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3446.265	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3446.28	-87.4	-76.9	-66.8	-54.7
3446.295	-86.9	-77.2	-67.1	-54.4
3446.31	-87.5	-77.3	-67.2	-54.8
3446.325	-87.4	-77.6	-67.3	-54.6
3446.34	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3446.355	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3446.37	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3446.385	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3446.4	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3446.415	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3446.43	-87.8	-77.9	-66.7	-54.7
3446.445	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3446.46	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3446.475	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3446.49	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3446.505	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3446.52	-87.3	-77.5	-67.3	-54.6
3446.535	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3446.55	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3446.565	-87.6	-77.4	-66.5	-54.2
3446.58	-87.8	-77.6	-66.6	-54.4
3446.595	-88.2	-77.8	-66.8	-54.6
3446.61	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3446.625	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3446.64	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3446.655	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3446.67	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3446.685	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3446.7	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3446.715	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3446.73	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3446.745	-87.8	-77.4	-67.5	-54.8
3446.76	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3446.775	-87.6	-77.8	-67.1	-54.7
3446.79	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3446.805	-88.2	-77.4	-66.5	-54.1
3446.82	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3446.835	-87.6	-77.8	-66.8	-54.3
3446.85	-87.9	-77.5	-66.9	-54.5
3446.865	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3446.88	-87.4	-76.9	-67.3	-54.9
3446.895	-86.9	-77.2	-67.1	-54.4
3446.91	-87.5	-77.3	-67.4	-54.8
3446.925	-87.4	-77.5	-67.3	-54.6
3446.94	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3446.955	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3446.97	-87.6	-77.4	-66.5	-54.7
3446.985	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3447	-87.5	-77.8	-66.8	-54.3
3447.015	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3447.03	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3447.045	-87.6	-77.7	-66.9	-54.5
3447.06	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3447.075	-88.3	-77.4	-66.8	-54.6
3447.09	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3447.105	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3447.12	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3447.135	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3447.15	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3447.165	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3447.18	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4

3447.195	-88.2	-77.8	-66.4	-54.6
3447.21	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3447.225	-87.4	-77.4	-66.7	-54.7
3447.24	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3447.255	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3447.27	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3447.285	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3447.3	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3447.315	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3447.33	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3447.345	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3447.36	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3447.375	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3447.39	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3447.405	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3447.42	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3447.435	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3447.45	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3447.465	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3447.48	-87.4	-76.9	-66.2	-54.9
3447.495	-86.9	-77.2	-66.8	-54.4
3447.51	-87.5	-77.3	-67.5	-54.8
3447.525	-87.4	-77.6	-67.3	-54.6
3447.54	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3447.555	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3447.57	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3447.585	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3447.6	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3447.615	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3447.63	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3447.645	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3447.66	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3447.675	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3447.69	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3447.705	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3447.72	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3447.735	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3447.75	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3447.765	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3447.78	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3447.795	-88.2	-77.8	-66.8	-54.6
3447.81	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3447.825	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3447.84	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3447.855	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3447.87	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3447.885	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3447.9	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3447.915	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3447.93	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3447.945	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3447.96	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3447.975	-87.6	-77.8	-67.1	-54.7
3447.99	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3448.005	-88.1	-77.4	-66.5	-54.1
3448.02	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3448.035	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3448.05	-87.9	-77.5	-67.1	-54.5
3448.065	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3448.08	-87.4	-76.9	-67.5	-54.9
3448.095	-86.9	-76.8	-67.8	-54.4
3448.11	-87.5	-77.3	-67.3	-54.8
3448.125	-87.4	-77.5	-67.3	-54.6

3448.14	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3448.155	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3448.17	-87.6	-77.4	-66.5	-54.7
3448.185	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3448.2	-87.5	-77.8	-66.8	-54.3
3448.215	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3448.23	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3448.245	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3448.26	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3448.275	-88.3	-77.4	-66.8	-54.6
3448.29	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3448.305	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3448.32	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3448.335	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3448.35	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3448.365	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3448.38	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3448.395	-87.4	-77.1	-67	-54.5
3448.41	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3448.425	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3448.44	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3448.455	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3448.47	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3448.485	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3448.5	-87.4	-77.9	-67.8	-54.9
3448.515	-87.8	-76.9	-67.9	-54.6
3448.53	-87.5	-77.3	-67.6	-54.8
3448.545	-87.4	-77.6	-67.3	-54.6
3448.56	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3448.575	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3448.59	-87.6	-77.5	-66.9	-54.2
3448.605	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3448.62	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3448.635	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3448.65	-87.7	-77.4	-66.8	-54.3
3448.665	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3448.68	-87.9	-77.8	-66.8	-54.5
3448.695	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3448.71	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3448.725	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3448.74	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3448.755	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3448.77	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3448.785	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3448.8	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3448.815	-87.6	-77.4	-66.4	-54.3
3448.83	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3448.845	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3448.86	-87.4	-76.9	-67.2	-54.9
3448.875	-87.8	-76.6	-66.5	-54.6
3448.89	-87.5	-77.3	-66.9	-54.8
3448.905	-87.4	-77.6	-67.3	-54.6
3448.92	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3448.935	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3448.95	-87.6	-77.3	-66.5	-54.2
3448.965	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3448.98	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3448.995	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3449.01	-87.7	-77.4	-66.8	-54.3
3449.025	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3449.04	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3449.055	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3449.07	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3

3449.085	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3449.1	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3449.115	-87.4	-77.1	-67	-54.5
3449.13	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3449.145	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3449.16	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3449.175	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3449.19	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3449.205	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3449.22	-87.4	-76.9	-66.2	-54.9
3449.235	-87.8	-76.6	-66.8	-54.6
3449.25	-87.5	-77.3	-66.6	-54.8
3449.265	-87.4	-77.6	-67.3	-54.6
3449.28	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3449.295	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3449.31	-88	-77.8	-67.1	-54.6
3449.325	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3449.34	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3449.355	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3449.37	-87.7	-77.4	-66.8	-54.3
3449.385	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3449.4	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3449.415	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3449.43	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3449.445	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3449.46	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3449.475	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3449.49	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3449.505	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3449.52	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3449.535	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3449.55	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3449.565	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3449.58	-87.4	-76.9	-65.8	-54.9
3449.595	-86.9	-77.1	-66.5	-54.4
3449.61	-87.5	-77.3	-65.9	-54.8
3449.625	-87.4	-77.6	-66.6	-54.6
3449.64	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3449.655	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3449.67	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3449.685	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3449.7	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3449.715	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3449.73	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3449.745	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3449.76	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3449.775	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3449.79	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3449.805	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3449.82	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3449.835	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3449.85	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3449.865	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3449.88	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3449.895	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3449.91	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3449.925	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3449.94	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3449.955	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3449.97	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3449.985	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3450	-87.8	-77.4	-67.2	-54.7
3450.015	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5

3450.03	-87.7	-77.4	-66.8	-54.3
3450.045	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3450.06	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3450.075	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3450.09	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3450.105	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3450.12	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3450.135	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3450.15	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3450.165	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3450.18	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3450.195	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3450.21	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3450.225	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3450.24	-87.4	-77.5	-66.4	-54.9
3450.255	-87.9	-77.6	-66.6	-54.4
3450.27	-87.6	-77.3	-66.9	-54.8
3450.285	-87.8	-77.6	-67.3	-54.6
3450.3	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3450.315	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3450.33	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3450.345	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3450.36	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3450.375	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3450.39	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3450.405	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3450.42	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3450.435	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3450.45	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3450.465	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3450.48	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3450.495	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3450.51	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3450.525	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3450.54	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3450.555	-88.2	-77.8	-66.8	-54.6
3450.57	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3450.585	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3450.6	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3450.615	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3450.63	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3450.645	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3450.66	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3450.675	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3450.69	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3450.705	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3450.72	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3450.735	-87.6	-77.8	-67.1	-54.7
3450.75	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3450.765	-88.1	-77.4	-66.5	-54.1
3450.78	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3450.795	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3450.81	-87.9	-77.5	-67.1	-54.5
3450.825	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3450.84	-87.4	-77.8	-66.8	-54.9
3450.855	-87.9	-78.2	-67.1	-54.4
3450.87	-88.3	-77.7	-67.4	-54.8
3450.885	-88.7	-77.5	-67.3	-54.6
3450.9	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3450.915	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3450.93	-87.6	-77.4	-66.5	-54.7
3450.945	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3450.96	-87.5	-77.8	-66.8	-54.3

3450.975	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3450.99	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3451.005	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3451.02	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3451.035	-88.3	-77.4	-66.8	-54.6
3451.05	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3451.065	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3451.08	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3451.095	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3451.11	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3451.125	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3451.14	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3451.155	-88.2	-77.8	-66.4	-54.6
3451.17	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3451.185	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3451.2	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3451.215	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3451.23	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3451.245	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3451.26	-88	-77.3	-67.5	-54.7
3451.275	-87.7	-77.1	-67.8	-54.4
3451.29	-87.5	-77.3	-67.6	-54.8
3451.305	-87.4	-77.6	-67.3	-54.6
3451.32	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3451.335	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3451.35	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3451.365	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3451.38	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3451.395	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3451.41	-87.8	-77.9	-66.7	-54.7
3451.425	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3451.44	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3451.455	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3451.47	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3451.485	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3451.5	-87.3	-77.5	-67.3	-54.6
3451.515	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3451.53	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3451.545	-87.6	-77.4	-66.5	-54.2
3451.56	-87.8	-77.6	-66.6	-54.4
3451.575	-88.2	-77.8	-66.8	-54.6
3451.59	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3451.605	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3451.62	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3451.635	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3451.65	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3451.665	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3451.68	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3451.695	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3451.71	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3451.725	-87.8	-77.4	-67.5	-54.8
3451.74	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3451.755	-87.6	-77.8	-67.1	-54.7
3451.77	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3451.785	-88.2	-77.4	-66.5	-54.1
3451.8	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3451.815	-87.6	-77.8	-66.8	-54.3
3451.83	-87.9	-77.5	-66.9	-54.5
3451.845	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3451.86	-87.4	-76.9	-66.4	-54.9
3451.875	-86.9	-77	-66.1	-54.4
3451.89	-87.5	-77.3	-66.3	-54.8
3451.905	-87.4	-77.5	-67.3	-54.6

3451.92	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3451.935	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3451.95	-87.6	-77.4	-66.5	-54.7
3451.965	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3451.98	-87.5	-77.8	-66.8	-54.3
3451.995	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3452.01	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3452.025	-87.6	-77.7	-66.9	-54.5
3452.04	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3452.055	-88.3	-77.4	-66.8	-54.6
3452.07	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3452.085	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3452.1	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3452.115	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3452.13	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3452.145	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3452.16	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3452.175	-88.2	-77.8	-66.4	-54.6
3452.19	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3452.205	-87.4	-77.4	-66.7	-54.7
3452.22	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3452.235	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3452.25	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3452.265	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3452.28	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3452.295	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3452.31	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3452.325	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3452.34	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3452.355	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3452.37	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3452.385	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3452.4	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3452.415	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3452.43	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3452.445	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3452.46	-87.4	-76.9	-66.2	-54.9
3452.475	-87.2	-76.5	-66.8	-54.4
3452.49	-87.5	-77.3	-67.5	-54.8
3452.505	-87.4	-77.6	-67.3	-54.6
3452.52	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3452.535	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3452.55	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3452.565	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3452.58	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3452.595	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3452.61	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3452.625	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3452.64	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3452.655	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3452.67	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3452.685	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3452.7	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3452.715	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3452.73	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3452.745	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3452.76	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3452.775	-88.2	-77.8	-66.8	-54.6
3452.79	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3452.805	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3452.82	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3452.835	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3452.85	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1

3452.865	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3452.88	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3452.895	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3452.91	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3452.925	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3452.94	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3452.955	-87.6	-77.8	-67.1	-54.7
3452.97	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3452.985	-88.1	-77.4	-66.5	-54.1
3453	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3453.015	-88.2	-77.8	-66.8	-54.7
3453.03	-87.9	-77.5	-67.1	-54.5
3453.045	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3453.06	-87.4	-76.9	-66.9	-54.9
3453.075	-86.9	-76.5	-67.1	-54.7
3453.09	-87.5	-77.3	-67.2	-54.8
3453.105	-87.4	-77.5	-67.3	-54.6
3453.12	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3453.135	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3453.15	-87.6	-77.4	-66.5	-54.7
3453.165	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3453.18	-87.5	-77.8	-66.8	-54.5
3453.195	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3453.21	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3453.225	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3453.24	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3453.255	-88.3	-77.4	-66.8	-54.6
3453.27	-87.6	-77.6	-67.3	-54.5
3453.285	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3453.3	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3453.315	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3453.33	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3453.345	-87.6	-77.4	-66.5	-54.2
3453.36	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3453.375	-88.2	-77.8	-66.4	-54.6
3453.39	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3453.405	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3453.42	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3453.435	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3453.45	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3453.465	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3453.48	-87.4	-77.2	-67.1	-54.7
3453.495	-87.8	-77.3	-67.3	-54.4
3453.51	-87.5	-77.3	-67.5	-54.8
3453.525	-87.4	-77.6	-67.3	-54.6
3453.54	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3453.555	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3453.57	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3453.585	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3453.6	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3453.615	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3453.63	-87.8	-77.9	-66.7	-54.7
3453.645	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3453.66	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3453.675	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3453.69	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3453.705	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3453.72	-87.3	-77.5	-67.3	-54.6
3453.735	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3453.75	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3453.765	-87.6	-77.4	-66.5	-54.2
3453.78	-87.8	-77.6	-66.6	-54.4
3453.795	-88.2	-77.8	-66.8	-54.6

3453.81	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3453.825	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3453.84	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3453.855	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3453.87	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3453.885	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3453.9	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3453.915	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3453.93	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3453.945	-87.8	-77.4	-67.5	-54.8
3453.96	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3453.975	-87.6	-77.8	-67.1	-54.7
3453.99	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3454.005	-88.2	-77.4	-66.5	-54.1
3454.02	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3454.035	-87.6	-77.8	-66.8	-54.3
3454.05	-87.9	-77.5	-66.9	-54.5
3454.065	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3454.08	-87.4	-77.6	-66.8	-54.9
3454.095	-87.3	-77.5	-66.7	-54.4
3454.11	-87.5	-77.3	-66.9	-54.8
3454.125	-87.4	-77.5	-67.3	-54.6
3454.14	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3454.155	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3454.17	-87.6	-77.4	-66.5	-54.7
3454.185	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3454.2	-87.5	-77.8	-66.8	-54.3
3454.215	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3454.23	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3454.245	-87.6	-77.7	-66.9	-54.5
3454.26	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3454.275	-88.3	-77.4	-66.8	-54.6
3454.29	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3454.305	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3454.32	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3454.335	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3454.35	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3454.365	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3454.38	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3454.395	-88.2	-77.8	-66.4	-54.6
3454.41	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3454.425	-87.4	-77.4	-66.7	-54.7
3454.44	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3454.455	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3454.47	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3454.485	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3454.5	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3454.515	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3454.53	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3454.545	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3454.56	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3454.575	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3454.59	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3454.605	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3454.62	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3454.635	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3454.65	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3454.665	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3454.68	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3454.695	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3454.71	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3454.725	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3454.74	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4

3454.755	-88.2	-77.8	-66.8	-54.6
3454.77	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3454.785	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3454.8	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3454.815	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3454.83	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3454.845	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3454.86	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3454.875	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3454.89	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3454.905	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3454.92	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3454.935	-87.6	-77.8	-67.1	-54.7
3454.95	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3454.965	-88.1	-77.4	-66.5	-54.1
3454.98	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3454.995	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3455.01	-87.9	-77.5	-67.1	-54.5
3455.025	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3455.04	-87.4	-76.9	-67.5	-54.9
3455.055	-86.9	-76.5	-67.8	-54.4
3455.07	-87.5	-77.3	-66.9	-54.8
3455.085	-87.4	-77.5	-67.3	-54.6
3455.1	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3455.115	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3455.13	-87.6	-77.4	-66.5	-54.7
3455.145	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3455.16	-87.5	-77.8	-66.8	-54.3
3455.175	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3455.19	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3455.205	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3455.22	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3455.235	-88.3	-77.4	-66.8	-54.6
3455.25	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3455.265	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3455.28	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3455.295	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3455.31	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3455.325	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3455.34	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3455.355	-88.2	-77.8	-66.4	-54.6
3455.37	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3455.385	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3455.4	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3455.415	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3455.43	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3455.445	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3455.46	-87.4	-76.9	-67.1	-54.7
3455.475	-86.9	-76.5	-67.5	-54.4
3455.49	-87.5	-77.3	-66.8	-54.8
3455.505	-87.4	-77.6	-67.3	-54.6
3455.52	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3455.535	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3455.55	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3455.565	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3455.58	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3455.595	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3455.61	-87.8	-77.9	-66.7	-54.7
3455.625	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3455.64	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3455.655	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3455.67	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3455.685	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8

3455.7	-87.3	-77.5	-67.3	-54.6
3455.715	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3455.73	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3455.745	-87.6	-77.4	-66.5	-54.2
3455.76	-87.8	-77.6	-66.6	-54.4
3455.775	-88.2	-77.8	-66.8	-54.6
3455.79	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3455.805	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3455.82	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3455.835	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3455.85	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3455.865	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3455.88	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3455.895	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3455.91	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3455.925	-87.8	-77.4	-67.5	-54.8
3455.94	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3455.955	-87.6	-77.8	-67.1	-54.7
3455.97	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3455.985	-88.2	-77.4	-66.5	-54.1
3456	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3456.015	-87.6	-77.8	-66.8	-54.3
3456.03	-87.9	-77.5	-66.9	-54.5
3456.045	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3456.06	-87.4	-76.9	-67.4	-54.9
3456.075	-86.9	-77.2	-67.5	-54.4
3456.09	-87.5	-77.3	-66.9	-54.8
3456.105	-87.4	-77.5	-67.3	-54.6
3456.12	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3456.135	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3456.15	-87.6	-77.4	-66.5	-54.7
3456.165	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3456.18	-87.5	-77.8	-66.8	-54.3
3456.195	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3456.21	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3456.225	-87.6	-77.7	-66.9	-54.5
3456.24	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3456.255	-88.3	-77.4	-66.8	-54.6
3456.27	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3456.285	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3456.3	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3456.315	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3456.33	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3456.345	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3456.36	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3456.375	-88.2	-77.8	-66.4	-54.6
3456.39	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3456.405	-87.4	-77.4	-66.7	-54.7
3456.42	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3456.435	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3456.45	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3456.465	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3456.48	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3456.495	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3456.51	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3456.525	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3456.54	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3456.555	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3456.57	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3456.585	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3456.6	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3456.615	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3456.63	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5

3456.645	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3456.66	-87.4	-76.9	-66.2	-54.9
3456.675	-86.9	-76.5	-66.8	-54.4
3456.69	-87.5	-77.3	-67.5	-54.8
3456.705	-87.4	-77.6	-67.3	-54.6
3456.72	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3456.735	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3456.75	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3456.765	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3456.78	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3456.795	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3456.81	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3456.825	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3456.84	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3456.855	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3456.87	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3456.885	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3456.9	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6
3456.915	-87.6	-77.3	-67.2	-54.7
3456.93	-87.9	-77.5	-66.8	-54.4
3456.945	-87.6	-77.4	-66.5	-54.1
3456.96	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3456.975	-88.2	-77.8	-66.8	-54.6
3456.99	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3457.005	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3457.02	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3457.035	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3457.05	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3457.065	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3457.08	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3457.095	-88.1	-77.4	-66.8	-54.1
3457.11	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3457.125	-87.8	-77.4	-67.1	-54.8
3457.14	-87.5	-77.6	-67.3	-54.6
3457.155	-87.6	-77.8	-67.1	-54.7
3457.17	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3457.185	-88.1	-77.4	-66.5	-54.1
3457.2	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3457.215	-88.2	-77.8	-66.8	-54.3
3457.23	-87.9	-77.5	-67.1	-54.5
3457.245	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3457.26	-87.4	-76.9	-66.9	-54.9
3457.275	-86.9	-76.8	-67.1	-54.4
3457.29	-87.5	-77.3	-67.1	-54.8
3457.305	-87.4	-77.5	-67.3	-54.6
3457.32	-87.6	-77.3	-67.1	-54.7
3457.335	-87.9	-77.5	-66.8	-54.3
3457.35	-87.6	-77.4	-66.5	-54.7
3457.365	-87.8	-77.6	-66.7	-54.4
3457.38	-87.5	-77.8	-66.8	-54.3
3457.395	-87.9	-77.5	-66.5	-54.5
3457.41	-87.8	-77.3	-66.7	-54.7
3457.425	-87.6	-77.7	-66.9	-54.2
3457.44	-87.8	-77.6	-66.7	-54.3
3457.455	-88.3	-77.4	-66.8	-54.6
3457.47	-87.6	-77.6	-67.3	-54.3
3457.485	-87.7	-77.4	-67.1	-54.8
3457.5	-87.5	-77.5	-67.3	-54.6

Realizado por: Bonilla, M., 2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE
CHIMBORAZO



DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL
APRENDIZAJE

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 23/10/2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR	
Nombres – Apellidos:	Martin Fabricio Bonilla Erazo
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL	
Facultad:	Informática y Electrónica
Carrera:	Telecomunicaciones
Título a optar:	Ingeniería en Telecomunicaciones
f. Analista de Biblioteca responsable:	 Ing. Fernanda Arevalo M.

