FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

Monografía para optar al Título de:

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Tema:

Diseño de un sistema de antenas integrado con amplificación y tecnologías avanzadas MIMO y Beamforming para mejorar el acceso a la red telefónica en la comunidad David Tejada durante el primer semestre de 2025

Autor:

Br. Ronaldo Alberto Cubas López

Tutor:

PhD. Ainoa Calero Castro

Managua, Nicaragua Julio 2025

"Donde la tecnología alcanza, la distancia se desvanece"

-Ronaldo Cubas

Dedicatoria

Llega un momento en la vida en que todo cambia: nuestra forma de ver el mundo y a nosotros mismos. Dedico este trabajo, con todo mi corazón, a mi papá, quien estuvo presente durante gran parte del proceso, aunque no pudo ver el final. A mi hermano, que se esfuerza cada día por construir un futuro mejor y a quien quiero profundamente. Pero, sobre todo, a mi mamá, nuestra guerrera incansable, que siempre va al frente y también permanece al final. La amo y la adoro con todo mi ser. Todo siempre es por ella.

A mis mejores amigos que aprecio demasiado que desde mucho antes me llaman ingeniero; **José, Sarahi, Julissa** y a mi mejor amiga **Eymi**, quien extraño mucho, y que aunque lejos, siempre celebra mis logros como propios. Gracias por cada palabra de aliento, por sostenerme y escucharme cuando más lo necesito, y por todos los momentos de alegría que me regalan.

Y, por último, pero no menos importante, a mis fieles compañeros: **Kayser, Florcita y Doky,** cuyas muestras de amor y ternura completan lo que muchas veces me falta.

Ronaldo.

Agradecimientos

Agradezco, en primer lugar, al Ser Supremo que me renueva el aliento cada mañana y me ha permitido llegar hasta aquí. A mis seres queridos, por acompañarme en este largo camino con su amor y presencia constante.

A mi papá, **Higinio Cubas**, por haberme guiado en el camino que solo él sabía recorrer.
A mi mamá, **Ramona López,** por estar siempre a mi lado, brindándome todo su amor y apoyo incondicional.
A mi hermano**, Ronaldo Israel Cubas**, por estar ahí para quererme y apoyarme siempre.

Con especial gratitud, a la mejor coordinadora, la **Ingeniera María Mercedes Orozco**, por su comprensión y respaldo en uno de los momentos más difíciles de mi vida académica, permitiéndome seguir adelante con mis estudios.

A la **Doctora Ainoa Calero Castro**, tutora de esta monografía, por su orientación, disposición, compromiso e inmensa amabilidad durante todo el proceso. Su guía ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo.

Y finalmente, a mi estimado profesor, el **Doctor Jorge Palacios Linarte**, por su infinita paciencia y amabilidad al aclararme cada duda durante tantas clases, y principalmente, por haber escuchado la idea de este proyecto y motivarme a llevarla adelante hasta el final.

A todos ustedes: gracias, de corazón.

Índice

1. Resumen 15

2. Introducción 16

3. Justificación 17

4. Planteamiento del problema 19

5. Objetivos 20

5.1. Objetivo General 20

5.2. Objetivos Específicos 20

6. Marco Referencial 21

6.1. Antecedentes 21

6.2. Sustento Teórico 22

6.2.1. Telecomunicación 22

6.2.2. Radiocomunicación 23

6.2.3. Espectro Radioeléctrico 24

6.2.4. Operador 25

6.2.5. Antena 25

6.2.6. Antena de bocina 26

6.2.7. Ganancia de una antena 28

6.2.8. Ancho de anda 29

6.2.9. Tecnología MIMO 30

6.2.10. Técnica de Beamforming 32

6.2.11. Amplificación 34

6.2.12. Filtro Pasabanda Microstrip 37

6.2.13. Regulaciones y Normativas de Telecomunicaciones en Nicaragua 37

6.2.13.1. Ley No. 1223, Ley General de Telecomunicaciones Convergentes..... 38

6.2.13.2. Ley No. 843, Ley que regula la ubicación, construcción e instalación de estructuras de soporte para equipos de telecomunicaciones que hacen uso del espectro radioeléctrico 40

7. Diseño Metodológico 44

7.1. Enfoque de Investigación 44

7.2. Variables / Categorías de Estudio 45

7.3. Sujetos de Investigación..... 48

7.4. Población..... 49

7.5. Muestra..... 49

7.6. Técnicas e Instrumentos 51

7.7. Procedimiento 51

8. Resultados 55

8.1. Resultados del objetivo específico #1: Analizar el acceso a las redes telefónicas y a la comunicación en la comunidad rural “David Tejada” perteneciente a Bocana de Paiwas-RACCS.. 55

8.1.1. Aplicación de las encuestas..... 55

8.1.1.1. Resultados de Encuesta 1: Sector Estudiantil (12-20 años) 55

8.1.1.2. Resultados de Encuesta 2: Sector Adulto Productivo (21-50 años). 62

8.2. Resultados del objetivo específico #2: Crear el diseño de un sistema de antenas de acuerdo con la Ley No. 1223, Ley General de Telecomunicaciones Convergentes y la Ley No. 843, Ley que Regula la Ubicación, Construcción e Instalación de Estructuras de Soporte para Equipos de Telecomunicaciones que Hacen Uso del Espectro Radioeléctrico..... 70

8.2.1. Diseño de la Antena de bocina receptora 72

8.2.2. Diseño de Filtro pasa banda 88

8.2.3. Diseño del Amplificador de bajo ruido LNA (Low Noise Amplifier) CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)..... 96

8.2.4. Diseño de Antenas sectoriales con tecnología MIMO adaptadas para Beamforming 104

8.3. Resultados del objetivo específico #3: Valorar la propuesta de diseño del sistema de antenas con expertos cualificados. 113

8.3.1. Resultado de la encuesta a expertos 113

9. Análisis de Resultados 130

9.1. Análisis de resultados del objetivo específico #1 Analizar el acceso a las redes telefónicas y a la comunicación en la comunidad rural “David Tejada” perteneciente a Bocana de Paiwas-RACCS. 130

9.1.1. Análisis del sector estudiantil (n = 30) 130

9.1.2. Análisis del sector adulto productivo (n = 40) 131

9.2. Análisis de resultados del objetivo específico #2 Crear el diseño inicial de un sistema de antenas de acuerdo con la Ley No. 1223, Ley General de Telecomunicaciones Convergentes, y la Ley No. 843, que regula la ubicación, construcción e instalación de estructuras de soporte para equipos de telecomunicaciones que hacen uso del espectro radioeléctrico..... 132

9.2.1. Análisis de diseño de la Antena de bocina receptora 132

9.2.2. Análisis de diseño de Filtro pasa banda 133

9.2.3. Análisis de diseño del Amplificador de bajo ruido LNA (Low Noise Amplifier) CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)..... 134

9.2.4. Análisis de diseño de Antenas sectoriales con tecnología MIMO adaptadas para Beamforming..... 135

9.3. Análisis de resultados del objetivo específico #3: Valorar la propuesta de diseño del sistema de antenas con expertos cualificados. 137

9.3.1. Análisis de resultados del apartado del diseño completo 137

9.3.2. Análisis de resultados del apartado de diseño de la antena de bocina receptora..... 137

9.3.3. Análisis de resultados del apartado de diseño del Filtro Pasabanda Chebyshey de 5to orden con topología interdigital 138

9.3.4. Análisis de resultados del apartado de diseño del amplificador de bajo ruido LNA CMOS 139

9.3.5. Análisis de resultados del apartado de diseño de antenas sectoriales con tecnología MIMO adaptadas para Beamforming 140

10. Conclusiones 143

11. Recomendaciones 145

12. Referencias Bibliográficas 147

13. Anexos 151

Anexo A, Vista satelital oblicua de la comunidad David Tejada, Bocana de Paiwas RACCS 151

Anexo B, Mediciones de señal en la comunidad David Tejada, Bocana de Paiwas RACCS 152

Anexo C, Seguimiento de las mediciones de la señal en la comunidad David Tejada, Bocana de Paiwas RACCS 153

Anexo D, Encuesta 1: Sector Estudiantil (12-20 años) 154

Anexo E, Encuesta 2: Sector Adulto Productivo (21-50 años) 155

Anexo F, Aplicación de encuestas a personas seleccionadas en la comunidad David Tejada, Bocana de Paiwas RACCS 158

Anexo G, Aplicación de encuestas al sector estudiantil en la escuela de la comunidad David Tejada Bocana de Paiwas RACCS 159

Anexo H, Encuesta de validación del diseño propuesto con expertos cualificados 160

Anexo I, Aplicación de encuestas de validación de diseño propuesto a expertos 176

Índice de figuras

Figura 1 Esquema básico de un sistema de telecomunicaciones....23
Figura 2 Generación de una Onda Electromagnética....24
Figura 3 Espectro Radioeléctrico....24
Figura 4 Planes Claro Hogar....25
Figura 5 Funcionamiento de una antena....26
Figura 6 Catalogo de antenas de bocina....27
Figura 7 Escala de ganancias en dbi....28
Figura 8 Tecnología Massive MIMO....31
Figura 9 Tecnología Beamforming en las Redes 5G....33
Figura 10 Amplificación....35
Figura 11 Amplificador bajo ruido (LNA)....36
Figura 12 Práctico filtro paso banda Microstrip 2,4 GHZ para mejorar relación señal-ruido....37
Figura 13 ¿Cuántos años tienes? Encuesta#1....56
Figura 14 ¿Usas tu teléfono móvil para acceder a internet? Encuesta#1....56
Figura 15 ¿Qué tan seguido usas internet en tu teléfono móvil? Encuesta#1....57
Figura 16 ¿Para qué actividades usas internet en tu teléfono móvil? Encuesta#1....58
Figura 17 ¿Cuánta dificultad tienes para cargar o ver contenidos en internet (como videos, páginas educativas, etc.)? Encuesta#1....59
Figura 18 ¿La calidad de la señal (2G, 3G, 4G) afecta tu capacidad para estudiar o hacer tareas en línea? Encuesta#1....59
Figura 19 ¿Has tenido alguna vez dificultades para participar en clases virtuales o hacer tareas debido a la mala calidad de la red? Encuesta#1....60
Figura 20 ¿Qué tipo de señal capta en tu teléfono móvil? Encuesta#1....61
Figura 21 ¿Qué tan rápido o lento consideras que es el internet en tu teléfono móvil? Encuesta#1....61
Figura 22 Si pudieras mejorar la señal de internet, ¿preferirías tener acceso a 4G LTE? Encuesta#1....62
Figura 23 ¿Cuántos años tienes? Encuesta#2....63

Figura 24 ¿Usas tu teléfono móvil para acceder a internet en tu trabajo o uso personal? Encuesta#2 63
Figura 25 ¿Qué tan seguido usas internet en tu teléfono móvil para el trabajo o negocio? Encuesta#2 64
Figura 26 ¿Para qué actividades usas internet en tu teléfono móvil para el trabajo? Encuesta#2 65
Figura 27 ¿Cómo calificarías la calidad de la señal para realizar tus actividades laborales en línea? Encuesta#2 66
Figura 28 ¿Has tenido problemas para realizar pagos en línea o comunicarte con clientes o proveedores debido a la mala calidad de la señal? Encuesta#2 66
Figura 29 ¿Qué tipo de señal captas en tu teléfono móvil? Encuesta#2 67
Figura 30 ¿Consideras que la velocidad de internet (2G, 3G) afecta negativamente tu productividad laboral? Encuesta#2 68
Figura 31 ¿Te gustaría tener acceso a una mejor señal, como 4G LTE, para mejorar tu negocio o trabajo? Encuesta#2 68
Figura 32 ¿Estarías dispuesto a pagar más por un servicio de internet de mejor calidad para tu uso personal y/o negocio? Encuesta#2 69
Figura 33 ¿Considera que las instalaciones de telecomunicaciones en su comunidad (David Tejada) son suficientes para cubrir sus necesidades de comunicación y acceso a Internet? Encuesta#2 70
Figura 34 Diseño inicial de un sistema de antenas integrado con amplificación y tecnologías avanzadas de MIMO y Beamforming 71
Figura 35 Partes de una antena de bocina piramidal de MATLAB 78
Figura 36 Antena de bocina obtenida, Vista en perspectiva 3D 79
Figura 37 Vista XY del modelo simulado de la antena de bocina rectangular 80
Figura 38 Vista XZ del modelo simulado de la antena de bocina rectangular 80
Figura 39 Vista YZ del modelo simulado de la antena de bocina rectangular 81
Figura 40 Patrón de radiación en 3D de la antena de bocina rectangular a 2.6 GHz 82
Figura 41 Curva del coeficiente de reflexión (S_{11}) de la antena de bocina rectangular en el dominio de frecuencia 83

Figura 42 Patrón de radiación en el plano azimutal de la antena de bocina rectangular a 2.6 GHz 85
Figura 43 Patrón de radiación en el plano de elevación de la antena de bocina a 2.6 GHz 86
Figura 44 Dimensiones del filtro pasabanda Chebyshev de 5.º orden con topología interdigital (Marki Microwave) 93
Figura 45 Vista general del layout del filtro pasabanda Chebyshev de 5.º orden (topología interdigital) 94
Figura 46 Respuesta en frecuencia del filtro pasabanda Chebyshev de 5.º orden (S_{21} y S_{11}) 95
Figura 47 Fase de transmisión (S_{21} Phase) y retardo de grupo del filtro pasabanda Chebyshev de 5.º orden 96
Figura 48 Esquema del amplificador LNA CMOS con degeneración inductiva 103
Figura 49 Distribución física del arreglo MIMO 4×4 para la antena sectorial 108
Figura 50 Patrón tridimensional de radiación del arreglo MIMO 4×4 a 2.6 GHz 109
Figura 51 Vista superior (XY) del patrón de radiación del arreglo MIMO 4×4 a 2.6 GHz 110
Figura 52 Vista lateral (XZ) del patrón de radiación del arreglo MIMO 4×4 a 2.6 GHz 111
Figura 53 Vista lateral (YZ) del patrón de radiación del arreglo MIMO 4×4 a 2.6 GHz 112
Figura 54 Valoración del nivel de completitud del diseño propuesto por expertos 114
Figura 55 Evaluación de la adecuación de la antena de bocina piramidal para captar señal LTE en 2.6 GHz 115
Figura 56 Opinión sobre la capacidad de orientación precisa de la antena como enlace punto a punto 115
Figura 57 Evaluación del uso del aluminio como material conductor en la antena 116
Figura 58 Valoración de la ganancia simulada de 21.54 dBi para captar señal LTE en zonas elevadas 116
Figura 59 Evaluación del ancho de banda operativo de 470 MHz para cubrir la banda 7 LTE 117
Figura 60 Opinión sobre la suficiencia del ancho de banda fraccional del 18 % para aplicaciones LTE 117
Figura 61 Evaluación de la eficiencia teórica del 84 % de la antena propuesta 118
Figura 62 Valoración de la selección del filtro pasabanda microstrip Chebyshev de 5.º orden 119

Figura 63 Evaluación del comportamiento del filtro pasabanda según la curva de S-parámetros 119
Figura 64 Evaluación de la adecuación del LNA CMOS con degeneración inductiva para 2.6 GHz 120
Figura 65 Evaluación de la corrección y justificación de los cálculos del circuito LNA CMOS 120
Figura 66 Opinión sobre el uso del modelo de transconductancia y resonancia para adaptación de impedancia 121
Figura 67 Evaluación de la claridad y coherencia del diagrama esquemático del circuito 122
Figura 68 Valoración del nivel de detalle técnico incluido en el diseño del LNA CMOS 122
Figura 69 Claridad en la integración entre el filtro pasabanda microstrip y el LNA 123
Figura 70 Evaluación de la pertinencia del libro RF Microelectronics de Behzad Razavi como base del diseño del LNA CMOS 123
Figura 71 Valoración de la elección del arreglo MIMO 4×4 para cobertura eficiente en el sistema de retransmisión 124
Figura 72 Opinión sobre la adecuación del uso de antenas de parche microstrip en sistemas de arrays 124
Figura 73 Evaluación de la viabilidad técnica y económica del substrato Rogers RO4003C en el contexto nacional 125
Figura 74 Valoración de la suficiencia de la ganancia de 20 dBi para la retransmisión de señal LTE en la zona objetivo 126
Figura 75 Evaluación de la confiabilidad del sistema con configuración MIMO ante fallos de lóbulos de señal 126
Figura 76 Evaluación de la aplicabilidad de la tecnología MIMO en zonas rurales del contexto nacional 127
Figura 77 Vista satelital oblicua de la comunidad David Tejada, Bocana de Paiwas (RACCS) 151
Figura 78 Punto alto de medición de señal en la comunidad David Tejada para ubicación de la antena receptora 152
Figura 79 Parte de las mediciones de señal realizadas 153
Figura 80 Aplicación de encuestas a pobladores de la comunidad David Tejada 158

Figura 81 Aplicación de encuestas al sector estudiantil en la escuela de la comunidad David Tejada 159
Figura 82 Aplicación de la encuesta a expertos en telecomunicaciones 176

Índice de Tablas

Tabla 1 Escalas de directividad típica de diferentes tipos de antenas 29
Tabla 2 Especificaciones de la Banda 7 LTE 30
Tabla 3 Variables / Categorías de Estudio.....45
Tabla 4 Procedimiento.....51
Tabla 5 Tabla de parámetros a utilizar para el diseño de la antena de bocina.....73
Tabla 6 Parámetros de diseño del filtro pasabanda microstrip tipo Chebyshev para Marki Microwave 91
Tabla 7 Valores del Amplificador LNA adaptado a 2.6 GHz 102
Tabla 8 Propiedades del array de antenas rectangular.....104
Tabla 9 Propiedades de cada Microstrip de las atena 105
Tabla 10 Propiedades del Sustrato por usar.....106
Tabla 11 Propiedades del Conductor por usar 107
Tabla 12 Encuesta 1: Sector Estudiantil (12-20 años).....154
Tabla 13 Encuesta 2: Sector Adulto Productivo (21-50 años) 155
Tabla 14 Encuesta de validación del flujo del sistema completo 160
Tabla 15 Encuesta de validación de geometría de la antena receptora.....161
Tabla 16 Encuesta de validación del diseño del filtro pasabanda 165
Tabla 17 Encuesta de validación de adaptación del filtro LNA CMOS a 2.6GHz 169
Tabla 18 Encuesta de validación del diseño de antenas sectoriales con tecnología MIMO adaptadas para Beamforming 172

1. Resumen

La presente investigación aborda la deficiente cobertura de red telefónica en la comunidad rural David Tejada, un problema que, debido a la geografía montañosa, limita el desarrollo educativo y productivo de sus habitantes al no poder acceder a la señal LTE; la cual es la banda óptima para navegar por internet. El objetivo general fue diseñar un sistema de antenas integrado con amplificación y tecnologías MIMO y Beamforming para mejorar el acceso a dicha red.

El diseño metodológico tuvo un enfoque mixto: se inició con un diagnóstico mediante encuestas al sector estudiantil y productivo que evidenciaron la mala calidad de la señal y una alta demanda de conectividad LTE. Posteriormente, se diseñaron y simularon los componentes clave del sistema y finalmente se realizó una encuesta sobre los resultados técnicos obtenidos en las simulaciones del sistema a expertos cualificados para validar el diseño.

Como resultado, se obtuvo una antena de bocina receptora con 21.54 dBi de ganancia, 25.49 de directividad y 84% de eficiencia; un filtro pasabanda Chebyshev de 5.º orden con buen comportamiento para la banda de 2.6 GHz; un amplificador de bajo ruido (LNA) CMOS dimensionado teóricamente; y un arreglo de antenas MIMO 4x4 para la retransmisión sectorial con una ganancia de 20 dBi. La propuesta fue validada por expertos en telecomunicaciones, quienes expresaron que era muy importante ya que busca el desarrollo de una comunidad y también la calificaron como una solución moderna, coherente y aplicable en el contexto nicaragüense, se concluyó que el sistema propuesto es técnica y económicamente viable para zonas rurales, mejora significativamente el acceso a servicios en línea y establece bases sólidas para una futura implementación con beamforming adaptativo.

2. Introducción

En la actualidad, el acceso a servicios de telecomunicaciones confiables se ha vuelto indispensable para el desarrollo social, educativo y económico de las comunidades. La conectividad móvil permite a las personas comunicarse, acceder a plataformas educativas, participar en actividades productivas y conectarse con oportunidades a nivel local y global. Sin embargo, muchas zonas rurales aún enfrentan serias limitaciones en cobertura debido a factores geográficos, económicos y de infraestructura.

La comunidad de David Tejada, ubicada en una zona montañosa y boscosa, es un claro ejemplo de esta problemática. Aunque en ciertos puntos elevados se puede captar señal LTE de alta velocidad, todo el territorio donde están las viviendas no cuenta con cobertura. Esta situación afecta principalmente a estudiantes, pequeños productores agrícolas y emprendedores locales, quienes dependen de la conectividad para acceder a recursos educativos, técnicos y comerciales.

Ante esta realidad, el presente estudio propone el diseño inicial de un sistema de antenas que permita captar la señal LTE disponible en los puntos más altos de la comunidad, procesarla mediante técnicas de filtrado y amplificación, y redistribuirla hacia las zonas con baja cobertura, utilizando antenas sectoriales con tecnologías MIMO (Multiple Input Multiple Output) y Beamforming. Esta propuesta será desarrollada y validada mediante simulaciones técnicas avanzadas, permitiendo evaluar su viabilidad sin requerir una implementación física inmediata.

La finalidad de esta investigación es ofrecer una solución técnica eficiente, de bajo costo y adaptada al contexto rural, que sirva como base para futuros desarrollos en comunidades con condiciones similares. Al mejorar la cobertura de red, se espera contribuir al cierre de la brecha digital, promoviendo una mayor inclusión tecnológica en estos sectores.

3. Justificación

La comunidad de David Tejada, ubicada en una zona montañosa y boscosa del país, enfrenta limitaciones significativas en el acceso a servicios de telecomunicaciones, particularmente en la cobertura de la red telefónica móvil. A pesar de que en ciertos puntos elevados se puede captar señal LTE de alta velocidad, la mayoría de los habitantes carece de conectividad confiable debido a la geografía irregular del terreno y la escasa presencia de infraestructura de telecomunicaciones.

En la actualidad, la conectividad a redes móviles y el acceso a internet se han vuelto fundamentales tanto para la vida cotidiana como para el desarrollo profesional. Las comunidades que no cuentan con una cobertura adecuada se ven excluidas de muchas oportunidades, lo que afecta su desarrollo educativo, productivo y social. En particular, esta situación representa un obstáculo para los estudiantes que requieren acceso a plataformas educativas, así como para los pequeños productores agrícolas y emprendedores locales que podrían beneficiarse de herramientas digitales para mejorar sus actividades comerciales.

A partir de esta necesidad, la presente investigación propone el diseño inicial de un sistema de antenas que capte la señal telefónica desde un punto alto de la comunidad, la procese mediante un sistema de filtrado y amplificación, y finalmente la redistribuya hacia zonas de baja cobertura utilizando antenas sectoriales con tecnologías avanzadas como MIMO y Beamforming. Este diseño está enfocado en la simulación y análisis técnico del sistema, como una primera fase que permita evaluar su viabilidad y efectividad antes de una posible implementación física.

El proyecto contempla la validación de la propuesta mediante herramientas profesionales de diseño y modelado de sistemas de antenas, lo cual aporta valor técnico al estudio y permite analizar su desempeño bajo condiciones reales. Además, el sistema está concebido en función de las características geográficas y sociales de la comunidad de David Tejada, lo que lo convierte en un modelo replicable en otras zonas rurales con problemáticas similares.

La implementación futura de esta solución tecnológica permitiría mejorar significativamente la cobertura y calidad de la red móvil en la comunidad, fortaleciendo la inclusión digital, facilitando la comunicación de los residentes y abriendo nuevas oportunidades en áreas como educación, comercio y productividad. Asimismo, este trabajo servirá como base para futuras investigaciones que aborden la falta de conectividad en regiones rurales desde un enfoque técnico, sostenible y de bajo costo.

4. Planteamiento del problema

La comunidad de David Tejada enfrenta una limitación significativa en el acceso a la red telefónica debido a su ubicación en una zona montañosa y boscosa. Aunque en ciertos puntos elevados de la comunidad se recibe una señal LTE de alta velocidad proveniente del operador móvil Claro Nicaragua, la mayoría de los habitantes no puede acceder a ella de manera constante. Este problema afecta la comunicación de los residentes, especialmente de los estudiantes que requieren conectividad para actividades educativas, así como de pequeños productores agrícolas y emprendedores locales, quienes necesitan medios de comunicación confiables para mejorar sus procesos productivos y comerciales.

La falta de cobertura estable y de calidad limita el desarrollo de estas personas, genera desigualdades tecnológicas, y restringe el acceso a servicios esenciales como la educación virtual, la información técnica, o la participación en mercados digitales. Dado que las condiciones topográficas impiden la expansión directa de la infraestructura móvil tradicional, se hace necesario explorar soluciones alternativas que aprovechen la señal existente y la redistribuyan de manera más eficiente hacia las zonas con baja cobertura.

En este contexto, se propone el diseño inicial de un sistema de antenas, cuya función será captar la señal LTE desde un punto alto, filtrarla, amplificarla y retransmitirla hacia las áreas desfavorecidas mediante antenas sectoriales con tecnologías MIMO y Beamforming. Este proyecto se encuentra en su fase de propuesta y validación mediante simulaciones electromagnéticas avanzadas, con el fin de evaluar su viabilidad técnica, optimizar su rendimiento y establecer las bases necesarias para seguir estudiándolo y por ende a una futura implementación real.

5. Objetivos

5.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de Antena de Bocina Integrada con tecnología MIMO, Beamforming y Amplificación para la Mejora del acceso a la red telefónica en la comunidad David Tejada.

5.2. Objetivos Específicos

1. Analizar el acceso a las redes telefónicas y a la comunicación en la comunidad rural "David Tejada" perteneciente a Bocana de Paiwas-RACCS.
2. Crear el diseño inicial de un sistema de antenas de acuerdo con la Ley No. 1223, Ley General de Telecomunicaciones Convergentes, y la Ley No. 843, que regula la ubicación, construcción e instalación de estructuras de soporte para equipos de telecomunicaciones que hacen uso del espectro radioeléctrico.
3. Valorar la propuesta de diseño del sistema de antenas con expertos cualificados.

6. Marco Referencial

En este apartado se desarrollarán los antecedentes relevantes que contextualizan el estudio, junto con los conceptos clave necesarios para la comprensión de este trabajo monográfico. Asimismo, se incorporará el sustento teórico, proporcionando una base académica sólida que respalde y fundamente el desarrollo del presente trabajo.

6.1. Antecedentes

John D. Kraus, en colaboración con Ronald J. Marhefka, en su obra Antennas for All Applications (2002), expone que el desarrollo de sistemas de antenas ha sido esencial para el progreso de las comunicaciones inalámbricas. En su tesis, se destaca cómo desde los experimentos iniciales de Heinrich Hertz hasta las modernas redes de telecomunicaciones que las antenas han desempeñado un papel fundamental en la transmisión y recepción de señales electromagnéticas. Asimismo, los autores subrayan que las antenas son componentes clave en tecnologías contemporáneas como la radiodifusión, la telefonía móvil, las comunicaciones satelitales y los sistemas de radar.

Constantine A. Balanis, en su libro Antenna Theory: Analysis and Design (2016), explica que las antenas de bocina se caracterizan por su alta ganancia y directividad, lo que las hace ideales para aplicaciones donde se requiere concentrar la energía en una dirección específica. El autor señala que este tipo de antenas ha sido ampliamente utilizado en sistemas de radar y comunicaciones satelitales, ya que permite lograr patrones de radiación controlados y eficientes, fundamentales para la transmisión precisa de señales a largas distancias.

Sophocles J. Orfanidis, en su obra Electromagnetic Waves and Antennas (2002), expone que la teoría electromagnética constituye la base científica fundamental para el diseño y análisis de antenas. Esta teoría ha permitido el desarrollo de estructuras capaces de operar eficientemente en distintas frecuencias, optimizando su rendimiento según las necesidades específicas de cada aplicación. En el contexto de telecomunicaciones rurales, como el de este proyecto, dicha optimización es crucial para lograr una cobertura efectiva y estable, especialmente en zonas con infraestructura limitada.

Andrea Goldsmith, en su libro Wireless Communications (2005), señala que los avances en la tecnología de antenas han sido impulsados por la creciente necesidad de comunicaciones inalámbricas con alta velocidad y fiabilidad. Esta evolución tecnológica ha sido especialmente relevante en contextos rurales, donde la infraestructura terrestre es escasa o deficiente. En estos entornos, las soluciones inalámbricas se convierten en una alternativa clave para garantizar el acceso a servicios de conectividad, permitiendo así mejorar la comunicación, el acceso a la información y el desarrollo socioeconómico de comunidades alejadas de los centros urbanos.

En su tesis doctoral, Mancera (2013) destaca que el acceso a las redes telefónicas y, en general, a las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), no solo facilita la conectividad, sino que también promueve espacios para el consumo crítico de la información, el aprendizaje a lo largo de la vida, el envejecimiento activo, el apoyo escolar, la alfabetización mediática y audiovisual, la búsqueda de empleo, el fomento de las relaciones interpersonales, la salvaguardia del patrimonio natural y cultural, la integración social, el fomento de hábitos de vida saludables, el estímulo del uso del software libre y el establecimiento de redes de trabajo colaborativas .

Ciro Diego Radicelli-García y Narcís Cardona, en su artículo “A Second-Generation Digital Terrestrial Television Wireless Return Channel Standard for Providing Internet Connectivity in Rural Areas in Latin America” (2015), analizan cómo la falta de acceso a redes de telecomunicaciones en zonas rurales de América Latina ha generado una brecha digital significativa. Esta situación limita el acceso a servicios esenciales como la educación y la salud, impidiendo que los residentes participen en programas de educación en línea y accedan a servicios de telemedicina, lo que agrava las desigualdades existentes.

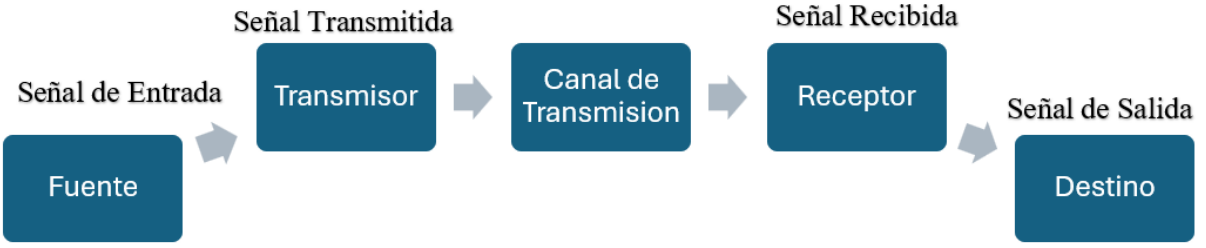
6.2. Sustento Teórico

6.2.1. Telecomunicación

Según la Ley de Telecomunicaciones Convergentes (2021), telecomunicación es “toda emisión, transmisión, o recepción a distancia de signos, señales, escritos, imágenes, sonidos, datos o informaciones de cualquier naturaleza” (p. 7, párr. 11). Como se muestra en la Figura 1, las telecomunicaciones necesitan de componentes clave para la transmisión de una señal a la distancia.

Figura 1

Esquema básico de un sistema de telecomunicaciones



Nota. Esquema de los componentes principales para la transmisión de una señal**. Fuente:** Elaboración propia.

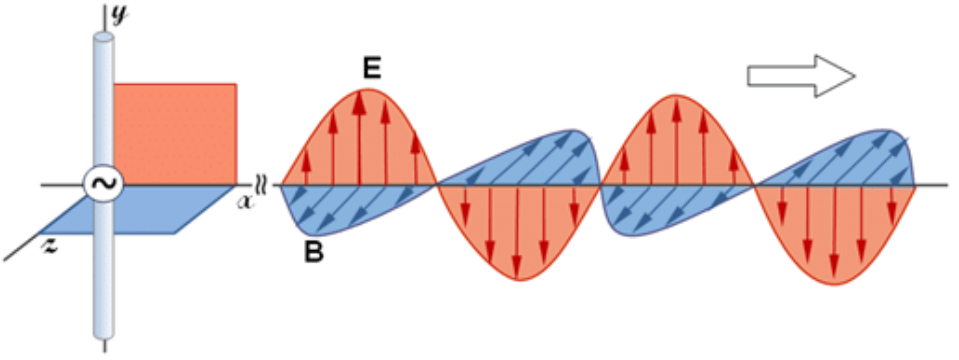
6.2.2. Radiocomunicación

Según Murillo Fuentes (2013),

El objetivo de la radiocomunicación no es otro que el de establecer un enlace sin cables entre dos puntos que permita la transmisión de información. Esta idea lleva asociada una serie de retos científicos y tecnológicos que de forma sencilla se pueden resumir en utilizar los campos electromagnéticos para que en el seno de nuestra sociedad se puedan satisfacer las necesidades de transmisión de información con las máximas velocidades de transmisión posibles (p. 21, párr. 1). Como se muestra en la Figura 2, las telecomunicaciones usan radiocomunicaciones, que se basan en la creación de ondas electromagnéticas ilustrada en la figura, las antenas emiten y reciben estas ondas de radio, moduladas para transmitir información inalámbricamente, lo que permite tecnologías como la telefonía móvil y el Wi-Fi.

Figura 2

Generación de una Onda Electromagnética



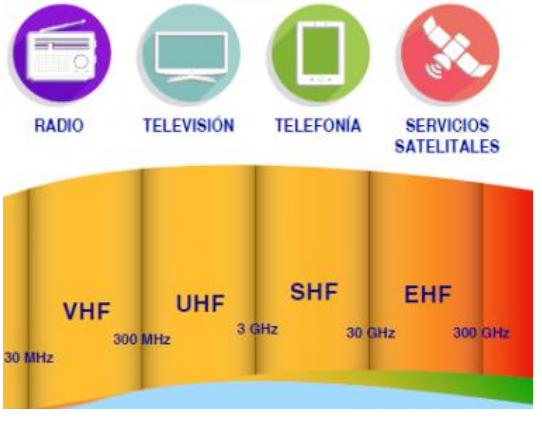
Nota. Demostración grafica de la creación de una onda electromagnética. **Fuente:** (Centeno, 2014).

6.2.3. Espectro Radioeléctrico

Según la Comisión Europea (2024), "el espectro radioeléctrico es la parte del espectro electromagnético con frecuencias de 30 Hz a 300 GHz. Las ondas electromagnéticas en este rango de frecuencia, llamadas ondas de radio, son ampliamente utilizadas en la tecnología moderna, particularmente en las telecomunicaciones" (párr. 2).

Figura 3

Espectro Radioeléctrico



Nota. Usos del espectro radioeléctrico. **Fuente:** (Instituto Federal De Telecomunicaciones, 2025).

6.2.4. Operador

Según la Ley General de Telecomunicaciones Convergentes (2024), un operador es una "persona natural o jurídica debidamente habilitada por TELCOR, para prestar Servicios Públicos de Telecomunicaciones de forma convencional o en la forma de Operador Virtual. Incluye también la operación de Microtelcos o MIPYMEs de Telecomunicaciones" (p. 6, párr. 9).

Figura 4

Planes Claro Hogar



Nota. Imagen de ejemplo de un servicio de telecomunicaciones prestado por CLARO-NICARAGUA. **Fuente:** (Claro Nicaragua, 2025).

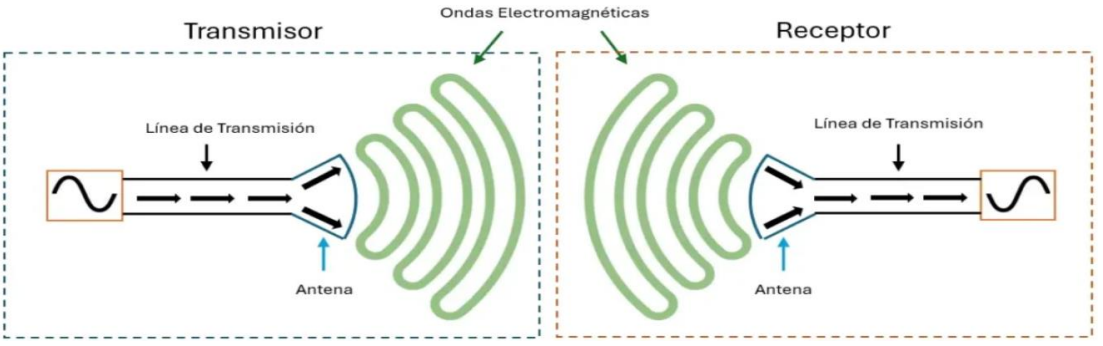
6.2.5. Antena

José Manuel Huidobro (2013) define que:

> Una antena es un dispositivo diseñado con el objetivo de emitir y/o recibir ondas electromagnéticas hacia/desde el espacio libre. Una antena transmisora transforma corrientes eléctricas en ondas electromagnéticas, y una receptora realiza la función inversa. En el caso de que las antenas estén conectadas por medio de guía ondas, esta función de transformación se realiza en el propio emisor o receptor. Se utilizan en la radio, televisión, teléfonos móviles, routers inalámbricos, mandos remotos, etc., unas veces visibles y otras ocultas en el interior del propio dispositivo (párr. 2).

Figura 5

Funcionamiento de una antena



Nota. Imagen ilustrativa del funcionamiento de una antena transmisora y una receptora.
Fuente: (IELECTEL, 2025).

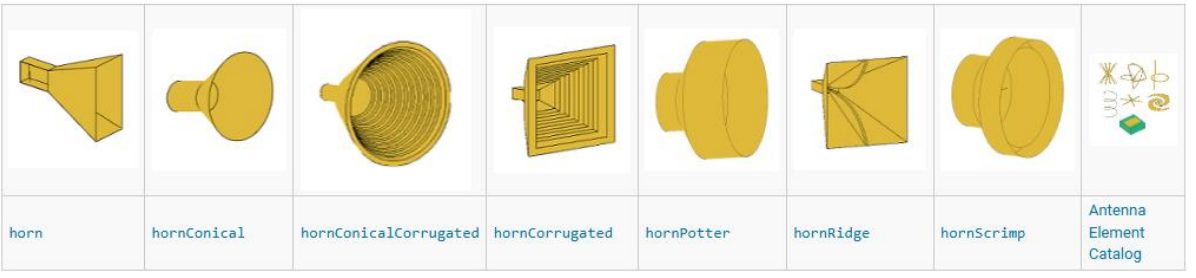
6.2.6. Antena de bocina

Según Juan Carlos Pagés Alvares (2027):

Las antenas de bocina proporcionan una alta ganancia, bajo coeficiente de onda estacionaria y un aceptable ancho de banda. Son relativamente fáciles de construir y los cálculos teóricos son muy similares a las medidas de los parámetros eléctricos. Estas bocinas se pueden utilizar de forma individual, en agrupación o como parte de un alimentador de un reflector parabólico. (p. 14, párr. 1). Como se muestra en la Figura 6 existen varios tipos de antenas de bocina, incluyendo bocinas piramidales, cónicas y sectoriales, cada una con características específicas que las hacen adecuadas para diferentes aplicaciones.

Figura 6

Catálogo de antenas de bocina



Nota. Catálogo de Antenas de Bocina. **Fuente:** (Centro de ayuda de MATLAB, 2025).

Según Antenna-Theory.com (2009–2025), las antenas de bocina se caracterizan por:

Las antenas de bocina son muy populares en UHF (300 MHz–3 GHz) y frecuencias más altas (he oído hablar de antenas de bocina que operan hasta 140 GHz). Las antenas de bocina a menudo tienen un patrón de radiación direccional con una alta ganancia de antena, que puede variar hasta 25 dB en algunos casos, con 10–20 dB como típico. Las antenas de bocina tienen un amplio ancho de banda de impedancia, lo que implica que la impedancia de entrada varía lentamente en un amplio rango de frecuencia (lo que también implica valores bajos para S11 o VSWR). El ancho de banda para antenas de bocina prácticas puede ser del orden de 20:1 (por ejemplo, operando de 1 GHz a 20 GHz), con un ancho de banda de 10:1 no es infrecuente.

La ganancia de las antenas de bocina suele aumentar (y el ancho de haz disminuye) al aumentar la frecuencia de operación. Esto se debe a que el tamaño de la apertura de la bocina siempre se mide en longitudes de onda; a frecuencias más altas, la antena de bocina es eléctricamente más grande. Esto se debe a que una frecuencia más alta tiene una longitud de onda más pequeña. Dado que la antena de bocina tiene un tamaño físico fijo (por ejemplo, una apertura cuadrada de 20 cm de diámetro), la longitud de la apertura tiene más longitudes de onda a frecuencias más altas. Un tema recurrente en la teoría de antenas es que las antenas más grandes (en términos de longitudes de onda) tienen mayores directividades (2009–2025, prr.1, prr.2).

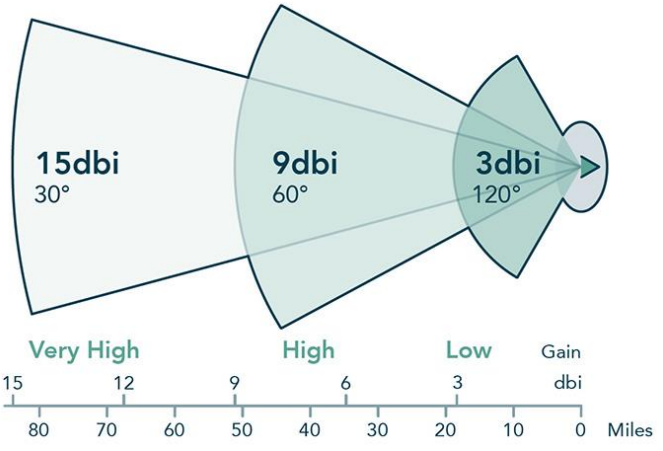
6.2.7. Ganancia de una antena

Según ALOTSER (2025):

> DBi (decibel isotrópico) emerge como la unidad líder para medir la ganancia de antena, un factor crítico en la optimización de la transmisión de señales. Al cuantificar la capacidad de una antena para concentrar y dirigir su potencia radiada, dBi nos permite tomar decisiones informadas que mejoran nuestras experiencias inalámbricas (párr. 5).

Figura 7

Escala de ganancias en dbi



Nota. La imagen ilustra cómo varía la ganancia de una antena (en dBi) en relación con su ángulo de cobertura y su distancia de alcance. Una antena de 3 dBi cubre un ángulo amplio de 120°, con un alcance aproximado de 10 millas. Una de 9 dBi reduce el ángulo a 60° y extiende el alcance hasta unas 40 millas. Finalmente, una antena de 15 dBi concentra la señal en sólo 30°, alcanzando distancias de hasta 80 millas. **Fuente:** (ALOTSER, 2025).

Según RF Microwave Solution (2023):

> Si necesita enviar o recibir energía desde múltiples direcciones en una sola dirección, debe diseñar una antena con baja directividad. Ejemplos de aplicaciones para antenas de baja directividad incluyen radios de coche, teléfonos móviles y acceso inalámbrico a internet desde ordenadores. Por el contrario, si se dedica a la teledetección o a la transferencia de energía dirigida, se requerirá una antena altamente direccional. Las

antenas altamente direccionales maximizarán la transferencia de energía desde la dirección deseada y reducirán las señales provenientes de direcciones no deseadas.

Tabla 1

Escalas de directividad típica de diferentes tipos de antenas

Tipo de antena	Directividad típica [dB]
Antena dipolo corta	1.76
Antena dipolo de media onda	2.15
Parche (antena microstrip)	5 - 8
Antena de bocina	10 - 20
Antena parabólica	10 – 40

Nota. La directividad en decibelios (dB) mostrada en la tabla indica la capacidad de una antena para enfocar la energía de la radiación en una dirección específica; a mayor valor en dB, mayor direccionalidad, observándose una progresión desde antenas omnidireccionales como los dipolos, hasta las altamente direccionales como las parabólicas y de bocina, que son ideales para comunicaciones de largo alcance. **Fuente:** (Adaptado de RF Microwave Solution,2023).

6.2.8. Ancho de anda

Según Sorting Hat Technologies (2025):

La cantidad de datos que se puede transportar de un punto a otro dentro de una red en un tiempo específico se denomina ancho de banda. La unidad de medida más común para el ancho de banda son los bits por segundo, también conocidos como tasa de bits. El término ancho de banda se refiere a la capacidad de transmisión de una conexión, un componente importante a considerar al determinar el rendimiento y la eficacia de una red o conexión a internet (párr. 2).

Tabla 2

Especificaciones de la Banda 7 LTE

Banda LTE	Banda de frecuencia (MHz)	Nombre de la banda	Enlace ascendente (UL) (MHz)	Enlace descendente (DL) (MHz)	Ancho de banda DL/UL (MHz)	Antenas populares
7	2600	IMT-E	2500 - 2570	2620 - 2690	70	Las mejores antenas LTE B7

Nota. La Banda 7 LTE (IMT-E) opera en el entorno de los 2600 MHz, utilizando duplexación FDD con un enlace ascendente entre 2500 y 2570 MHz y un enlace descendente entre 2620 y 2690 MHz. Ofrece un ancho de banda de 70 MHz en ambas direcciones, lo que la hace ideal para servicios móviles 4G de alta velocidad. Es ampliamente utilizada con antenas LTE B7 por su eficiencia y buena cobertura. **Fuente:** (Adaptado de RFWEL Engineering, 2025).

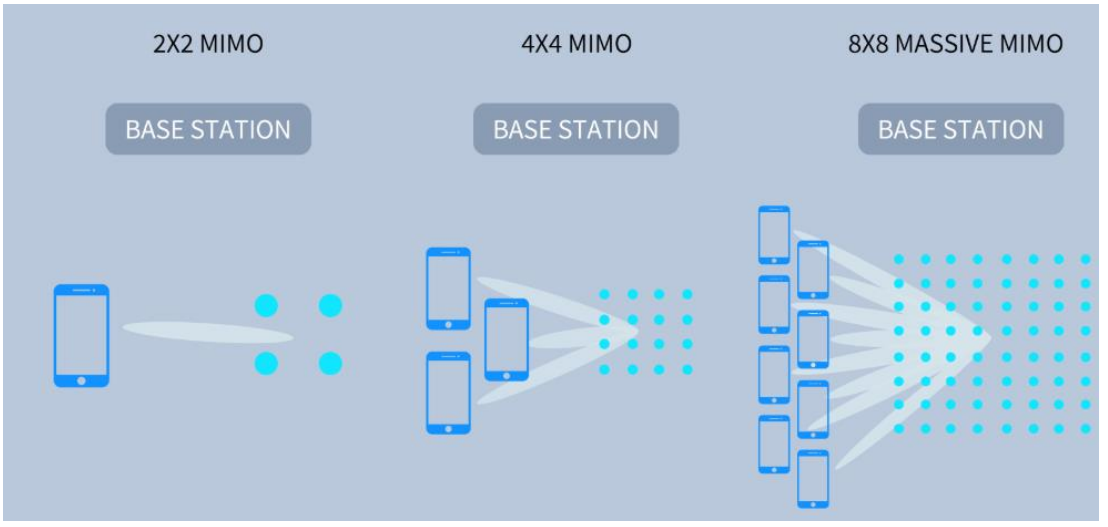
6.2.9. Tecnología MIMO

Según la Universidad de Sevilla (s.f.):

> MIMO, acrónimo en inglés de Multiple-Input Multiple-Output (en español, Múltiple entrada, Múltiple salida) surge como la tecnología que promete resolver muchos de estos problemas en un futuro inmediato, ofreciendo mayores tasas de transferencia, mayores distancias de cobertura, mayor capacidad de usuarios y más fiabilidad; y todo ello sin aumentar el ancho de banda, y la potencia transmitida (p. 1, párr. 2).

Figura 8

Tecnología Massive MIMO



Nota. Configuración MIMO. **Fuente:** (Fibocom Wireless Inc., 2025).

Sangucho Taco (2011) describe lo siguiente:

MIMO (acrónimo en inglés de multiple-input multiple-output, múltiples-entradas múltiples-salidas) es una tecnología de radiocomunicaciones referida a enlaces de radio que hace uso de múltiples antenas tanto en el lado del transmisor como en el lado del receptor con la finalidad de lograr un mejor rendimiento en la transferencia de datos de forma inalámbrica.

Esta tecnología tiene la habilidad de multiplicar la capacidad, lo cual es sinónimo de velocidad. La eficiencia espectral es una medida que permite establecer la capacidad de comunicación. Esta eficiencia se define como el número de unidades de información por unidad de tiempo por unidad de ancho de banda [bps/Hz]. Más eficiencia espectral da como resultado más velocidad de información, más cobertura, más usuarios, una mejor calidad de señal (p. 3).

Para tener una mejor visión de lo que se pretende conseguir con la tecnología MIMO se haría uso del siguiente símil: el camino inalámbrico vendría a ser representado por una carretera. Hay que imaginarse a sus carriles cada vez más llenos de automóviles que ingresan por cada entrada del camino, en algún momento dado, el tráfico se atasca. Va a resultar inútil que los automóviles sean más rápidos, más aerodinámicos y menos costosos, pues se pierde movimiento y posibilidades de innovación. La única solución que se presenta es agregar carriles o carreteras. Para el ejemplo, MIMO vendría a proporcionar esas nuevas carreteras.

Con las agrupaciones de antenas, que es la idea central de MIMO, es posible extraer del espectro radioeléctrico disponible una capacidad varias veces superior a la que se consigue con los sistemas de comunicaciones móviles actuales, explotando el fenómeno conocido como diversidad espacial[1]. Los sistemas MIMO basan su funcionamiento en un aprovechamiento de la diversidad de caminos de propagación entre diferentes antenas (p.4).

Para los sistemas MIMO, las direcciones de partida y llegada de los trayectos son cruciales, porque las diferentes señales están separadas por estos ángulos. Cuantas más direcciones exista mejor será para MIMO. En escenarios internos hay usualmente muchos objetos reflectantes entre el transmisor y el receptor, lo que resulta en una gran propagación angular. Dependiendo del medio ambiente, la propagación angular puede variar en escenarios al aire libre. En ambientes rurales se tiene pocos objetos para interactuar, lo cual significa que la propagación angular es mucho menor que en ambientes urbanos con muchos edificios. Los enlaces satelitales suelen ser muy directivos, dando lugar a una propagación angular muy pequeña (p. 6).

6.2.10. Técnica de Beamforming

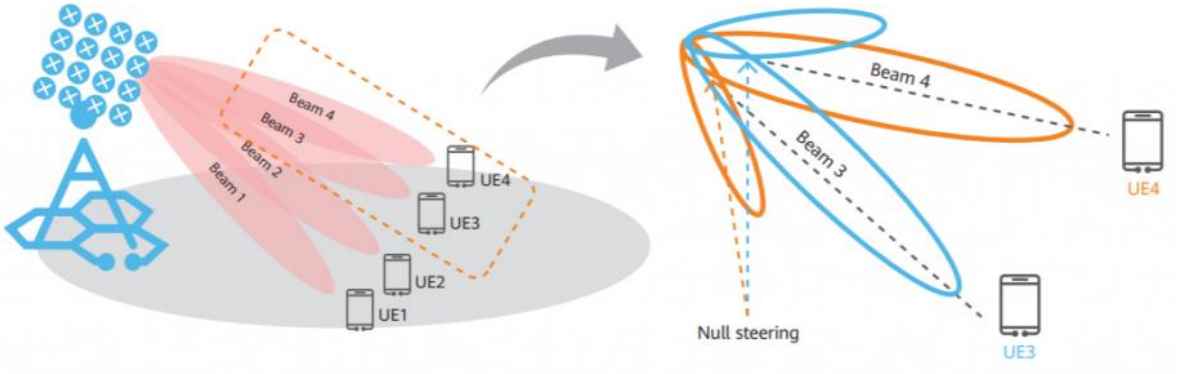
Según The MathWorks, Inc. (1994–2025):

Beamforming es una técnica que se utiliza para mejorar la relación señal-ruido de las señales recibidas, eliminar fuentes de interferencia no deseadas y enfocar señales transmitidas a ubicaciones específicas. Beamforming es fundamental para los sistemas

con arrays de sensores, incluidos los sistemas de comunicaciones inalámbricas MIMO tales como 5G, LTE y WLAN. (p. 1). Nótese en la Figura 9 es una técnica utilizada en las redes 5G para enfocar de manera selectiva las señales de transmisión hacia los usuarios. Permite una comunicación más eficiente y mejora la calidad de la señal al reducir la interferencia y aumentar la cobertura. Al ajustar la forma y dirección de los haces de señal, se logra una transmisión más directa y potente hacia los dispositivos 5G.

Figura 9

Tecnología Beamforming en las Redes 5G



Nota: Imagen publicada por Eduardo_D (2023). **Fuente:** (Copyright © 2025 Huawei Technologies Co., Ltd).

Instituto Federal de Telecomunicaciones (2025) explica lo siguiente:

La conformación de haces, mejor conocida como 'Beamforming', es otra técnica inalámbrica clave que utiliza tecnologías de antenas avanzadas tanto en dispositivos móviles como en estaciones base de redes para enfocar una señal inalámbrica en una dirección específica, en lugar de transmitir a un área amplia. Piense en la diferencia entre usar una linterna, que inunda a todos en la habitación, y un puntero láser, que puede identificar y rastrear continuamente a un usuario determinado.

Con la enorme cantidad de elementos de antena en un sistema MIMO masivo, la formación de haces se convierte en '3D Beamforming'. La formación de haces 3D crea haces horizontales y verticales hacia los usuarios, lo que aumenta las velocidades de

datos (y la capacidad) para todos los usuarios, incluso aquellos ubicados en los pisos superiores de edificios de gran altura.

Es decir, la formación de haces puede ayudar a las matrices Massive MIMO, que son estaciones base con decenas o cientos de antenas individuales, a hacer un uso más eficiente del espectro que las rodea. (párrs. 1–3).

ATL Europa (n.d.) destaca lo siguiente sobre las características del beamforming:

Entre las principales características de la tecnología beamforming destacan:

Óptima direccionalidad: El beamforming utiliza múltiples antenas para crear patrones de radiación que pueden dirigir las señales de forma precisa hacia los dispositivos de destino. Esto se logra ajustando la amplitud de las señales en cada antena, permitiendo que las ondas se sumen constructivamente en una dirección deseada y destructivamente en otras. Dicho de otra forma: ajusta las conexiones WLAN, las señales, para que encuentren el camino óptimo y rápido para llegar hasta el dispositivo final.

Mejor calidad de la señal: Como consecuencia del punto anterior, al concentrar la energía de la señal en una dirección específica, el beamforming aumenta la potencia recibida en el dispositivo receptor, lo que da lugar a una señal de máxima calidad. Esto es especialmente útil en entornos con alta densidad de usuarios como áreas urbanas.

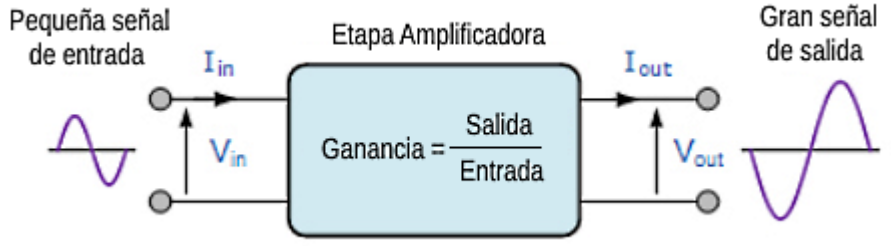
Menos interferencias: Al enfocar las señales, la tecnología beamforming reduce la interferencia con otros dispositivos que no están en la dirección del haz. Esto no solo mejora la calidad de la comunicación para el dispositivo receptor, sino que también reduce la interferencia en todo el sistema, beneficiando a otros usuarios de la red (párrs. 5–7).

6.2.11. Amplificación

Según la Universidad Nacional de Tucumán (s.f.), “su función es incrementar alguna magnitud eléctrica del circuito, entre ellas la intensidad de corriente, tensión o la potencia de una señal” (p. 6, párr. 1).

Figura 10

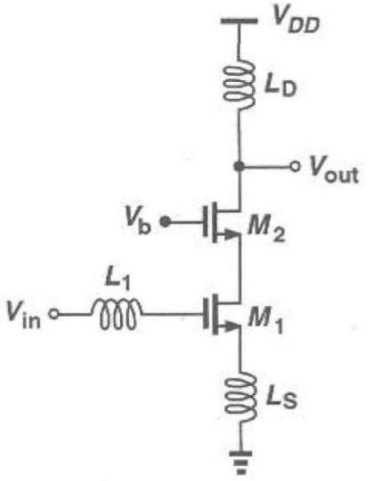
Amplificación



Nota. La imagen muestra el funcionamiento de un amplificador electrónico, donde una pequeña señal de entrada, caracterizada por una corriente (Iin) y voltaje (Vin) bajos, ingresa a la etapa amplificadora. Dentro de esta etapa, la señal es procesada y aumentada, determinándose la ganancia por la relación entre la salida y la entrada. Como resultado, se obtiene una gran señal de salida, con una corriente (Iout) y voltaje (Vout) significativamente mayores, que representa una versión amplificada de la señal original. En esencia, el amplificador toma una señal débil y la convierte en una señal más fuerte, siendo un componente clave en dispositivos electrónicos como equipos de audio y sistemas de comunicación. **Fuente:** (Alonso Calvo, José Francisco. Electricidad-Electrónica. Centro Integrado de Formación Profesional Número Uno de Santander, 2018).

Figura 11

Amplificador bajo ruido (LNA)



Nota. Amplificador de bajo ruido (LNA) CMOS de 1.5 GHz que usa inductores integrados y externos para igualar la impedancia en la entrada. Aunque su inductor en chip tiene un factor de calidad bajo (Q<4), logra una ganancia de voltaje significativa. El transistor M2 en configuración de compuerta común es clave: mejora el aislamiento inverso del LNA, lo que reduce la fuga del oscilador local (LO) y aumenta la estabilidad del circuito al minimizar la retroalimentación. Un circuito sin esta configuración en cascodo sería inestable. El LNA se conecta a otra etapa en cascodo para manejar una carga de 50 Ω. Fabricado con tecnología CMOS de 0.6 µm y operando a 1.5 V, este LNA ofrece una figura de ruido de 3 dB, una ganancia de 20 dB y un IIP3 de -10 dBm. **Fuente:** (Razavi, 1998).

> FIBOS Medicement Technology (Changzhou) Co., Ltd. (2024) define lo siguiente:
>
> Un amplificador de señal es un circuito electrónico diseñado para aumentar la amplitud de una señal entrante sin alterar su forma. El objetivo principal de un amplificador es producir una versión más grande de la señal original, asegurando que conserve su integridad mientras se amplifica. Este proceso es esencial en varios campos, incluidas las telecomunicaciones, la ingeniería de audio y los sistemas de adquisición de datos (párr. 2).

6.2.12. Filtro Pasabanda Microstrip

Un filtro pasa banda demuestra que la señal se transfiere a la carga en una banda de frecuencias entre la frecuencia de corte inferior y la frecuencia de corte superior. En medio de estas dos frecuencias se encuentra la frecuencia media geométrica la misma que se la puede obtener a partir de la suma de la frecuencia superior e inferior y este resultado dividirlo para 2. La función de este tipo de filtro es limitar toda la frecuencia excepto la señal dentro del ancho de banda del filtro siendo de gran utilidad en las comunicaciones pues permite separar señales para que estas no interfieran unas con otras (Thede, 2004).

Figura 12

Práctico filtro paso banda Microstrip 2,4 GHZ para mejorar relación señal-ruido



Nota. filtro pasabanda tipo hairpin diseñado para operar a 2.4 GHz, una frecuencia común en comunicaciones inalámbricas. El diseño en microstrip se basa en líneas resonantes en forma de "U" que permiten el paso de señales dentro de un rango específico, atenuando frecuencias no deseadas. **Fuente:** (AliExpress, 2025).

6.2.13. Regulaciones y Normativas de Telecomunicaciones en Nicaragua

El diseño de este sistema de antenas para la captura, amplificación y retransmisión de la señal telefónica se fundamenta en el marco legal y normativo vigente en el sector de telecomunicaciones del país. Este apartado detalla y analiza los artículos más relevantes de la Ley No. 1223, Ley General de Telecomunicaciones Convergentes, que establece las directrices esenciales para el uso del espectro radioeléctrico, la instalación de infraestructura y la operación de servicios de telecomunicaciones, aspectos cruciales para la viabilidad y legalidad del presente proyecto. Adicionalmente, se examinarán los puntos pertinentes de la Ley No. 843, Ley que

Regula la Ubicación, Construcción e Instalación de Estructuras de Soporte para Equipos de Telecomunicaciones que Hacen Uso del Espectro Radioeléctrico, considerando que el sistema propuesto implica la instalación de antenas y estructuras de soporte. El análisis conjunto de ambas leyes proporcionará una comprensión integral del marco regulatorio aplicable.

6.2.13.1. Ley No. 1223, Ley General de Telecomunicaciones Convergentes

Ley General de Telecomunicaciones Convergentes (2024) se encabeza diciendo lo siguiente:

> El Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional de Nicaragua, a través del Instituto Nicaragüense de Telecomunicaciones y Correos (TELCOR), ha venido realizando esfuerzos significativos para impulsar el desarrollo de las telecomunicaciones. Este sector se ha convertido en un soporte transversal para otros ámbitos fundamentales de la economía nacional, como la salud, la educación, el comercio, las finanzas, la agroindustria, el transporte y la justicia. De esta manera, se busca reducir la brecha digital y asegurar que el país aproveche al máximo los beneficios que ofrecen las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) (párr. 1).

> Que con la globalización de la economía y necesaria participación de Nicaragua en la era de la Industria 4.0 o Economía Digital, resulta determinante la transformación digital y el carácter transversal de las TIC en el marco de la prestación de servicios de telecomunicaciones a la población y las empresas en los diferentes sectores de la economía, para alcanzar competitividad en el ámbito internacional mediante el aumento de los índices de productividad. La nueva realidad económica mundial, implica que Nicaragua no puede ausentarse del nuevo paradigma de la Economía Digital y Sociedad de la Información, sino que, debe implementar políticas y regulaciones contemporáneas, dinámicas y prospectivas comparables a las impulsadas por otros países en la región para aumentar su potencial en los mercados internacionales (párr. 3).

> Que es prioridad del Gobierno de Reconciliación y Unidad Nacional, emprender acciones orientadas a incrementar el acceso de todos los ciudadanos a los servicios de telecomunicaciones y de banda ancha, principalmente aquellos que se encuentran en zonas geográficas desatendidas, por lo que un nuevo marco regulatorio de las telecomunicaciones y TIC vendrá a contribuir a que se logren los objetivos de aumentar la penetración de la banda ancha, reducir la brecha digital y facilitar el desarrollo económico y social del país, en correspondencia a las políticas públicas contenidas en el Plan Nacional de Lucha contra la Pobreza y para el Desarrollo Humano 2022-2026 (párr.5).

1.6.2.13.1.1. Artículo 1. Objeto y Naturaleza. De acuerdo con la Ley General de Telecomunicaciones Convergentes (2024), el artículo 1, inciso 2 menciona: "Establecer los derechos y obligaciones de los Usuarios, Operadores y Proveedores en condiciones de calidad, equidad, seguridad, igualdad y libre competencia" (art. 1, inciso 2).

> "Promover y fomentar las inversiones en el sector, la innovación y el uso eficiente de las redes y Servicios de Telecomunicaciones, en un entorno convergente para el desarrollo de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC)" (Ley General de Telecomunicaciones Convergentes, 2024, art. 1, inciso 4).

1.6.2.13.1.2. Artículo 4. Principios Rectores. Según la Ley General de Telecomunicaciones Convergentes (2024), el artículo 4 establece que la ley tiene como uno de sus objetivos:

> "Promoción de la competencia, la inversión y la innovación: Se debe promover la libre y sana competencia, la inversión y la innovación en el sector de las telecomunicaciones, a fin de maximizar el interés general y el bienestar social de la población" (Ley General de Telecomunicaciones Convergentes, 2024, art. 4, inciso 2).

> “Neutralidad tecnológica: Los Operadores y Proveedores tienen libertad de elegir las tecnologías que consideren apropiadas y adecuadas a sus necesidades y al mercado, para la prestación de los Servicios de Telecomunicaciones ofertados, respetando los estándares, recomendaciones y tendencias internacionales y las normativas que al efecto emita TELCOR” (Ley General de Telecomunicaciones Convergentes, 2024, art. 4, inciso 4).

1.6.2.13.1.3. Artículo 13. Cumplimiento de Normas Técnicas. Ley General de Telecomunicaciones Convergentes (2024), en el artículo 13 establece que: “Las Redes e infraestructuras, así como los Equipos Terminales y sus partes que se conectan a ellos, deben cumplir con las normas técnicas que determine TELCOR” (art. 13).

6.2.13.2. Ley No. 843, Ley que regula la ubicación, construcción e instalación de estructuras de soporte para equipos de telecomunicaciones que hacen uso del espectro radioeléctrico

La Ley No. 843 y su Reglamento (Decreto Ejecutivo NO. 15-2014) establecen el marco normativo para la implementación de la infraestructura física esencial para las telecomunicaciones en Nicaragua. Esta legislación se centra en regular la ubicación, construcción e instalación de las estructuras que soportan los equipos de telecomunicaciones, como torres y mástiles de antenas, que utilizan el espectro radioeléctrico. Su objetivo principal es ordenar y controlar el despliegue de esta infraestructura, buscando minimizar el impacto visual y ambiental, garantizar la seguridad pública, asegurar el cumplimiento de normas técnicas y definir los roles de las entidades involucradas en el proceso de autorización y fiscalización. Para el presente proyecto, esta ley es de vital importancia ya que establece los requisitos y procedimientos para obtener los permisos necesarios para la instalación del sistema de antenas propuesto, abordando aspectos cruciales como la ubicación permitida, las normas de construcción aplicables y las medidas de seguridad obligatorias.

1.6.2.13.2.1. Artículo 3. Autoridad de aplicación. La Ley que regula la ubicación, construcción e instalación de estructuras de soporte para equipos de telecomunicaciones que hacen uso del espectro radioeléctrico (2014), en su artículo 3 establece que:

El Instituto Nicaragüense de Telecomunicaciones y Correos, TELCOR, es el Ente Regulador y autoridad competente para la aplicación de la Ley 843 'Ley que regula la ubicación, construcción e instalación de estructuras de soporte para equipos de telecomunicaciones que hacen uso del espectro radioeléctrico' y como tal es el coordinador de las autoridades administrativas y los funcionarios que éstas designen para integrar y funcionar como Ventanilla Única. (art. 3).

1.6.2.13.2.2. Artículo 6. Procedimiento para solicitud de Permiso. La Ley que regula la ubicación, construcción e instalación de estructuras de soporte para equipos de telecomunicaciones que hacen uso del espectro radioeléctrico (2014), en su artículo 6 establece el procedimiento necesario para la solicitud de instalar alguna torre para telecomunicaciones es:

El procedimiento para solicitudes de Permisos será el siguiente:

1) El solicitante deberá presentar el formulario de solicitud indicando una cuenta de correo electrónico para notificaciones, y los requisitos establecidos en el Art. 14 de la Ley, de forma impresa y digitalizada, es decir, escaneados y almacenados en un CD o DVD con una copia. Así mismo, debe adjuntar a esta solicitud copia del Recibo Oficial de Caja de TELCOR – Ente Regulador demostrando el pago del arancel para el Permiso.

2) Adicionalmente como información complementaria para facilitar el análisis y revisión de la solicitud, el solicitante podrá presentar, no siendo obligatorio para la parte solicitante, un DVD conteniendo las imágenes y videos con lo siguiente:

a) Lugar exacto del sitio. Referenciado en latitud y longitud y referencias físicas tradicionalmente conocidas.

b) Tomas panorámicas (fotografía y video) de 360 ° del sitio a construir, este requisito no aplica para la radio difusión AM, FM, SW y los radioaficionados.

c) Imágenes aledañas al sitio a construir que indiquen la viabilidad del proyecto, es decir, otras torres o estructuras verticales.

d) Cualquier otra imagen y/o video que facilite la toma de decisión de las autoridades competentes para la aprobación del proyecto y emisión del Permiso.

3) Una vez recibida dicha solicitud en la Ventanilla Única, las autoridades competentes deberán revisar cada caso y definir fechas de inspección si fuere considerado necesario.

a) En caso que las autoridades competentes consideraran necesario una inspección in situ, deberá notificar la fecha y hora de la inspección al solicitante con al menos 48 horas de anticipación para efectos de facilitar las visitas y los accesos. Esta notificación se llevará a cabo por escrito a la dirección electrónica de la persona señalada en el formulario para esos efectos.

b) La Ventanilla Única podrá a su consideración, solicitar reuniones técnicas, de consulta y/o para subsanaciones con el solicitante. Esta solicitud de reunión deberá realizarse por escrito por vía correo electrónico a la cuenta señalada en el formulario de solicitud.

c) En el caso de subsanaciones requeridas por la Ventanilla Única, el solicitante deberá subsanarlas durante el término de treinta días calendario, con posibilidad de una extensión por quince días más si fuere necesario y previamente solicitado antes del vencimiento del término inicial. Una vez realizada la subsanación, si implica modificación en la ubicación o altura de la estructura, el solicitante deberá entregar lo pertinente a la Ventanilla Única por escrito y/o vía correo electrónico informando que las subsanaciones han sido realizadas.

4) Llevada a cabo o no la inspección se procederá con el estudio del expediente y emisión de los permisos institucionales (internos) y elaboración de los Permisos de instalación o en su defecto la resolución que corresponda.

5) Una vez elaborado el Permiso de instalación o en su defecto la resolución que corresponda se procederá a notificar al solicitante el resultado de su solicitud, indicando la fecha de retiro del documento. Esta notificación podrá ser por escrito y/o vía correo electrónico a la cuenta señalada en el formulario de solicitud.

6) En caso que la solicitud no hubiere sido aprobada, el solicitante podrá hacer uso de los recursos administrativos establecidos en el artículo dieciocho de la ley.

La Ventanilla Única deberá resolver y emitir el permiso correspondiente en un plazo no mayor de 45 días calendario los que serán contados a partir de la presentación de los documentos. Pasado este término sin respuesta por parte de la Ventanilla Única, se aplicará el silencio administrativo positivo y se entenderá como aprobada la solicitud presentada, lo que será suficiente documento habilitante para la instalación y operación de la infraestructura y por tanto la autoridad correspondiente deberá emitir el permiso en los siguientes ocho (08) días, después de trascurrido el término.

Dentro del proceso es permitido el subsanar los documentos presentados por el operador sin que esto signifique iniciar nuevo trámite. (art. 6).

7. Diseño Metodológico

7.1. Enfoque de Investigación

El presente estudio se desarrolla bajo un enfoque mixto, ya que se basa en la recopilación y análisis de datos numéricos para evaluar el desempeño de un sistema de Antena de Bocina Integrada con tecnología MIMO, Beamforming y Amplificación. A través de simulaciones, se analizarán parámetros clave como la ganancia, directividad y eficiencia espectral en el contexto de la comunidad de David Tejada.

El tipo de investigación es aplicada, pues busca diseñar y optimizar un sistema de antenas que mejore el acceso a la red telefónica en la comunidad de David Tejada. Además, se trata de una investigación experimental, dado que se realizarán pruebas mediante software de simulación para evaluar el comportamiento del sistema.

El estudio adopta un diseño no experimental, ya que no se manipularán directamente las variables en un entorno físico, sino que se analizarán mediante simulaciones para evaluar su rendimiento y posibles mejoras.

Este enfoque permitirá obtener resultados cuantificables que respalden la viabilidad y efectividad del sistema propuesto, proporcionando una base técnica y científica para futuras implementaciones en zonas con deficiencia en conectividad.

7.2. Variables / Categorías de Estudio

Tabla 3

Variables / Categorías de Estudio

Objetivo Específico	Dimensión	Categoría	Preguntas de Evaluación	Información Requerida	Fuentes de Información	Métodos o Instrumentos para Recopilar Información
1. Analizar el acceso a las redes telefónicas y a la comunicación en la comunidad rural “David Tejada”	Acceso a la red	Cobertura y calidad del servicio	¿Qué operadores brindan cobertura en la comunidad? ¿Cuál es la calidad de la señal en distintos puntos? ¿Existen barreras geográficas que afecten la cobertura?	Datos de cobertura y calidad de señal	Usuarios de la comunidad, mediciones en campo	Encuestas a usuarios, Mediciones de intensidad de señal
2. Crear el diseño de un	Diseño de antena	Regulaciones Legales	¿Cuáles son los requisitos legales para	Leyes y normativas nacionales	Ley General de Telecomunic	Análisis documental

Objetivo Específico	Dimensión	Categoría	Preguntas de Evaluación	Información Requerida	Fuentes de Información	Métodos o Instrumentos para Recopilar Información
sistema de antenas según las regulaciones nacionales			la instalación de antenas en la comunidad? ¿Qué limitaciones existen según el espectro radioeléctrico?		aciones Convergentes, Ley 843, Ente regulador de telecomunicaciones	
		Parámetros de diseño	¿Cuál es la frecuencia de operación más adecuada según la zona y los operadores disponibles? ¿Qué dimensiones físicas debe tener la antena para	Principios de diseño de antenas direccionales y sectoriales. Características y aplicación de tecnología MIMO (Multiple	Libros y artículos técnicos sobre diseño de antenas. Documentación de fabricantes de equipos. Manuales de simulación	Análisis bibliográfico y técnico. Simulaciones electromagnéticas para validar configuraciones.

Objetivo Específico	Dimensión	Categoría	Preguntas de Evaluación	Información Requerida	Fuentes de Información	Métodos o Instrumentos para Recopilar Información
			operar eficientemente en esa frecuencia? ¿Cómo se integran tecnologías como MIMO y Beamforming en el diseño físico de la antena? ¿Qué tipo de amplificación es adecuada para mejorar la eficiencia sin distorsionar la señal?	Input Multiple Output). Estrategias de formación de haces (Beamforming) para entornos rurales. Tipos de amplificación (LNA, PA) y su integración en el sistema. Parámetros clave como ganancia, ancho de	(HFSS, CST, MATLAB). Tesis previas o papers relacionados con antenas para zonas rurales.	

Objetivo Específico	Dimensión	Categoría	Preguntas de Evaluación	Información Requerida	Fuentes de Información	Métodos o Instrumentos para Recopilar Información
				banda, eficiencia, VSWR.		
3. Valorar la propuesta de diseño con expertos cualificados	Validación del diseño	Opiniones de expertos	¿El diseño cumple con los estándares de telecomunicaciones? ¿Se pueden mejorar ciertos parámetros del diseño?	Recomendaciones de expertos, análisis de viabilidad técnica	Ingenieros en telecomunicaciones, Académicos especializados	Entrevistas

7.3. Sujetos de Investigación

El sujeto principal de esta investigación será el sistema de antenas diseñado, el cual será simulado con el objetivo de evaluar su desempeño en términos de ganancia, directividad y eficiencia espectral. El diseño se fundamentará en el estudio de libros especializados en electrónica y telecomunicaciones, los cuales proporcionarán los principios técnicos necesarios para la elaboración del sistema. Todo el proceso será desarrollado mediante herramientas de simulación, permitiendo analizar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones operativas.

7.4. Población

Según datos del Instituto Nacional de Información de Desarrollo (INIDE, 2008), la comunidad contaba con una población total de 256 habitantes (p. 4). Además, la tasa de crecimiento poblacional mostró una tendencia de: 0.7% en el periodo 2005-2010, 0.4% entre 2010-2015, y finalmente a 0.2% en el periodo 2015-2020 (p. 38).

Teniendo estos datos y aplicando la fórmula del crecimiento compuesto, utilizada en análisis demográfico y económico (Freedman et al, 2014):

$Pf = Pi \times (1+r1) \times (1+r2) \times (1+r3)$

Se obtiene lo siguiente:

Para el año 2010: $P2010 = 256 \times (1.007) = 257.79$

Para el año 2015: $P2015 = 257.79 \times (1.004) = 258.82$

Para el año 2020: $P2020 = 258.82 \times (1.002) = 259.34$

Por lo tanto, la población proyectada para el año 2020 en la comunidad David Tejada es de aproximadamente 259 personas. Aunque información un poco desactualizada es una información verificada y nos permite realizar este cálculo que nos permite comprender el crecimiento demográfico de la zona y evaluar su impacto en la demanda de infraestructura de telecomunicaciones, lo que resulta fundamental para el diseño y planificación de soluciones que mejoren la conectividad en la región.

7.5. Muestra

Según Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista Lucio (2014), el tamaño de la muestra para estudios poblacionales puede calcularse con la siguiente fórmula estadística:

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{(N-1) \cdot e^2 + Z^2 \cdot p \cdot q}$$

Donde:

N = población total (259)

Z = 1.96 (valor Z para un 95 % de confianza)

p = 0.5

q = 1 – p = 0.5

e = 0.05 (margen de error)

Sustituimos:

$$n = \frac{259 \cdot (1.96)^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5}{(259 - 1) \cdot (0.05)^2 + (1.96)^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5}$$

$$n = \frac{259 \cdot 3.8416 \cdot 0.25}{258 \cdot 0.0025 + 3.8416 \cdot 0.25}$$

$$n = \frac{259 \cdot 0.9604}{0.645 + 0.9604}$$

$n = \frac{248.7556}{1.5979} = \quad 154.97 \; = 155$ personas.

Con base en la población total de 259 habitantes en la comunidad de David Tejada se obtuvo un tamaño muestral de 155 personas, lo cual permite asegurar una adecuada representatividad de la población objetivo en este estudio.

La población objeto de estudio estará compuesta por estudiantes, pequeños productores agrícolas y emprendedores locales de la comunidad David Tejada, quienes representan los principales sectores que podrían beneficiarse de una mejora en la infraestructura de telecomunicaciones.

- Estudiantes: Jóvenes en edades de 12 a 20 años que asisten a la escuela local.
- Pequeños productores agrícolas y emprendedores locales: Adultos de 30 a 50 años cuya actividad económica depende, en parte, de la comunicación y acceso a la red.
- Sexo: Hombres y mujeres.

Para garantizar la representatividad de la muestra y reducir sesgos en la selección de los participantes, se utilizará un muestreo aleatorio. Este método asegurará que cada individuo dentro de la población específica tenga la misma probabilidad de ser seleccionado, permitiendo obtener datos objetivos y confiables que respondan a los objetivos de la investigación.

7.6. Técnicas e Instrumentos

En este apartado se establece el instrumento de encuesta a aplicar, el cual se ha dividido en dos versiones específicas debido a la naturaleza de la población en la comunidad de David Tejada. La primera versión está dirigida a los estudiantes, quienes utilizan las redes principalmente para fines educativos y de comunicación. La segunda versión está orientada a los adultos, en su mayoría pequeños productores agrícolas y emprendedores locales, quienes hacen uso de la red para realizar actividades laborales como comunicación con clientes, proveedores y la promoción de productos o servicios. Esta división permite obtener datos más precisos y relevantes sobre las dificultades y necesidades de ambos grupos en relación con el acceso a la red telefónica e internet, considerando sus distintos usos y expectativas en cuanto a la calidad de la señal y la cobertura disponible en la zona.

7.7. Procedimiento

Tabla 4

Procedimiento

No.	Objetivo	Análisis	Resultados
1	Analizar el acceso a las redes telefónicas y a la comunicación en la comunidad rural “David Tejada” perteneciente a	Mixto	Se recopilarán datos mediante encuestas dirigidas al sector estudiantil y al sector adulto productivo para conocer el nivel de acceso a redes móviles,

No.	Objetivo	Análisis	Resultados
	Bocana de Paiwas-RACCS.		frecuencia de uso, calidad del servicio y problemas más comunes. Esta información permitirá tener una visión integral de la situación actual y servirá de base para justificar la propuesta técnica del sistema de antenas. A su vez, el análisis de los datos permitirá identificar patrones de conectividad y su impacto social y económico en la comunidad.
2	Crear el diseño de un sistema de antenas de acuerdo con la Ley No. 1223 y la Ley No. 843.	Cualitativo	A partir de la información técnica y legal recopilada, se procederá a diseñar el sistema de antenas considerando normativas nacionales, topografía del lugar y requisitos del entorno rural. Se seleccionarán tecnologías como

No.	Objetivo	Análisis	Resultados
			MIMO, Beamforming y amplificación para optimizar la recepción de señal móvil. Este diseño busca asegurar la compatibilidad técnica con la señal 4G LTE existente y el cumplimiento de las disposiciones legales que rigen las estructuras de telecomunicaciones en Nicaragua.
3	Valorar la propuesta de diseño del sistema de antenas con expertos cualificados.	Cualitativo	Se someterá el diseño y los resultados de la simulación a la revisión de ingenieros en telecomunicaciones y docentes especializados. Esta validación experta permitirá reforzar la solidez técnica del proyecto, detectar oportunidades de mejora y confirmar la viabilidad del sistema propuesto como solución al problema de

No.	Objetivo	Análisis	Resultados
			conectividad en la comunidad David Tejada.

8. Resultados

8.1. Resultados del objetivo específico #1: Analizar el acceso a las redes telefónicas y a la comunicación en la comunidad rural "David Tejada" perteneciente a Bocana de Paiwas-RACCS.

8.1.1. Aplicación de las encuestas

Para dar cumplimiento al Objetivo #1 del presente proyecto, se reflejarán y analizarán los resultados obtenidos a través de las dos encuestas a aplicar: una dirigida al sector estudiantil (12-20 años) y otra al sector adulto productivo (21-50 años) de la comunidad David Tejada. Estos datos permitirán identificar las principales problemáticas de conectividad y el impacto que tiene la limitada cobertura de red en el desarrollo educativo, laboral y social de los habitantes.

8.1.1.1. Resultados de Encuesta 1: Sector Estudiantil (12-20 años)

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la Encuesta #1 mostrada en nuestro Anexo D de este documento, aplicada a jóvenes de entre 12 y 20 años pertenecientes al sector estudiantil de la comunidad David Tejada, los cuales a la hora de aplicar las encuestas solo se fue posible encontrar treinta personas dentro de este rango. El objetivo de este apartado es analizar las respuestas de los encuestados para identificar el nivel de acceso a los servicios de telecomunicaciones y el uso que hacen de las tecnologías de comunicación.

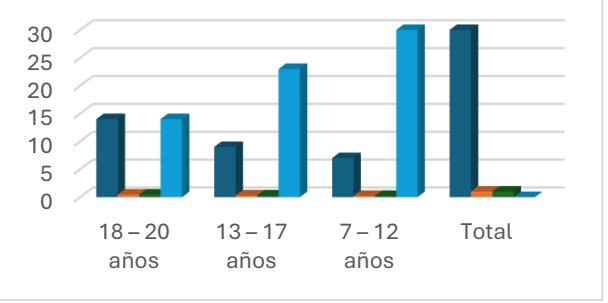
Los datos fueron procesados mediante la recopilación de respuestas, su organización en tablas y el cálculo de frecuencias absolutas y relativas. Esta información se presenta en gráficos de barras que facilitan un análisis claro de las condiciones que se buscan estudiar.

1. ¿Cuántos años tienes?

Las respuestas fueron:

Figura 13

¿Cuántos años tienes? Encuesta#1



Análisis:

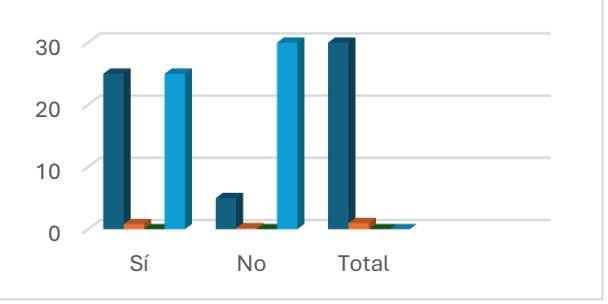
El 46.7 % de los estudiantes encuestados tiene entre 18 y 20 años, el 30.0 % se encuentra en el rango de 13 a 17 años y el 23.3 % tiene entre 7 y 12 años.

2. ¿Usas tu teléfono móvil para acceder a internet?

Respuestas:

Figura 14

¿Usas tu teléfono móvil para acceder a internet? Encuesta#1



Análisis:

El 83.3 % de los estudiantes encuestados usa su teléfono móvil para acceder a internet, mientras que el 16.7 % no lo utiliza para ese propósito.

3. ¿Qué tan seguido usas internet en tu teléfono móvil?

Respuestas:

Figura 15

¿Qué tan seguido usas internet en tu teléfono móvil? Encuesta#1



Análisis:

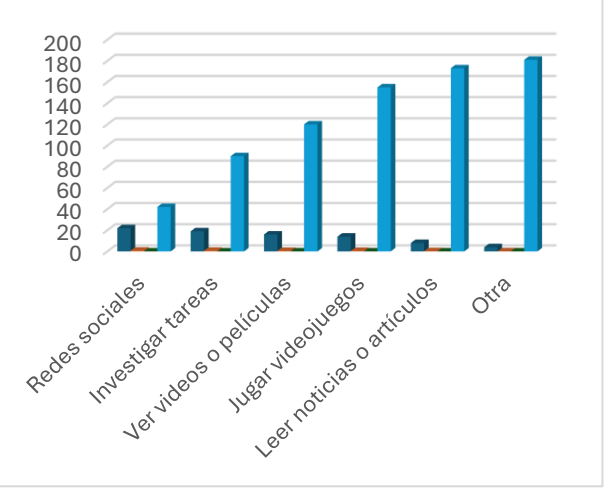
El 76.7 % de los estudiantes encuestados usa internet en su teléfono móvil todos los días, el 16.7 % lo usa algunas veces a la semana, y el 6.7 % lo utiliza solo de vez en cuando. Ningún estudiante indicó que nunca lo utiliza.

4. ¿Para qué actividades usas internet en tu teléfono móvil? (Puedes marcar más de una opción)

Respuestas:

Figura 16

¿Para qué actividades usas internet en tu teléfono móvil? Encuesta#1



Análisis:

Los estudiantes encuestados marcaron un total de 79 respuestas al seleccionar más de una opción en esta pregunta. De esas:

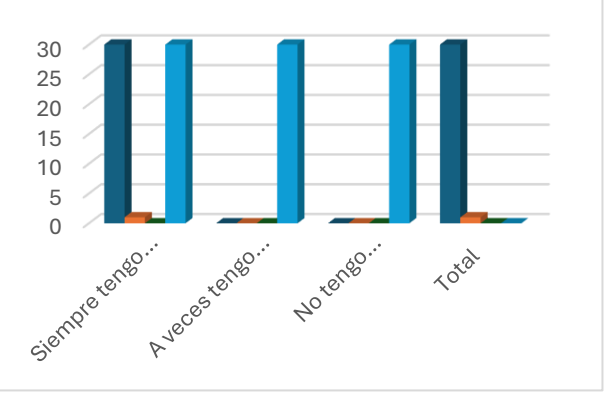
- 22 respuestas (73.3 %) fueron para redes sociales,
- 19 respuestas (63.3 %) para investigar tareas escolares,
- 16 respuestas (53.3 %) para ver videos o películas,
- 14 respuestas (46.7 %) para jugar videojuegos, y
- 8 respuestas (26.7 %) para leer noticias o artículos.

5. ¿Cuánta dificultad tienes para cargar o ver contenidos en internet (como videos, páginas educativas, etc.)?

Respuestas:

Figura 17

¿Cuánta dificultad tienes para cargar o ver contenidos en internet (como videos, páginas educativas, etc.)? Encuesta#1



Análisis:

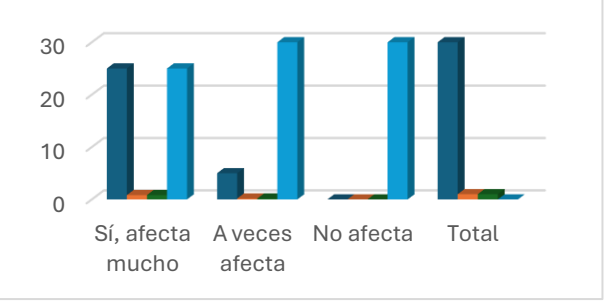
Los resultados muestran que el 100% de los jóvenes encuestados tienen dificultades constantes al intentar cargar o visualizar contenidos en internet.

6. ¿La calidad de la señal (2G, 3G, 4G) afecta tu capacidad para estudiar o hacer tareas en línea?

Respuestas:

Figura 18

¿La calidad de la señal (2G, 3G, 4G) afecta tu capacidad para estudiar o hacer tareas en línea? Encuesta#1



Análisis:

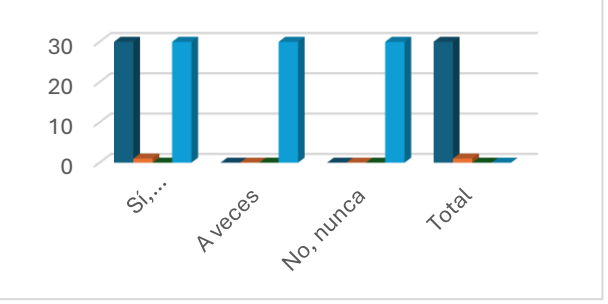
El 100% indicaron que la mala calidad de la señal móvil afecta gravemente su capacidad para estudiar o realizar tareas en línea.

7. ¿Has tenido alguna vez dificultades para participar en clases virtuales o hacer tareas debido a la mala calidad de la red?

Respuestas:

Figura 19

¿Has tenido alguna vez dificultades para participar en clases virtuales o hacer tareas debido a la mala calidad de la red? Encuesta#1



Análisis:

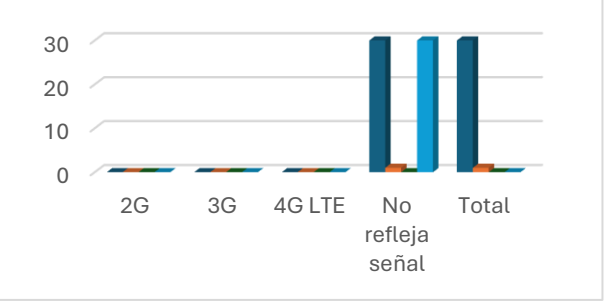
El 100 % de los estudiantes encuestados indicó que siempre ha tenido dificultades para participar en clases virtuales o hacer tareas debido a la mala calidad de la red.

¿Qué tipo de señal capta en tu teléfono móvil?

Respuestas:

Figura 20

¿Qué tipo de señal capta en tu teléfono móvil? Encuesta#1



Análisis:

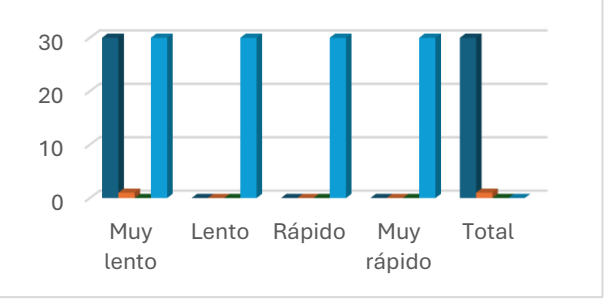
El 100 % de los estudiantes encuestados indicó que su teléfono móvil no capta señal.

8. ¿Qué tan rápido o lento consideras que es el internet en tu teléfono móvil?

Respuesta:

Figura 21

¿Qué tan rápido o lento consideras que es el internet en tu teléfono móvil? Encuesta#1



Análisis:

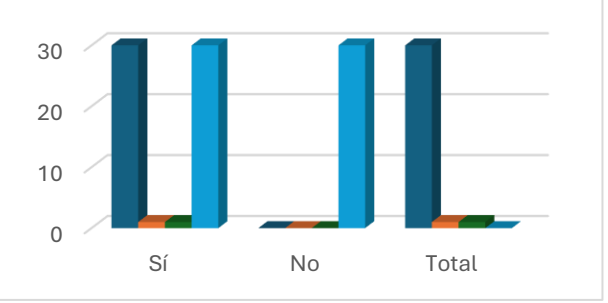
El 100 % de los estudiantes encuestados considera que el internet en su teléfono móvil es muy.

Si pudieras mejorar la señal de internet, ¿preferirías tener acceso a 4G LTE?

Respuesta:

Figura 22

Si pudieras mejorar la señal de internet, ¿preferirías tener acceso a 4G LTE? Encuesta#1



Análisis:

El 100.0 % de los estudiantes encuestados manifestó que preferiría tener acceso a tecnología 4G LTE.

8.1.1.2. Resultados de Encuesta 2: Sector Adulto Productivo (21-50 años).

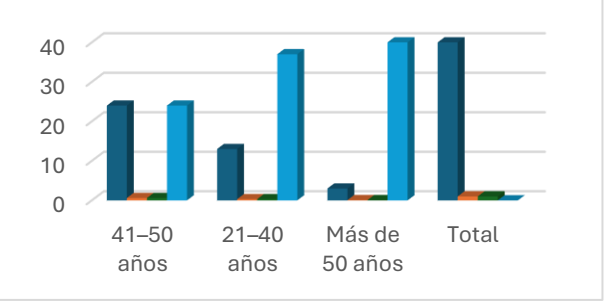
En este apartado se presentan los resultados de la Encuesta #2 mostrada en nuestro Anexo E, dirigida a personas entre 21 y 50 años que forman parte del sector adulto productivo de la comunidad David Tejada de los cuales a la hora de aplicar la encuesta solo se pudo encontrar a 40 personas dentro de este rango. El propósito del análisis es determinar el nivel de acceso a los servicios de telecomunicaciones y el uso que hacen de las tecnologías de comunicación en el ámbito personal, laboral y económico.

1. ¿Cuántos años tienes?

Las respuestas fueron:

Figura 23

¿Cuántos años tienes? Encuesta#2



Análisis:

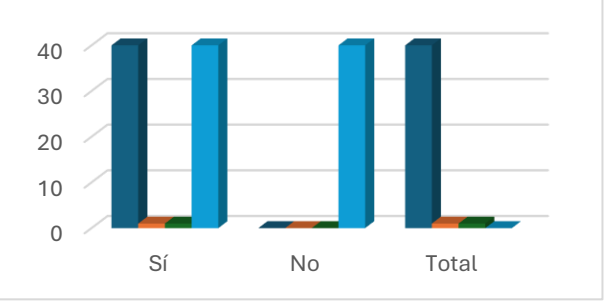
El 60.0 % de los adultos encuestados tiene entre 41 y 50 años, el 32.5 % está en el rango de 21 a 40 años, y el 7.5 % supera los 50 años.

2. ¿Usas tu teléfono móvil para acceder a internet en tu trabajo o uso personal?

Respuestas:

Figura 24

¿Usas tu teléfono móvil para acceder a internet en tu trabajo o uso personal? Encuesta#2



Análisis:

El 100 % de los adultos encuestados afirmó que utiliza su teléfono móvil para acceder a internet, tanto en su trabajo como para uso personal.

¿Qué tan seguido usas internet en tu teléfono móvil para el trabajo o negocio?

Respuesta:

Figura 25

¿Qué tan seguido usas internet en tu teléfono móvil para el trabajo o negocio? Encuesta#2



Análisis:

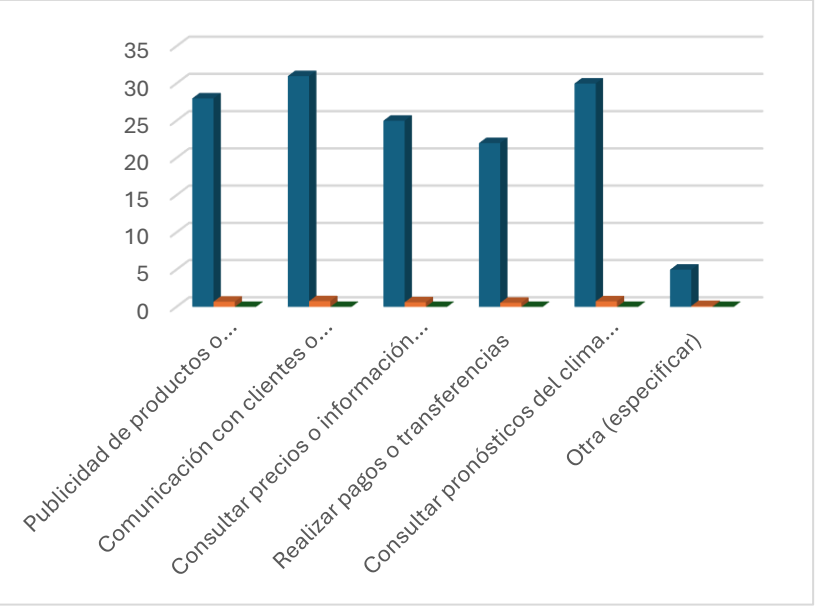
El 32.5 % de los adultos encuestados indicó que utiliza internet en su teléfono móvil todos los días para el trabajo o negocio, el 25.0 % lo hace algunas veces a la semana, y el 42.5 % solo de vez en cuando. Ninguno de los encuestados afirmó no utilizarlo nunca.

3. ¿Para qué actividades usas internet en tu teléfono móvil para el trabajo? (Puedes marcar más de una opción)

Respuestas:

Figura 26

¿Para qué actividades usas internet en tu teléfono móvil para el trabajo? Encuesta#2



Análisis:

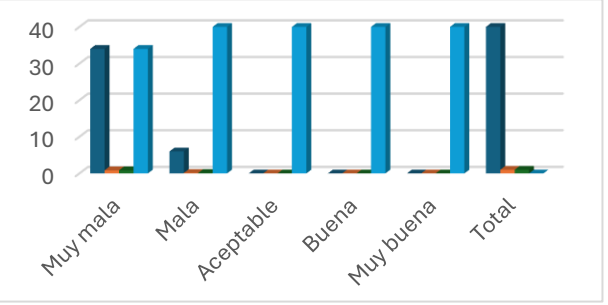
Los resultados muestran que la opción más seleccionada fue “Comunicación con clientes o proveedores”, marcada por 31 personas (77.5 %), seguida de “Consultar pronósticos del clima o temas agrícolas”, con 30 respuestas (75 %). En tercer lugar, se encuentra “Publicidad de productos o servicios”, elegida por 28 personas (70 %), lo cual refleja un uso activo del internet móvil para promoción y visibilidad comercial. Actividades como “Consultar precios o información del mercado” y “Realizar pagos o transferencias” también fueron frecuentes, con 25 (62.5 %) y 22 (55 %) respuestas respectivamente. Finalmente, 5 personas (12.5 %) marcaron la opción “Otra”, lo que sugiere usos adicionales no contemplados inicialmente.

4. ¿Cómo calificarías la calidad de la señal para realizar tus actividades laborales en línea?

Respuesta:

Figura 27

¿Cómo calificarías la calidad de la señal para realizar tus actividades laborales en línea? Encuesta#2



Análisis:

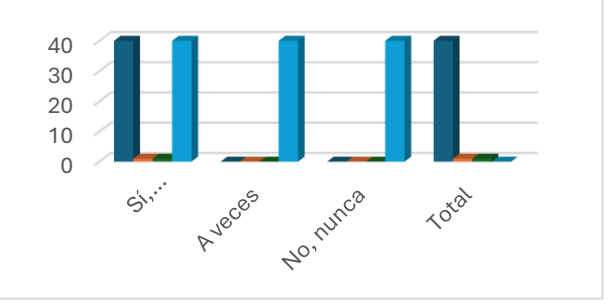
El 85.0 % de los adultos encuestados calificó la calidad de la señal para realizar actividades laborales en línea como muy mala, y el 15.0 % la consideró mala. No se registraron respuestas en las categorías aceptable, buena ni muy buena.

5. ¿Has tenido problemas para realizar pagos en línea o comunicarte con clientes o proveedores debido a la mala calidad de la señal?

Respuestas:

Figura 28

¿Has tenido problemas para realizar pagos en línea o comunicarte con clientes o proveedores debido a la mala calidad de la señal? Encuesta#2



Análisis:

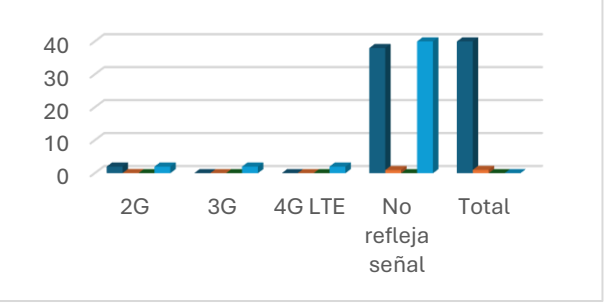
El 100.0 % de los adultos encuestados indicó que ha tenido problemas frecuentes para realizar pagos en línea o comunicarse con clientes o proveedores debido a la mala calidad de la señal.

6. ¿Qué tipo de señal captas en tu teléfono móvil?

Respuestas:

Figura 29

¿Qué tipo de señal captas en tu teléfono móvil? Encuesta#2



Análisis:

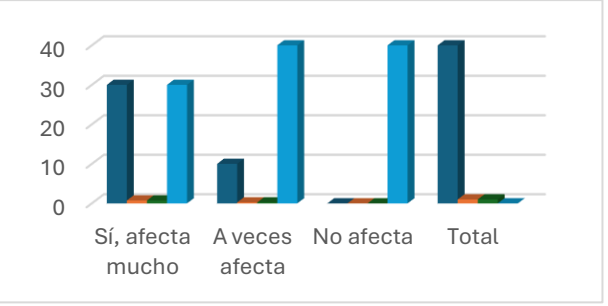
El 95 % reportó no captar señal en su teléfono móvil, mientras que solo el 5 %) recibió señal 2G. No se detectó señal 3G ni 4G LTE.

7. ¿Consideras que la velocidad de internet (2G, 3G) afecta negativamente tu productividad laboral?

Respuestas:

Figura 30

¿Consideras que la velocidad de internet (2G, 3G) afecta negativamente tu productividad laboral? Encuesta#2



Análisis:

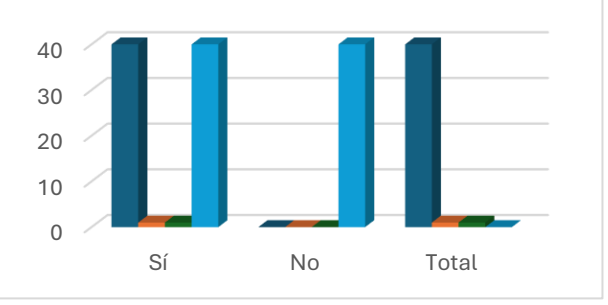
El 75.0 % de los adultos encuestados considera que la velocidad de internet afecta mucho su productividad laboral, mientras que el 25.0 % indicó que la afecta solo en ocasiones. Ningún encuestado señaló que la velocidad no tenga impacto.

8. ¿Te gustaría tener acceso a una mejor señal, como 4G LTE, para mejorar tu negocio o trabajo?

Respuestas:

Figura 31

¿Te gustaría tener acceso a una mejor señal, como 4G LTE, para mejorar tu negocio o trabajo? Encuesta#2



Análisis:

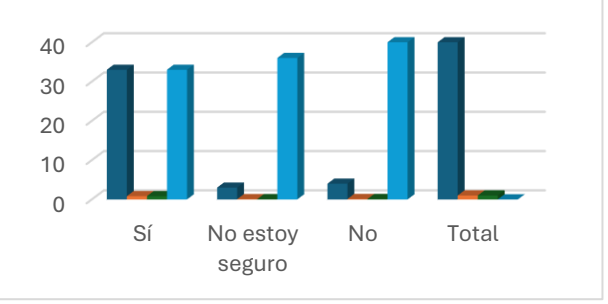
El 100 % de los adultos encuestados manifestó que le gustaría tener acceso a una señal más avanzada, como 4G LTE, para mejorar su negocio o trabajo.

9. ¿Estarías dispuesto a pagar más por un servicio de internet de mejor calidad para tu uso personal y/o negocio?

Respuestas:

Figura 32

¿Estarías dispuesto a pagar más por un servicio de internet de mejor calidad para tu uso personal y/o negocio? Encuesta#2



Análisis:

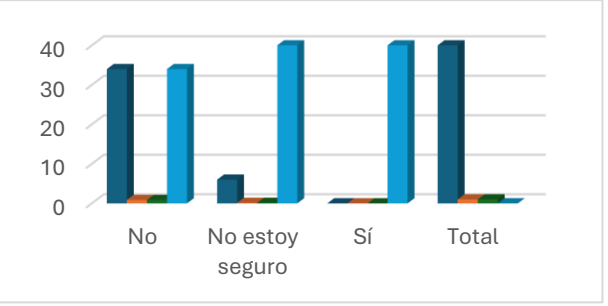
El 83.3 % de los adultos encuestados manifestó que estaría dispuesto a pagar más por un servicio de internet de mejor calidad, el 7.5 % no está seguro, y el 10.0 % indicó que no estaría dispuesto a realizar ese gasto adicional.

10. ¿Considera que las instalaciones de telecomunicaciones en su comunidad son suficientes para cubrir sus necesidades de comunicación y acceso a Internet?

Respuestas:

Figura 33

¿Considera que las instalaciones de telecomunicaciones en su comunidad (David Tejada) son suficientes para cubrir sus necesidades de comunicación y acceso a Internet? Encuesta#2



Análisis:

El 86.7 % de los adultos encuestados considera que las instalaciones de telecomunicaciones en su comunidad no son suficientes para cubrir sus necesidades de comunicación y acceso a Internet, mientras que el 13.3 % se mostró indeciso.

8.2. Resultados del objetivo específico #2: Crear el diseño de un sistema de antenas de acuerdo con la Ley No. 1223, Ley General de Telecomunicaciones Convergentes y la Ley No. 843, Ley que Regula la Ubicación, Construcción e Instalación de Estructuras de Soporte para Equipos de Telecomunicaciones que Hacen Uso del Espectro Radioeléctrico.

De acuerdo con la investigación realizada sobre el marco regulatorio vigente en materia de telecomunicaciones en Nicaragua, se concluye que el diseño del presente sistema se encuentra respaldado legalmente. Las leyes principales que rigen este sector como es la Ley No. 1223, Ley General de Telecomunicaciones Convergentes, y la Ley No. 843, que regula la ubicación e instalación de estructuras para telecomunicaciones establecen principios clave como la neutralidad tecnológica, el fomento a la innovación, la libre competencia y el desarrollo social.

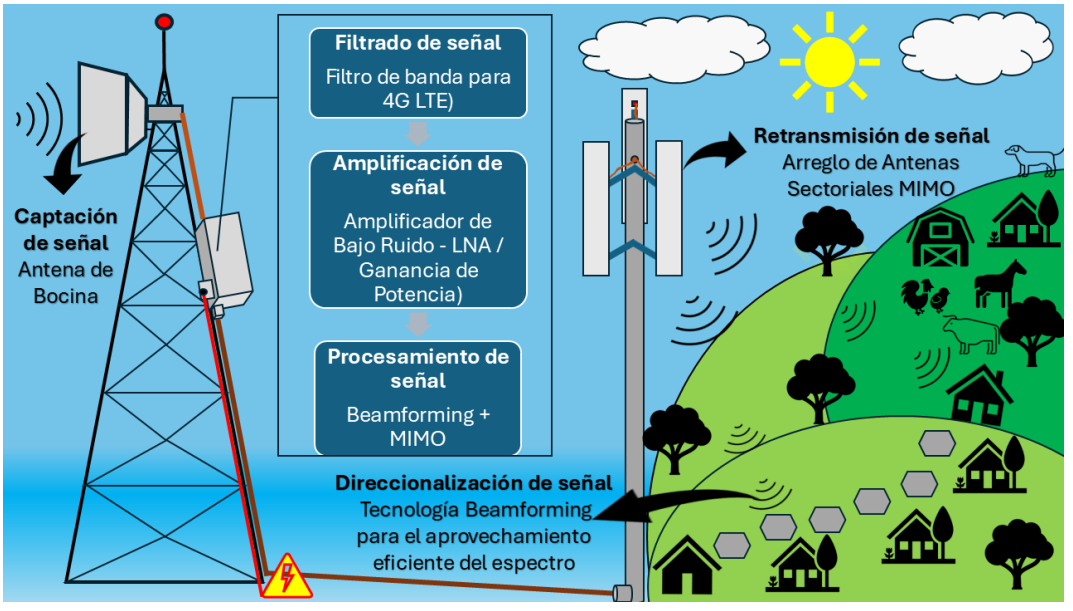
Dichas normativas permiten a operadores, proveedores y diseñadores proponer soluciones tecnológicas ajustadas a las necesidades del mercado, siempre y cuando respeten los

lineamientos establecidos por TELCOR. En este contexto, y considerando que el presente trabajo corresponde a una propuesta académica de diseño y simulación sin implementación física, no se requiere de permisos de instalación ni autorización para uso de espectro radioeléctrico, respetando así plenamente las regulaciones vigentes.

Por tanto, como se muestra en la Figura 34, la siguiente propuesta de diseño inicial del sistema de antenas responde tanto a criterios técnicos como a las disposiciones legales aplicables:

Figura 34

Diseño inicial de un sistema de antenas integrado con amplificación y tecnologías avanzadas de MIMO y Beamforming



Nota. La figura representa el diseño del sistema propuesto en su Fase 1, orientado a mejorar la cobertura de red móvil en la comunidad. En esta etapa, la señal LTE es captada mediante una antena de bocina direccional ubicada estratégicamente en una zona elevada. Luego, la señal pasa por un proceso de filtrado con un filtro pasabanda, amplificación mediante un LNA y procesamiento por técnicas de Beamforming y MIMO. Finalmente, se realiza la retransmisión sectorizada de la señal utilizando un arreglo de antenas MIMO, optimizando la cobertura y la

eficiencia espectral. Esta fase permite llevar conectividad a zonas rurales que anteriormente no contaban con acceso confiable a la red. **Fuente:** Elaboración propia.

Para facilitar una mejor comprensión de este sistema, se procederá a desglosar cada uno de sus componentes esenciales, detallando sus características, cálculos de las especificaciones técnicas asignadas para garantizar el funcionamiento requerido.

8.2.1. Diseño de la Antena de bocina receptora

Para este diseño inicial, se empleará el software MATLAB® junto con su aplicación Antenna Designer, ampliamente reconocida en el ámbito académico y científico por su versatilidad, precisión y facilidad de uso. Esta herramienta resulta especialmente útil para el modelado, simulación y análisis de sistemas de antenas complejos.

Como lo destaca MathWorks (s.f.):

> ″MATLAB® es el entorno de computación más fácil y productivo para ingenieros y científicos. Ya sea para matemáticas, gráficas o programación, su diseño se adapta a la forma en que piensa y el trabajo que realiza″.

Dado que se trata de un diseño preliminar de una antena de bocina, se establecerán los parámetros y propiedades fundamentales que definen su estructura y comportamiento electromagnético. Estos valores son esenciales para configurar correctamente el modelo, permitiendo simulaciones que reflejen de forma realista el funcionamiento físico del sistema.

La selección de cada parámetro se realiza en función de criterios técnicos, considerando la eficiencia de la antena, las condiciones ambientales y los requerimientos de cobertura específicos en la zona de estudio. A continuación, se presenta la Tabla 4 con las propiedades definidas, acompañadas de su respectiva justificación técnica.

Tabla 5

Tabla de parámetros a utilizar para el diseño de la antena de bocina

Propiedades	**Valores**	**Justificación**
Center Frecuency	2600Mhz (2,6Ghz)	Banda 7 LTE. Asegura compatibilidad con infraestructuras móviles 4G y optimiza la recepción de señales LTE para mejorar el SNR del downlink.
FlareLength-Lngitud de la bengala de la bocina	1m	Este valor óptimo equilibra la expansión del frente de onda y la minimización de errores de fase en la apertura, asegurando la suma constructiva de las ondas para una recepción LTE eficiente
Flarewidth-Anchode la bengala de la bocina	0.7m	Define la dimensión de la apertura en el plano H. Optimiza el ancho de haz horizontal y la distribución de amplitud, mejorando la direccionalidad para recepción LTE selectiva.
FlareHeight-Altura de la bengala de la bocina	0.7m	Establece la dimensión de la apertura en el plano E. Controla el ancho de haz vertical y la distribución de fase, contribuyendo a la eficiencia de

Propiedades	Valores	Justificación
		apertura y un patrón de radiación balanceado para LTE.
Length-Longitud de guia de Ondas rectangular	0.12m	Esta sección recta de la guía de ondas estabiliza el modo de propagación (TE10) antes del ensanchamiento. Asegura una transición suave y minimiza reflexiones, optimizando la adaptación de impedancia para la eficiencia de la antena LTE.
Width-Ancho de guia de Ondas rectangular	0.10m	Esta dimensión del lado largo de la guía de ondas rectangular es vital para habilitar la propagación del modo TE10 a 2600 MHz. Asegura una transmisión de potencia eficiente y la correcta excitación de la bocina.
Heigth-Altura de guia de Ondas rectangular	0.5m	Dimensión del lado corto de la guía de ondas rectangular. Esencial para el funcionamiento monomodo (TE10), contribuye a la adaptación de impedancia y previene modos superiores.
Feedwidth-Ancho de avance	0.0032306m	Define el ancho de la sonda o acople dentro de la guía de ondas. Es crítico para la

Propiedades	Valores	Justificación
		adaptación de impedancia y la excitación eficiente del modo TE10 a 2600 MHz, maximizando la transferencia de potencia.
FeedHeigth-Altura de avance	0.026904m	Esta altura de inserción de la sonda optimiza la adaptación de impedancia y el acoplamiento eficiente entre la línea de transmisión y la guía de ondas. Es crucial para maximizar la transferencia de potencia y minimizar S11 en 2600 MHz, mejorando la recepción LTE.
FeedOffset-Desplazamiento con signo del punto de alimentacion desde el plano de tierra	[-0.037019 0]	Define la posición longitudinal de la sonda dentro de la guía de ondas. Es crítico para el ajuste fino de la impedancia de entrada y la máxima transferencia de potencia, lo que minimiza el S11 y asegura la excitación eficiente del modo TE10 a 2600 MHz para LTE.
Tilt(deg)-Angulo de inclinacion de la antena	0 °	Un ángulo de inclinación de 0 grados orienta la antena horizontalmente. Esto maximiza la potencia recibida del lóbulo

Propiedades	**Valores**	**Justificación**
		principal en una dirección específica, asumiendo una línea de visión directa con la estación base LTE para una óptima captación de señal.
TiltAxis-Eje de inclinacion de la antena	[1 0 0]	Define el eje X global para cualquier rotación de inclinación. Aunque el tilt es 0, esta especificación es una definición geométrica que asegura la correcta alineación de los planos de radiación de la bocina con el sistema de coordenadas.
Conductor	Alimunium	Se escogió Aluminio por su alta conductividad, minimizando pérdidas óhmicas y manteniendo la eficiencia de radiación. Es ligero, rentable y resistente a la corrosión, ideal para la fabricación.
Conductivity-Conductividad	37700000	Valor de conductividad del aluminio. Estima pérdidas óhmicas reales y refina la eficiencia de radiación en la

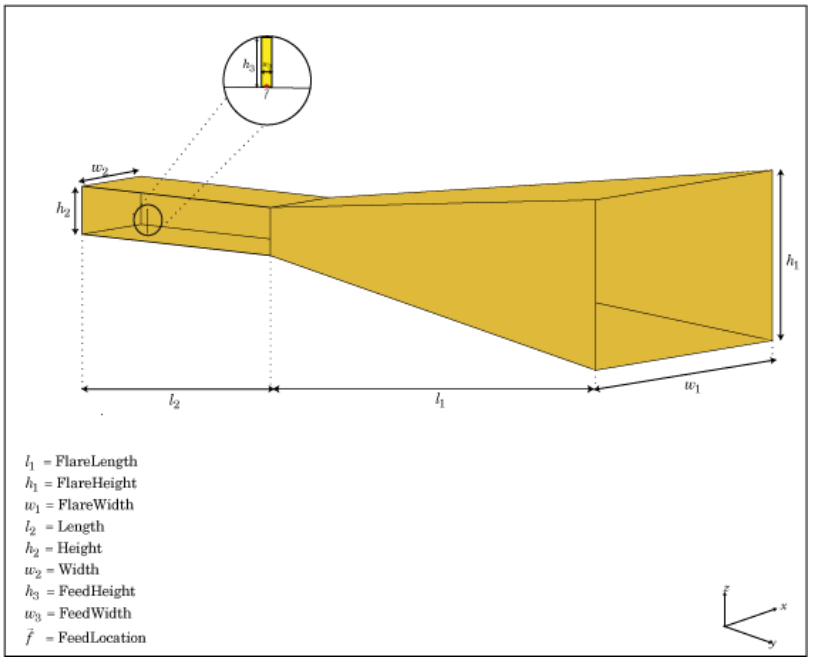
Propiedades	Valores	Justificación
		simulación, acercando el modelo al rendimiento físico.
Thickness	0.000762	Define el grosor de las paredes de la bocina. Asegura la viabilidad de fabricación y la integridad estructural, influyendo mínimamente en la distribución de corriente por efecto skin.

Los parámetros detallados en la tabla anterior definen con precisión cada sección de la antena de bocina piramidal. Para una mejor comprensión de cómo estas dimensiones se relacionan con la estructura física del dispositivo, se presenta una vista general de la antena con sus componentes principales claramente identificados. Esta representación visual, obtenida del entorno de diseño, es clave para entender la distribución de las partes que, en conjunto, permiten la operación óptima a la frecuencia de diseño y la recepción eficiente de señales LTE.

A continuación, se muestra la Figura 35, con las partes principales de la antena para mayor comprensión de sus dimensiones.

Figura 35

Partes de una antena de bocina piramidal de MATLAB



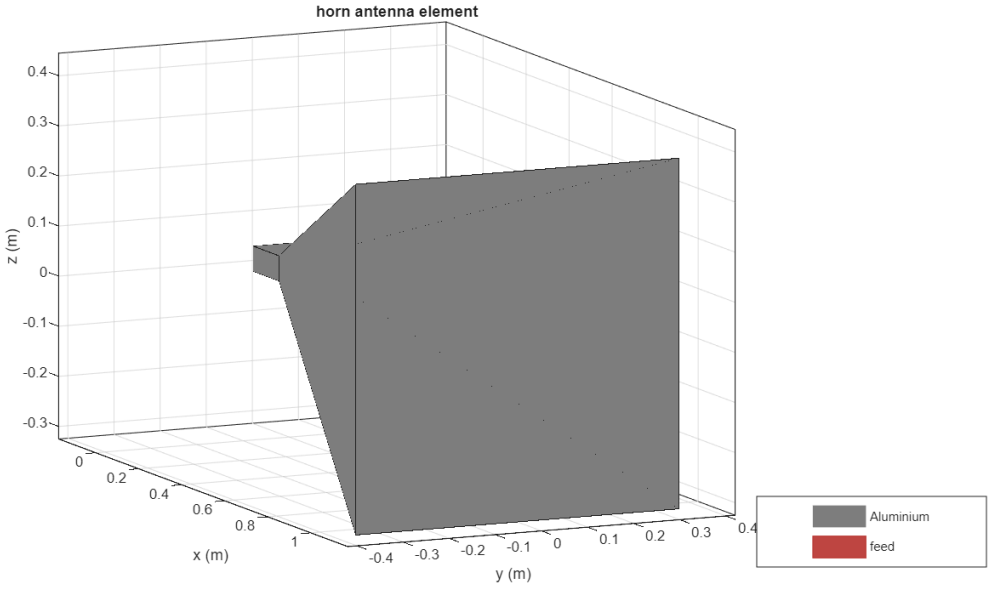
Nota. La figura muestra el diseño geométrico de una antena de bocina rectangular, utilizada para la captación de señal LTE en la Fase 1 del sistema propuesto. Se indican sus principales dimensiones físicas: longitud del flare , ancho , alto , dimensiones de la guía de onda , y parámetros del sistema de alimentación, como la altura , ancho y la posición del pin de excitación. **Fuente:** (The MathWorks, s.f.).

Con base en los parámetros de diseño detallados en la tabla anterior, los cuales fueron meticulosamente optimizados para operar a 2600 MHz en la banda LTE, se generó el modelo tridimensional de la antena de bocina piramidal en MATLAB Antenna Designer. Cada una de las dimensiones y propiedades de los materiales, desde la longitud y el ancho de ensanchamiento hasta las características de la guía de ondas de alimentación, fueron seleccionadas para asegurar una alta eficiencia de radiación, una excelente adaptación de impedancia y una ganancia direccional óptima para la recepción de señales del downlink. La visualización de este diseño es fundamental para comprender la geometría y la estructura física de la antena.

A continuación, se presenta la representación gráfica del diseño obtenido, tal como se muestra en la Figura 36.

Figura 36

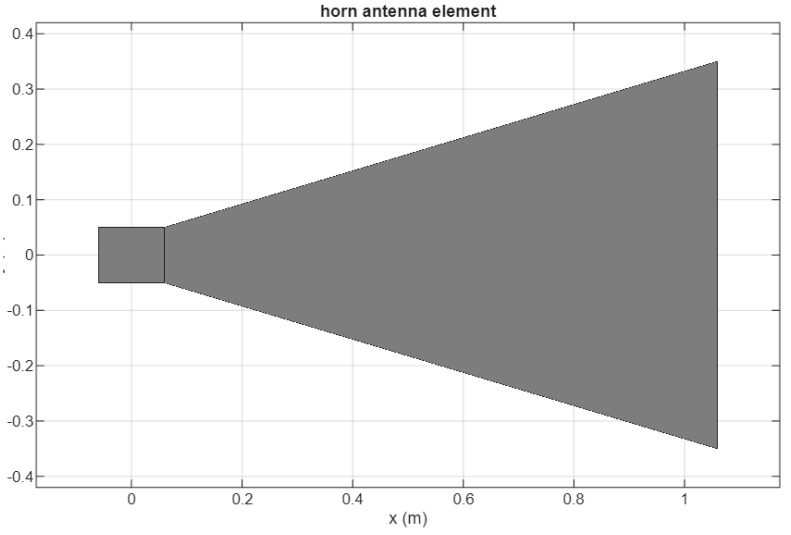
Antena de bocina obtenida, Vista en perspectiva 3D



Nota. Resultado de la simulación en vista XY de la antena de bocina rectangular diseñada para captar señal LTE. Se observa la geometría frontal del modelo, evidenciando la apertura rectangular que define el patrón de radiación. Esta vista permite evaluar las dimensiones físicas de la apertura y verificar la simetría del diseño, aspectos esenciales para garantizar una buena directividad y acoplamiento con la señal incidente. La antena fue modelada en aluminio con alimentación tipo pin, y forma parte del sistema propuesto para la Fase 1 de captación de señal.
Fuente: Elaboración propia obtenida de MATLAB.

Figura 37

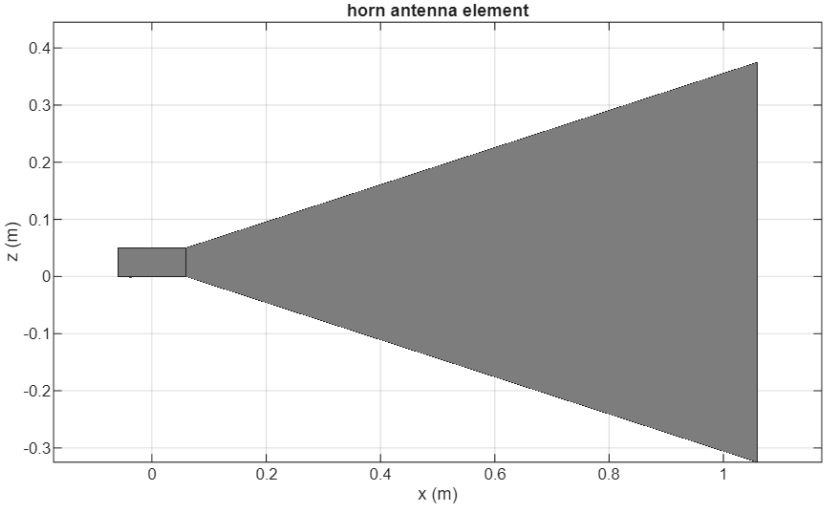
Vista XY del modelo simulado de la antena de bocina rectangular



Nota. En esta perspectiva se aprecia la apertura de la bocina en el plano horizontal, lo cual permite analizar el ángulo de radiación y la simetría del diseño. Este tipo de visualización es útil para verificar que la geometría permita una correcta directividad hacia el frente, asegurando una captación eficiente de la señal. **Fuente:** Elaboración propia obtenida de MATLAB.

Figura 38

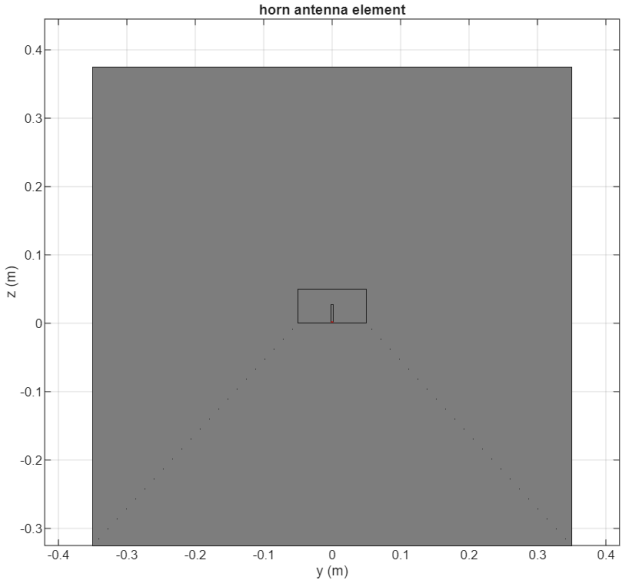
Vista XZ del modelo simulado de la antena de bocina rectangular



Nota. Esta vista permite observar la apertura vertical de la bocina, lo cual es clave para analizar el comportamiento de la antena en el plano de elevación. **Fuente:** Elaboración propia obtenida de MATLAB.

Figura 39

Vista YZ del modelo simulado de la antena de bocina rectangular



Nota. Desde esta perspectiva se visualiza la apertura completa de la boca de la antena, lo que permite analizar su geometría frontal y verificar la simetría del diseño. También se aprecia la ubicación del sistema de alimentación en el centro de la guía de onda. Esta vista es clave para evaluar la distribución de energía y el acoplamiento entre el alimentador y la estructura. **Fuente:** Elaboración propia obtenida de MATLAB.

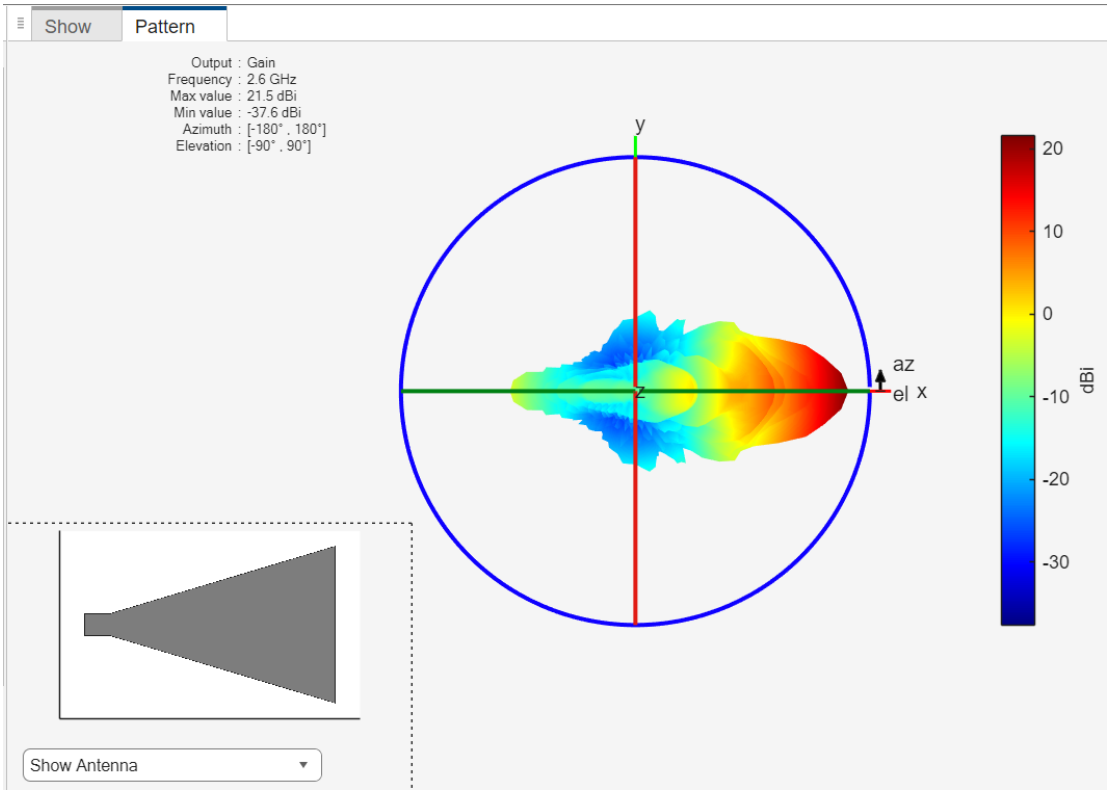
Dadas las especificaciones establecidas y el modelo geométrico obtenido mediante MATLAB, como se mostró desde la figura 36-39, se cuenta con una antena de bocina diseñada específicamente para operar en la banda de 2.6 GHz. Las dimensiones seleccionadas y la visualización tridimensional del diseño en sus diferentes ángulos permiten validar la integridad física del modelo antes de su evaluación electromagnética.

Con base en este diseño, se procederá a la fase de simulación utilizando las herramientas especializadas de MATLAB, con el objetivo de analizar parámetros clave como ganancia(dbi), patrón de radiación, el coeficiente de reflexión S11, el ancho de banda operativo, directividad de la antena y eficiencia. Estos análisis permitirán verificar el desempeño de la antena y su potencial integración dentro del sistema general de telecomunicaciones propuesto.

Corriendo la simulación tenemos los primeros resultados, ganancia de la antena en decibelios y el patrón de radiación en el mismo apartado como se muestra a continuación en la Figura 40:

Figura 40

Patrón de radiación en 3D de la antena de bocina rectangular a 2.6 GHz



Nota. Esta imagen muestra cómo se comporta la señal que emite o recibe la antena de bocina. El color rojo indica la dirección donde la antena concentra mejor la señal, logrando una alta ganancia (hasta 21.5 dBi) en la frecuencia de 2.6 GHz. **Fuente:** Elaboración propia obtenida de MATLAB.

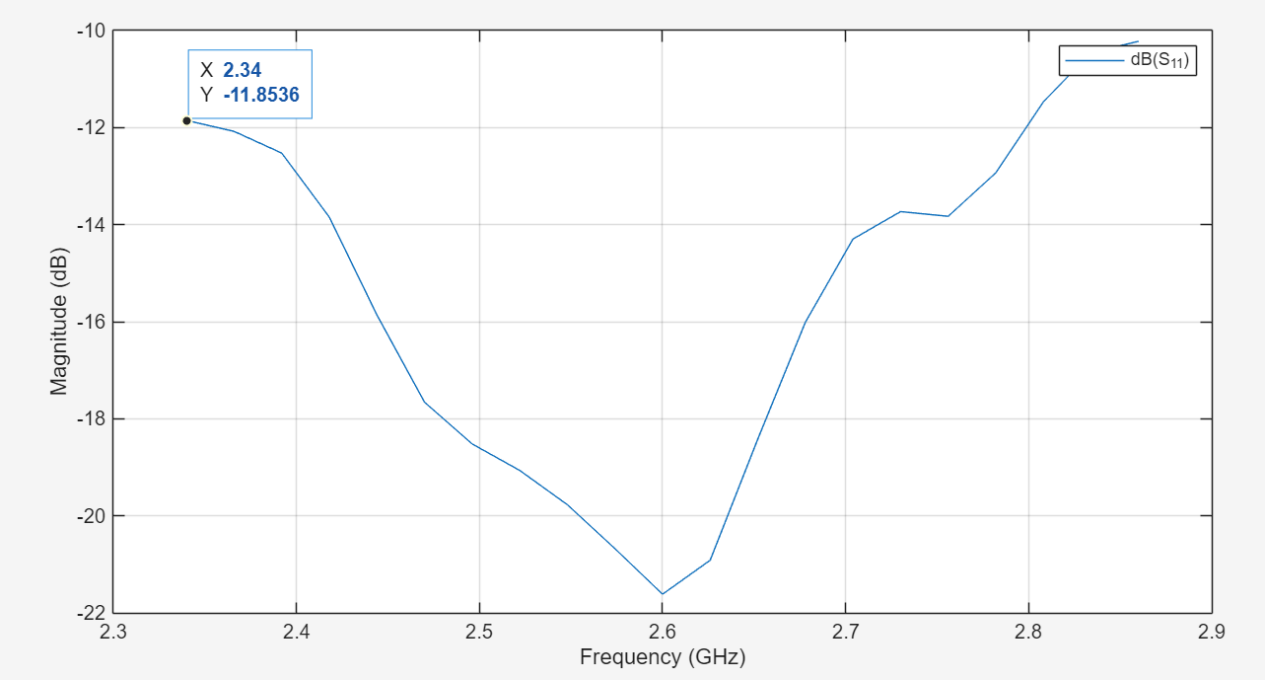
La simulación del diseño de la antena de bocina permitió obtener el patrón de radiación y la ganancia máxima del sistema en su frecuencia de operación, 2.6 GHz. El resultado muestra una ganancia máxima de 21.5 dBi.

El patrón de radiación presenta un lóbulo principal bien definido orientado sobre el eje X, lo cual indica una emisión altamente dirigida hacia el frente de la antena, con una dispersión mínima hacia otras direcciones. Las zonas laterales y posteriores presentan niveles de ganancia muy bajos, cercanos a –37.6 dBi.

Para continuar con los resultados de la simulación analizaremos el coeficiente de reflexión el cual se muestra en la Figura 41 a continuación:

Figura 41

Curva del coeficiente de reflexión (S_{11}) de la antena de bocina rectangular en el dominio de frecuencia



Nota. Esta gráfica muestra cuánto de la señal se refleja en la antena. Un valor más bajo (como los que se ven cerca de 2.6 GHz). **Fuente:** Elaboración propia obtenida de MATLAB.

El análisis realizado por Matlab del parámetro S11 de la antena de bocina demuestra una adaptación efectiva en el rango de frecuencias entre 2.34 GHz y 2.85 GHz, donde la magnitud de S11 se mantiene por debajo de –10 dB.

Dado estos resultados de frecuencia mínima y máxima nos permiten calcular el ancho de banda de nuestra antena con la siguiente ecuación:

$$BW = f_{max} - f_{min}$$

Entonces tenemos que nuestro ancho de banda es:

$$BW = 2.81Ghz - 2.34Gh = 0.47 = 470\ MHz$$

También los parámetros de coeficiente de reflexión nos permiten calcular la frecuencia central y el ancho de banda fraccional (FBW), así que realizando los cálculos tenemos que la frecuencia central es:

$$f_c = \frac{2.81 + 2.34}{2} = 2.575\ GHz$$

Calculando el ancho de banda fraccional (FBW) tenemos que:

$$FBW\ (\%) = \left(\frac{f_{max} - f_{min}}{f_c}\right) x\ 100$$

$$FBW\ (\%) = \left(\frac{2.81GHz - 2.34GHz}{2.575GHz}\right) x\ 100 = \left(\frac{0.47}{2.575}\right) x\ 100 = 18.25\ \%$$

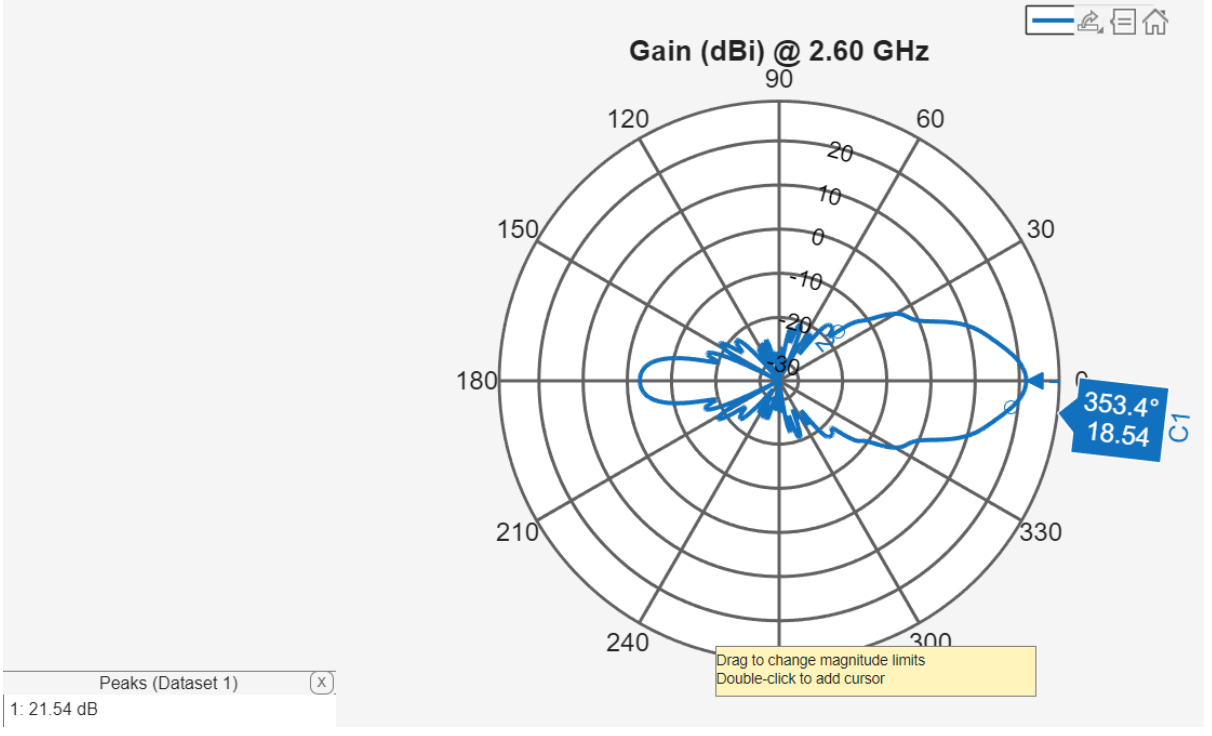
Como resumen general del análisis del parámetro S11 realizado mediante MATLAB demuestra que la antena de bocina mantiene una adaptación efectiva en el rango de frecuencias comprendido entre 2.34 GHz y 2.81 GHz. Con base en estas frecuencias se determinó un ancho de banda de 470 MHz, suficiente para cubrir tecnologías como LTE y otras aplicaciones en el

entorno de 2.6 GHz. Asimismo, se calculó una frecuencia central de 2.575 GHz, alrededor de la cual la antena muestra su mejor rendimiento. Finalmente, el valor del ancho de banda fraccional fue de 18.25 %.

Seguidamente se obtuvieron los resultados en el coeficiente de reflexión mostrados en la simulación como se muestra a continuación en la Figura 42, se procederá a calcular el ancho de haz de la antena de bocina para luego determinar la eficiencia(η) de nuestra antena.

Figura 42

Patrón de radiación en el plano azimutal de la antena de bocina rectangular a 2.6 GHz



Nota. En esta vista polar se representa cómo varía la ganancia en función del ángulo horizontal alrededor de la antena. El valor máximo de ganancia es de aproximadamente 21.54 dBi, concentrado en la dirección de 0°. **Fuente:** Elaboración propia obtenida de MATLAB.

El cálculo del ancho de haz a –3 dB en el plano de azimut se realizó siguiendo los procedimientos estándares donde se utiliza la gráfica polar del patrón de radiación generado en MATLAB como se mostró en la figura 42, donde se identifica el nivel de ganancia que corresponde a 3 dB por debajo del valor máximo.

En este caso, la antena presentó una ganancia máxima de 21.54 dBi, por lo que el nivel de referencia para estimar el ancho de haz se estableció en:

$$21.54 - 3 = 18.54 \text{ dBi}$$

A partir de la gráfica, se identificaron dos ángulos donde la ganancia cae exactamente a 18.54 dBi: uno en 353.4° y otro en 6.6°, valores que aparecen simétricamente respecto al eje principal (0°).

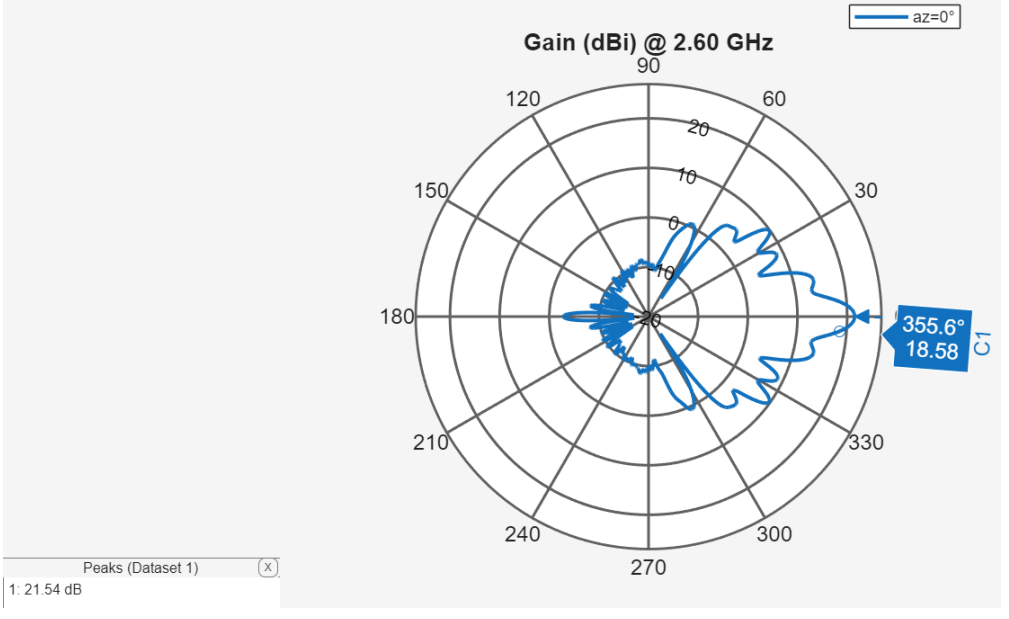
Usando la fórmula para calcular el ancho de haz teneos que:

$$\text{Ancho de haz} = 353.4 - 360 = -6.6° \times 2 = -13.2° = 13.2°$$

A continuación, para seguir con el cálculo de nuestro ancho de haz de nuestra antena se procede a calcular en Elevación como se muestra en la figura 43:

Figura 43

Patrón de radiación en el plano de elevación de la antena de bocina a 2.6 GHz



Nota. En esta representación polar se observa cómo se distribuye la ganancia en el plano vertical cuando la antena irradia hacia el frente. El lóbulo principal está centrado alrededor de los 0°. **Fuente:** Elaboración propia obtenida de MATLAB.

Una vez obtenido el patrón de elevación se obtuvo que la ganancia máxima registrada fue de 21.54 dBi igual que en azimut, por lo que el nivel de referencia a –3 dB se estableció en 18.54 dBi. Aunque este valor no apareció directamente en los datos, se utilizó el más cercano disponible, 18.58 dBi, cuya diferencia de apenas 0.04 dB se considera despreciable.

Entonces se obtuvo que:

$$\text{Ancho de haz} = 355.6 - 360 = -4.4° \times 2 = -8.8° = 8.8°$$

Una vez teniendo los dos ángulos de ancho de haz de Azimut en figura 42 y Elevación en figura 42, que son 13.2° y 8.8° procedemos a convertirlos a radianes de la siguiente manera:

$$13.2\,\frac{\pi}{180} = 0.230383$$

$$8.8\,\frac{\pi}{180} = 0.153589$$

Teniendo estos datos somos capaces de calcular la directividad y la eficiencia de la antena, para la directividad de la antena tenemos la ecuación:

$$D = \frac{4\pi}{Angulo\ de\ Azimuth * Angulo\ de\ Elevacion}$$

$$D = \frac{4\pi}{0.230383 * 0.153589} = 354.551$$

$$D = 25.4969\ db$$

Teniendo los resultados de 25.4969 en directividad de la Antena procedemos a calcular la eficiencia de la antena con la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{Ganancia\ (dbi)}{Directividad(db)}$$

$$\eta = \frac{21.5\ dbi}{25.4969\ db} = 0.84 = 84\ \%$$

Una vez analizado el patrón de radiación en elevación, se identificó que la ganancia máxima alcanzada fue de 21.54 dBi, valor que coincidió con el obtenido en el plano de azimut.

Para determinar el ancho de haz en elevación, se utilizó como referencia el nivel de –3 dB, estimado en 18.54 dBi. Aunque ese valor no se mostró de forma exacta en los datos simulados, se empleó el más cercano disponible, 18.58 dBi, cuya diferencia de 0.04 dB se considera despreciable. A partir de esta referencia, se obtuvo un ancho de haz en elevación de 8.8°, mientras que el correspondiente al plano de azimut fue de 13.2°.

Con ambos anchos de haz determinados, se procedió al cálculo de la directividad de la antena, obteniendo un valor aproximado de 25.5 dB. Finalmente, comparando la ganancia simulada con la directividad, se estimó una eficiencia del 84 %.

8.2.2. Diseño de Filtro pasa banda

Para garantizar la correcta selección de frecuencias en el sistema propuesto, se diseñará un filtro pasabanda microstrip centrado en una frecuencia de 2.6 GHz, adecuada para aplicaciones en telecomunicaciones móviles como LTE.

El proceso de diseño se iniciará estableciendo la frecuencia central (f_0) del filtro, y a partir de esta se calcularon los valores fundamentales para definir su desempeño: el ancho de banda fraccional (w), así como las frecuencias de corte inferior (f_1) y superior (f_2). Estos valores fueron determinados con base en las fórmulas clásicas del diseño de filtros Chebyshev, tomando en cuenta un ancho de banda fraccional del 10%.

Especificaciones del filtro

Frecuencia Central (f_0): 2.6 GHz

Ancho de banda fraccional (w):

$$w = \frac{(\omega^2 - \omega^1)}{\omega^0}$$

Donde:

- $\omega_1 = 2\pi f_1$ frecuencia angular inferior
- $\omega_2 = 2\pi f_2$ frecuencia angular superior
- $\omega_0 = \sqrt{(\omega^1 \cdot \omega^2)}$ frecuencia angular central geométrica

Se parte de una frecuencia central deseada:

f_0 = 2.6 GHz

Y un ancho de banda del 10%, lo cual significa que el filtro debe cubrir un rango del ±5%, esto se aplica así:

$$f_1 = f_0 \times (1 - \frac{10}{200}) = 2.6 \times 0.95 = 2.47 \text{ GHz}$$

$$f_2 = f_0 \times (1 + \frac{10}{200}) = 2.6 \times 1.05 = 2.73 \text{ GHz}$$

Nota: Se divide entre 200 porque el 10% se reparte en ±5% alrededor de f_0.

Conversión a frecuencia angular:

$$\omega_1 = 2\pi \times 2.47 \times 10^9 = 15.519 \times 10^9 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = 2\pi \times 2.73 \times 10^9 = 17.153 \times 10^9 \text{ rad/s}$$

Frecuencia angular central geométrica:

$$\omega_0 = \sqrt{(\omega_1 \cdot \omega_2)} = \sqrt{(15.519 \times 17.153) \times 10^9}$$

$$\omega_0 = 16.316 \times 10^9 \text{ rad/s}$$

$$f_0 \text{ (geométrica)} = \omega_0 / 2\pi = 2.5967 \text{ GHz}$$

Cálculo del ancho de banda fraccional

$$w = (\omega_2 - \omega_1) / \omega_0$$

$$w = (17.153 \times 10^9 - 15.519 \times 10^9) / 16.316 \times 10^9$$

$$w = 1.634 \times 10^9 / 16.316 \times 10^9$$

$$w = 0.1001$$

Frecuencia mínima y máxima (f_1 y f_2):

Formula:

$$f_1 = f_0 \cdot (1 - \frac{w}{2})$$

$$f_2 = f_0 \cdot (1 + \frac{w}{2})$$

Donde:

- f_0: Frecuencia central del filtro (en GHz).
- w: Ancho de banda fraccional (valor decimal).
- f_1: Frecuencia mínima o de corte inferior del filtro (en GHz).
- f_2: Frecuencia máxima o de corte superior del filtro (en GHz).

Calculando:

$$f_1 = 2.6 \cdot (1 - \frac{0.1001}{2}) = 2.6 \cdot 0.94995 = 2.4699 \text{ GHz}$$

$$f_2 = 2.6 \cdot (1 + \frac{0.1001}{2}) = 2.6 \cdot 1.05005 = 2.7301 \text{ GHz}$$

Frecuencia mínima (f_1): 2.4699 GHz

Frecuencia máxima (f_2): 2.7301 GHz

Posteriormente, para continuar con el diseño físico del filtro, se utilizará la herramienta en línea desarrollada por Marki Microwave, una plataforma profesional ampliamente reconocida en la industria de radiofrecuencia y microondas. Esta herramienta permite calcular automáticamente las dimensiones físicas de los resonadores, las separaciones entre ellos y otros parámetros esenciales a partir de especificaciones eléctricas como el tipo de respuesta (Chebyshev), el orden del filtro, la frecuencia de operación, el ripple deseado, las impedancias, y los parámetros del substrato.

Su uso se justifica principalmente para lograr mayor rapidez, simplicidad y precisión en el proceso de diseño, evitando cálculos manuales extensos y posibles errores de aproximación.

Según la propia empresa:

"En Marki Microwave, nuestro objetivo es inventar tecnologías que permitan a la industria de RF y microondas diseñar más rápido, simplificar la producción, eliminar la complejidad y romper las barreras de rendimiento" (Marki Microwave, 2025).

Como se muestra a continuación en la Tabla 5, los parámetros que serán establecidos fueron seleccionados para garantizar un comportamiento adecuado del filtro en torno a la frecuencia central de 2.6 GHz, cumpliendo con los requisitos de selectividad, adaptación y rechazo fuera de banda.

Tabla 6

Parámetros de diseño del filtro pasabanda microstrip tipo Chebyshev para Marki Microwave

Categoría	**Parámetro**	**Valor**	**Justificación**
Tipo de filtro	Tipo	Pasabanda	Filtro deseado para dejar pasar una banda específica en torno a 2.6 GHz
	Respuesta	Chebyshev	Se eligió Chebyshev por su mejor selectividad con rizado controlado
	Topología	Interdigital	Topología interdigital recomendada para líneas acopladas en microstrip
	Orden	5	Orden 5 elegido por compromiso entre rendimiento y complejidad
Frecuencias	Frecuencia de corte inferior (f_1)	2.4699 GHz	Seleccionada para cubrir el borde inferior de la banda útil

Categoría	**Parámetro**	**Valor**	**Justificación**
	Frecuencia de corte superior (f_2)	2.7301 GHz	Seleccionada para cubrir el borde superior de la banda útil
	Frecuencia central (f_0)	2.6 GHz	Calculada como ($f_1 + f_2$) /2, para centrar la banda pasante
	Ancho de banda fraccional (FBW)	10%	Calculado como ($f_2 - f_1$) / f_0 = 10%, define la selectividad del filtro
Rendimiento	Ondulación en banda pasante (Ripple)	0.5 dB	Valor estándar para buen balance entre atenuación y transición
Impedancias	Impedancia de entrada/salida	50 Ω	Impedancia estándar en telecomunicaciones y microondas
	Impedancia de resonadores	90 Ω	Valor común en resonadores para mantener líneas compactas
Substrato	Material	Rogers RO4003C	Material de bajo factor de pérdida, ideal para microondas
	Constante dieléctrica (ε_r)	3.55	Propiedad del substrato Rogers RO4003C

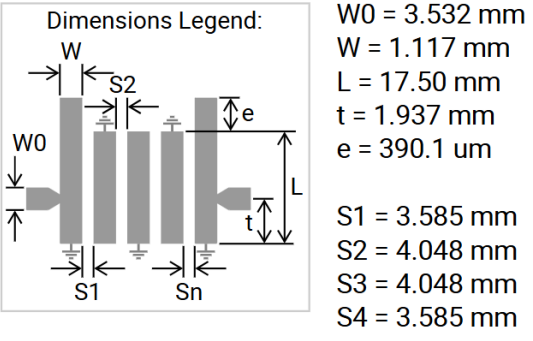
Categoría	Parámetro	Valor	Justificación
	Altura del dieléctrico	1.6 mm	Espesor típico para este tipo de substrato
	Espesor del conductor	0.035 mm	Espesor común del cobre laminado en PCBs (35 µm)

A partir de los parámetros definidos previamente, se procedió a generar el diseño físico del filtro utilizando la herramienta en línea de Marki Microwave. Esta herramienta permite visualizar tanto la configuración geométrica como las dimensiones exactas de cada línea resonante y las separaciones entre ellas, lo cual resulta fundamental para la posterior implementación en software de simulación electromagnética.

Como se muestra a continuación en la Figura 44, se obtuvo el diseño completo del filtro pasabanda Chebyshev de quinto orden con topología interdigital y junto con sus dimensiones físicas.

Figura 44

Dimensions del filtro pasabanda Chebyshev de 5.º orden con topología interdigital (Marki Microwave)

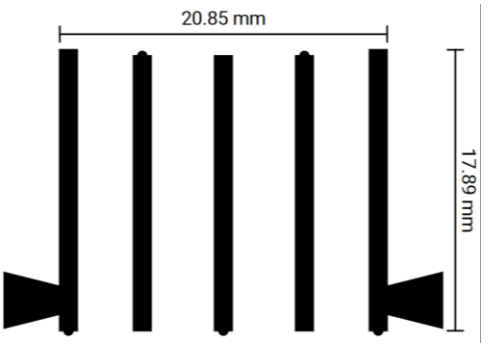


Nota. La imagen muestra el esquema dimensional del filtro pasabanda diseñado con respuesta Chebyshev de 5.º orden y topología interdigital, generado mediante la herramienta de diseño de

Marki Microwave. Se especifican las dimensiones críticas del diseño, incluyendo anchos de línea, longitudes de los resonadores y separaciones acopladas (S1 a S4), así como el espesor y la altura del conductor y del dieléctrico. Estas dimensiones sirven como base para su implementación física en tecnología microstrip sobre substrato Rogers RO4003C. **Fuente:** Elaboración propia obtenida de Marki Microwave.

Figura 45

Vista general del layout del filtro pasabanda Chebyshev de 5.º orden (topología interdigital)

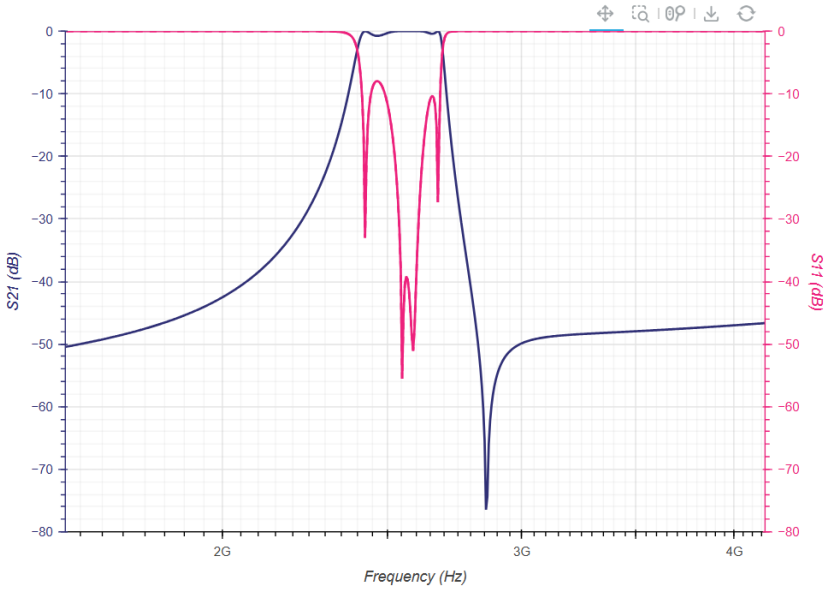


Nota. Se indican las dimensiones generales del layout: un ancho total de 20.85 mm y una altura de 17.89 mm, correspondientes al área ocupada por los cinco resonadores y las líneas de entrada/salida. Este diseño está pensado para implementación en tecnología microstrip, optimizado para operar en torno a 2.6 GHz. **Fuente:** Elaboración propia obtenida de Marki Microwave.

Después de determinar las dimensiones físicas del filtro mediante la herramienta en línea de Marki Microwave, se obtuvieron los resultados de simulación que permiten evaluar su desempeño en frecuencia. A continuación, se muestra la Figura 46 donde se presenta la gráfica de los resultados obtenidos de la Simulación de parámetros S (Scattering Parameters), y en la figura 300 que muestran los parámetros de la respuesta en fase y el retardo de grupo.

Figura 46

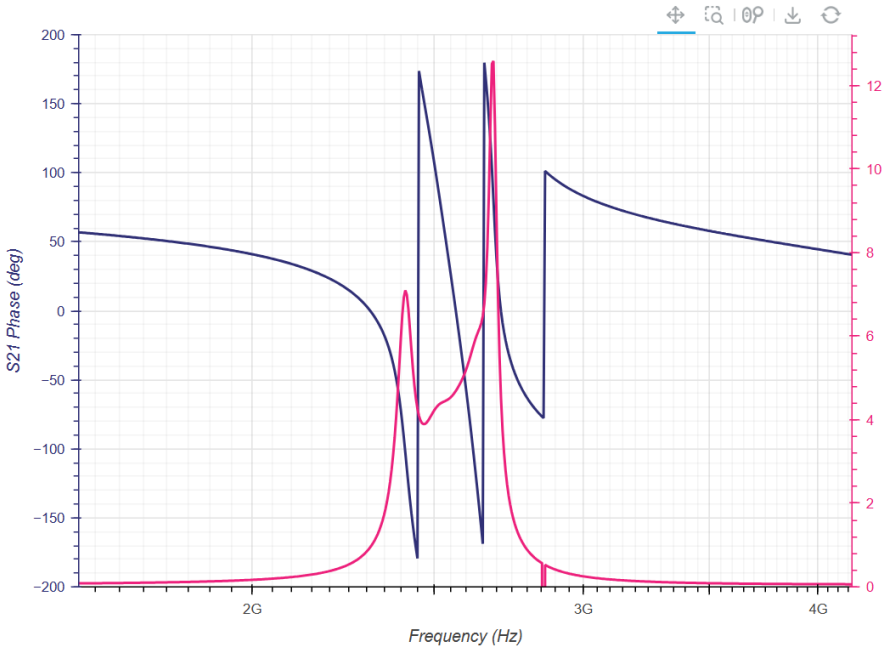
Respuesta en frecuencia del filtro pasabanda Chebyshev de 5.º orden (S_{21} y S_{11})



Nota. La gráfica muestra los parámetros S del filtro pasabanda diseñado: S_{21} (en azul) representa la transmisión y S_{11} (en rosa) representa la reflexión. Se observa que el filtro permite el paso de señales en una banda centrada alrededor de 2.6 GHz, donde S_{21} se mantiene cerca de 0 dB, indicando una buena transmisión. Al mismo tiempo, S_{11} presenta un valor bajo (muy negativo) en esa región. **Fuente:** Elaboración propia obtenida de Marki Microwave.

Figura 47

Fase de transmisión (S_{21} Phase) y retardo de grupo del filtro pasabanda Chebyshev de 5.º orden



Nota. Muestra cómo cambia la fase y el tiempo de paso de la señal a través del filtro. La curva azul representa la fase, y la rosa indica cuánto se retrasa la señal en diferentes frecuencias. En la zona útil (alrededor de 2.6 GHz), el retardo es estable. **Fuente:** Elaboración propia obtenida de Marki Microwave.

La segunda imagen Figura 47, presenta la respuesta en fase de S_{21} y el retardo de grupo del diseño inicial del filtro. Se aprecia una pendiente abrupta en la fase dentro de la banda de paso, característica de filtros de alta selectividad. El retardo de grupo se mantiene relativamente estable, oscilando entre 4 ns y 8 ns (nanosegundos).

8.2.3. Diseño del Amplificador de bajo ruido LNA (Low Noise Amplifier) CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)

Una vez que la señal de 2600 MHz sea captada por la antena de bocina y posteriormente filtrada mediante un filtro pasabanda microstrip, se diseñará un amplificador de bajo ruido

(LNA) CMOS que permitirá amplificar dicha señal con la menor degradación posible. El LNA estará optimizado para operar a la frecuencia objetivo, mejorando la sensibilidad del sistema y elevando el nivel de señal antes de su procesamiento o retransmisión, asegurando un desempeño adecuado dentro del sistema de telecomunicaciones propuesto.

Para el diseño del amplificador, se tomará como referencia el circuito del Amplificador de Bajo Ruido (LNA) CMOS de 1.5 GHz presentado en el libro *RF Microelectronics* de Behzad Razavi, (fig. 6-13, adaptación ilustrada en la Figura 11 de nuestro sustento teórico). Dicha topología será elegida por su eficacia comprobada en banda L y su facilidad para lograr adaptación a 50 Ω mediante la inductancia de degeneración. Se aplicarán las fórmulas analíticas descritas en Razavi para determinar $g_m, L_S, L_g,\ L_D$, recalculando cada componente para la nueva frecuencia de 2.6 GHz a través de la relación L = 1/ $(w_0^2\ C)$ y la condición R_{in} = 50 Ω. Este ajuste garantizará que el amplificador conserve las ventajas de bajo ruido y alta selectividad del diseño original mientras cumpla los requisitos específicos de la banda LTE utilizada en la comunidad.

Cálculos de los componentes del circuito

1) V_{in} **(Señal de entrada):**

Este nodo representara la entrada de la señal de radiofrecuencia (RF) al amplificador. La señal procederá de la antena de bocina a través del filtro pasabanda microstrip y presentará una amplitud muy baja; por ello se requerirá que el LNA la amplifique con la menor degradación posible en términos de figura de ruido.

Puesto que el filtro pasabanda habrá sido diseñado con una impedancia de salida de 50 Ω (véase Tabla 7), el amplificador deberá presentar una impedancia de entrada también de50 Ω. Esta coincidencia de impedancias garantizara una adaptación adecuada entre ambos bloques, garantizando una transferencia de potencia eficiente y minimizando las pérdidas por reflexión.

2) L_1 (Inductor de puerta), L_S (Inductor de degeneracion de fuente):

El inductor L_1 (véase Figura 11), estará conectado entre la entrada de señal V_{in} y la compuerta del transistor principal M_1. Este componente formará parte del circuito resonante de entrada y desempeñará un rol clave en dos aspectos:

- Adaptación de impedancia a 50 Ω
- Sintonización precisa a la frecuencia de 2.6 GHz

Para cumplir ambos requisitos, la impedancia de entradaZ_{in} del amplificador deberá satisfacer:

$$\Re\{\text{Zin}\} = 50\Omega,\ \Im\{\text{Zin}\} = 0 \quad \text{en } \omega_0$$

Esto se logrará mediante la red constituida por L_1, el inductor de degeneración L_S, y la capacitancia intrínseca compuerta-fuente C_{gs} del transistor M_1, entonces para calcular L_1, debemos primero calcular la adaptación de impedancia L_S, con la siguiente formula:

$$L_S = \frac{R_{in}\, C_{GS}}{g_m}$$

Donde;

- R_{in} = Impedancia deseada en la entrada , 50 Ω
- g_m = Transconductancia de M1 , 20 mS = 0.02 S
- C_{GS} = Capacitancia compuerta-fuente de M1 = 173 fF

Calculando la tenemos que:

$$L_S = \frac{R_{in}\, C_{gs}}{g_m} = \frac{50\ \Omega \text{ x } 173 \text{ x } 10^{-15}\ F}{0.02\ s} = 4.3 \text{ x } 10^{-10}\text{H} = 0.43 \text{ nH (nanohenrios)}$$

Teniendo la degeneración de fuente seguimos con el cálculo de resonancia de entrada con la formula:

$$L_1 + L_s = \frac{1}{w_0^2\ C_{gs}}$$

Donde;

$$w_0 = 2\pi \times 2.6\text{GHz} = 16.34\times\ 10^9\text{rad/s}$$

Sustituyendo tenemos que:

$$L_1 + L_s = \frac{1}{(16.34\ x\ 10^9)^2\ x\ 173\ x\ 10^{-15}} = 2.17\ \text{x}\ 10^{-8}\text{H} = 21.7\ \text{nH}$$

Dicho resultado nos permite calcular la inductancia de puerta L_1, donde tenemos que:

$$L_1 = (L_1{+}L_s) - L_s = 21.7\text{nH} - 0.43\text{nH} = 21.2\text{nH}$$

Así que tenemos como resultado L_1= 21.2 nH y L_s = 0.43 nH.

3) M_1 (Transistor principal):

El transistor M_1 se dimensionará con una razón geométrica W/L que garantice la transconductancia requerida, manteniendo la región de saturación y una figura de ruido baja. Se adoptará la tecnología CMOS de 0.18 µm para operar eficientemente a 2.6 GHz.

Para determinar W/L se usará la expresión derivada del modelo de saturación:

$$g_m = \sqrt{2K_n \cdot \frac{W}{L}} \cdot I_D$$

Despejando $\frac{W}{L}$:

$$\frac{W}{L} = \frac{g_m^2}{2k_n\ x\ I_D}$$

Donde:

- g_m = 20 mS = 0.02 S
- I_D = 1mA = 0.001 A (Valor típico para LNA)
- K_n = 200 μA/V^2 = 200 x 10 − 6ª / V^2 = 0.0002 A/V^2

Sustituyendo en la formula tenemos que:

$$\frac{W}{L} = \frac{(0.02)^2}{2\ x\ 0.0002\ x\ 0.001}$$

$$\frac{W}{L} = \frac{0.0004}{0.0000004} = 1000$$

Esto significa que el transistor M_1 necesita un ancho (W) mil veces mayor que su longitud (L), como L suele ser el mínimo de la tecnología (en este caso L=0.18μm), entonces:

W = 1000 x 0.18 μm = 180 μm

4) M_2 (Transistor del espejo de corriente):

M_2 forma parte de un espejo de corriente junto con M_1 . Su función es garantizar que la corriente I_D =1 mA fluya por el transistor M_1 de manera constante, estabilizando el funcionamiento del LNA. M_2 establece esa corriente a través de una rama de referencia.

Para establecer un funcionamiento estable del amplificador, se diseñará el transistor M_2 como parte de un espejo de corriente que fija la corriente I_D del transistor M_1. Para asegurar que el espejo sea ideal, se empleará una relación geométrica idéntica a la utilizada en M_1:

$$\left(\frac{W}{L}\right)_2 = \left(\frac{W}{L}\right)_1 = 1000, \text{ con} \quad W = 180\ \mu m, L = 0.18\ \mu m$$

Esto permitirá que ambos transistores conduzcan una corriente idéntica de I_D = 1 mA, lo cual es esencial para mantener la transconductancia g_m estable en el nodo de entrada, se calculará el voltaje de polarización necesario para activar M_2 en la región de saturación. A partir de la ecuación del modo activo:

$$I_D = \frac{1}{2}\ K_N\ x\ \left(\frac{W}{L}\right)\ x\ (V_{GS} - V_{TH})^2$$

Considerando los siguientes parámetros calculados donde temenos que:

K_n = 200 μA/ V^2

$\left(\frac{W}{L}\right)$ = 1000

I_D = 1 mA

V_{TH} = 0.4 V

Entonces se despejará V_{GS}, obteniéndose:

$$V_{GS} = V_{TH} + \sqrt{\frac{2\,x\,I_D}{K_n\,x\left(\frac{W}{L}\right)}} = 0.4 + \sqrt{\frac{0.002}{0.2}} = 0.4 + 0.1 = 0.5\ \text{V}$$

Este cálculo nos simplifica que el resultado el voltaje de polarización V_b, aplicado a la compuerta de M_2, deberá establecerse en 0.5 V para asegurar el correcto funcionamiento del espejo de corriente y, por ende, del circuito amplificador.

5) L_D (Inductor de carga):

El inductor de carga L_D será dimensionado para resonar con la capacitancia de salida del nodo de drenaje a una frecuencia de 2.6 GHz, maximizando así la ganancia del amplificador.

Usando una capacitancia típica de salida de C_{out} = 150fF, se aplicará la fórmula de resonancia donde:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_D\ C_{out}}}\ \text{, despejando } L_D \text{ tenemos: } L_D = \frac{1}{(2\pi f_0)^2\,x\,C_{out}}$$

Entonces sustituyendo tenemos que:

$$L_D = \frac{1}{(2\pi \cdot 2.6\,x\,10^9\,H)^2\,x\,150\,x10^{-15}F} = 25\ nH$$

6) V_{dd} (Voltaje de alimentación):

El voltaje de alimentación del circuito V_{DD} , se establecerá en 1.8 V, valor estándar en tecnologías CMOS de 0.18 μm. Esta decisión de diseño está fundamentada en referencias técnicas como nuestra guía del diseño en la figura 11 del libro *RF Microelectronics* de Behzad Razavi, donde se emplea este nivel de tensión para asegurar un funcionamiento eficiente sin

saturación ni recorte de señal. Además, garantiza compatibilidad con otros bloques del sistema que operan con el mismo suministro de energía.

7) V_{out} (Nodo de salida):

El nodo de salida V_{out} estará ubicado en el drenaje del transistor M_1, justo después del inductor de carga L_D. En condiciones de corriente continua (DC), este nodo se mantendrá cercano al voltaje de alimentación V_{dd} = 1.8V. Sin embargo, en alta frecuencia (AC), constituirá la salida de señal del amplificador, entregando la señal amplificada hacia el siguiente bloque receptor. Esta configuración permite una transferencia de señal eficiente sin necesidad de etapas adicionales de adaptación de impedancia en la salida.

Una vez calculados todos los parámetros críticos del LNA, incluidos los valores de los transistores, inductores y voltajes de polarización, se procederá a crear una tabla resumen que recoja cada componente junto con su valor numérico y unidad correspondiente. A continuación, la Tabla 6 servirá como guía práctica para plasmar el circuito esquemático.

Tabla 7

Valores del Amplificador LNA adaptado a 2.6 GHz

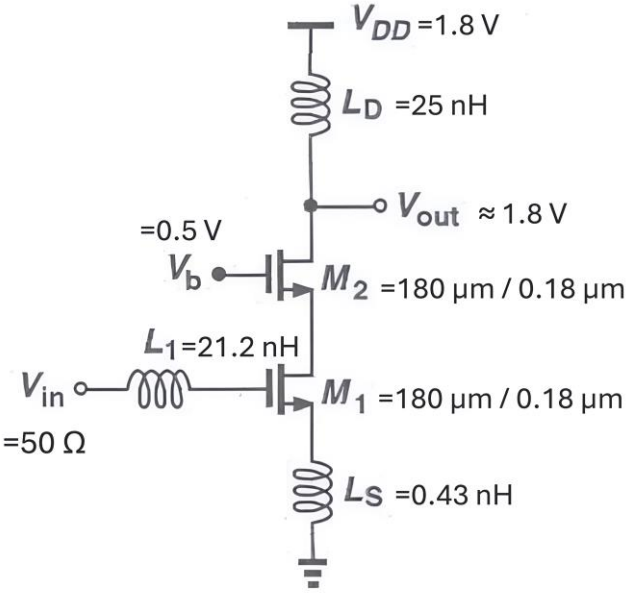
Componentes	Valor final
V_{in} (impedancia)	50 Ω
L_1	21.2 nH
L_s	0.43 nH
M_1 (W/L)	180 µm / 0.18 µm
M_2 (W/L)	180 µm / 0.18 µm
V_b	0.5 V
L_D	25 nH

V_{out} (DC)	≈ 1.8 V
V_{DD}	1.8 V

Los cálculos realizados nos permitieron plasmar el diseño del amplificador LNA CMOS con degeneración inductiva que se muestra a continuación en la Figura 48; el siguiente diagrama recoge gráficamente cada uno de los componentes dimensionados.

Figura 48

Esquema del amplificador LNA CMOS con degeneración inductiva



Nota. El circuito reúne los nueve componentes dimensionados tras los cálculos previos. **Fuente:** Elaboración propia.

A partir de los cálculos teóricos se definió cada uno de los nueve elementos fundamentales del LNA CMOS con degeneración inductiva, logrando un diseño inicial que satisface los requisitos de adaptación de impedancias y resonancia a la frecuencia objetivo. Sin embargo, la simulación detallada quedó pendiente debido a la imposibilidad de obtener la licencia de Cadence Virtuoso dentro del plazo establecido; por ello, la validación numérica se pospone hasta que se disponga del entorno de simulación adecuado o se elija una herramienta alternativa.

8.2.4. Diseño de Antenas sectoriales con tecnología MIMO adaptadas para Beamforming

Una vez que la señal LTE sea captada, filtrada y amplificada, se integrará la etapa final del sistema: la retransmisión optimizada mediante antenas sectoriales. Para ello, se diseñará un array de antenas de microstrip equipada con tecnología MIMO y adaptada para beamforming durante la fase dos del diseño. El diseño se realizará utilizando la herramienta Antenna Array Designer de MATLAB, y se desarrollará con parámetros estándar, sirviendo como modelo base para replicar un total de tres antenas sectoriales dentro del sistema.

Dado que se trata de un diseño preliminar de un arreglo de antenas de parche 4x4, se establecerán los parámetros y propiedades fundamentales que definen su estructura y comportamiento electromagnético. Estos valores son esenciales para configurar correctamente el modelo, permitiendo simulaciones que reflejen de forma realista el funcionamiento físico del sistema.

La selección de cada parámetro se realizará en función de criterios técnicos, considerando la eficiencia de la antena y los requerimientos de cobertura específicos en la zona de estudio. A continuación, se presenta las tablas con las propiedades definidas, acompañadas de su respectiva justificación técnica.

Tabla 8

Propiedades del array de antenas rectangular

Rectangular Array Properties		
Properties (Propiedades)	Value (Valor)	Justification (Justificación)
Size (Tamaño)	[4 4]	Cantidad de elementos en filas y columnas del arreglo MIMO.
RowSpacing (Espaciado entre filas)	0.076735 m	Separación vertical entre antenas para evitar acoplamientos.

Rectangular Array Properties		
ColumnSpacing (Espaciado entre columnas)	0.076735 m	Separación horizontal entre elementos para mantener directividad.
Lattice (Arreglo)	Rectangular	Distribución uniforme que facilita análisis y diseño.
AmplitudeTaper (Atenuación de amplitud)	1	Indica distribución uniforme de amplitud entre elementos.
PhaseShift (Desfase)	0°	No se aplica fase relativa, ideal para radiación omnidireccional.
Tilt (Inclinación)	0°	Sin inclinación, se mantiene eje normal a plano del arreglo.
TiltAxis (Eje de inclinación)	[1 0 0]	Define el eje X como referencia para una posible inclinación.
Element (Elemento)	patchMicrostrip	Cada celda del arreglo es una antena de parche microstrip.

Tabla 9

Propiedades de cada Microstrip de las antenas

Patch Microstrip Element Properties		
Properties (Propiedades)	Value (Valor)	Justification (Justificación)
Length (Longitud)	0.055346 m	Define la resonancia de la antena, afecta la frecuencia central.

Width (Ancho)	0.072065 m	Influye en la impedancia y el ancho de banda.
Height (Altura)	0.001153 m	Corresponde al espesor del sustrato, afecta eficiencia.
GroundPlaneLength (Longitud del plano de tierra)	0.1153 m	Tamaño del plano conductor inferior que actúa como referencia.
GroundPlaneWidth (Ancho del plano de tierra)	0.1153 m	Área del plano de tierra para soportar propagación adecuada.
PatchCenterOffset (Desplazamiento del parche)	[0 0]	Centro del parche alineado con el origen del sistema.
FeedOffset (Desplazamiento del punto de alimentación)	[0.011652 0]	Posición del punto de alimentación para adaptación de impedancia.
Tilt (Inclinación)	0°	No se inclina la antena respecto al eje.
TiltAxis (Eje de inclinación)	[1 0 0]	Eje de referencia en caso de aplicar inclinación futura.

Tabla 10

Propiedades del Sustrato por usar

Substrate (Dielectric) Properties		
Properties (Propiedades)	Value (Valor)	Justification (Justificación)

Catalog (Catálogo)	Air	Se seleccionó aire como dieléctrico del sustrato.
Name (Nombre)	Air	Nombre definido del dieléctrico utilizado.
EpsilonR (Permisividad relativa)	1	Valor típico del aire, no afecta la velocidad de propagación.
LossTangent (Tangente de pérdidas)	0	Indica que no hay pérdidas dieléctricas.
Thickness (Espesor)	0.001153 m	Espesor físico del sustrato, igual al parámetro Height.

Tabla 11

Propiedades del Conductor por usar

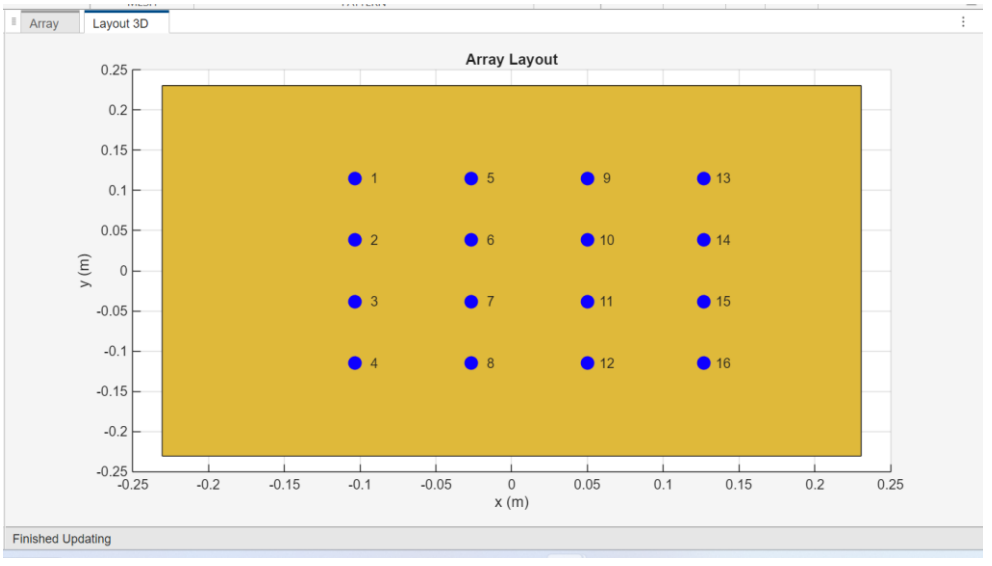
Conductor (Metal) Properties		
Properties (Propiedades)	Value (Valor)	Justification (Justificación)
Catalog (Catálogo)	PEC	Se usa "Perfect Electric Conductor" como idealización del metal.
Name (Nombre)	PEC	Nombre del material conductor asignado al parche y plano de tierra.
Conductivity (Conductividad)	Inf S/m	Conductividad infinita para simular conductor perfecto sin pérdidas.

Thickness (Espesor)	0 m	Espesor asumido despreciable para simulación ideal.

Los parámetros detallados en las tablas anteriores definen con precisión cada sección del arreglo de antenas MIMO. Para una mejor comprensión de cómo estas dimensiones se relacionan con la estructura física del dispositivo, a continuación, se presenta una vista general de la antena con sus componentes principales, esta representación visual es clave para entender la distribución de las partes en conjunto, y que permiten la operación óptima a la frecuencia de diseño y la recepción eficiente de señales LTE.

Figura 49

Distribución física del arreglo MIMO 4×4 para la antena sectorial

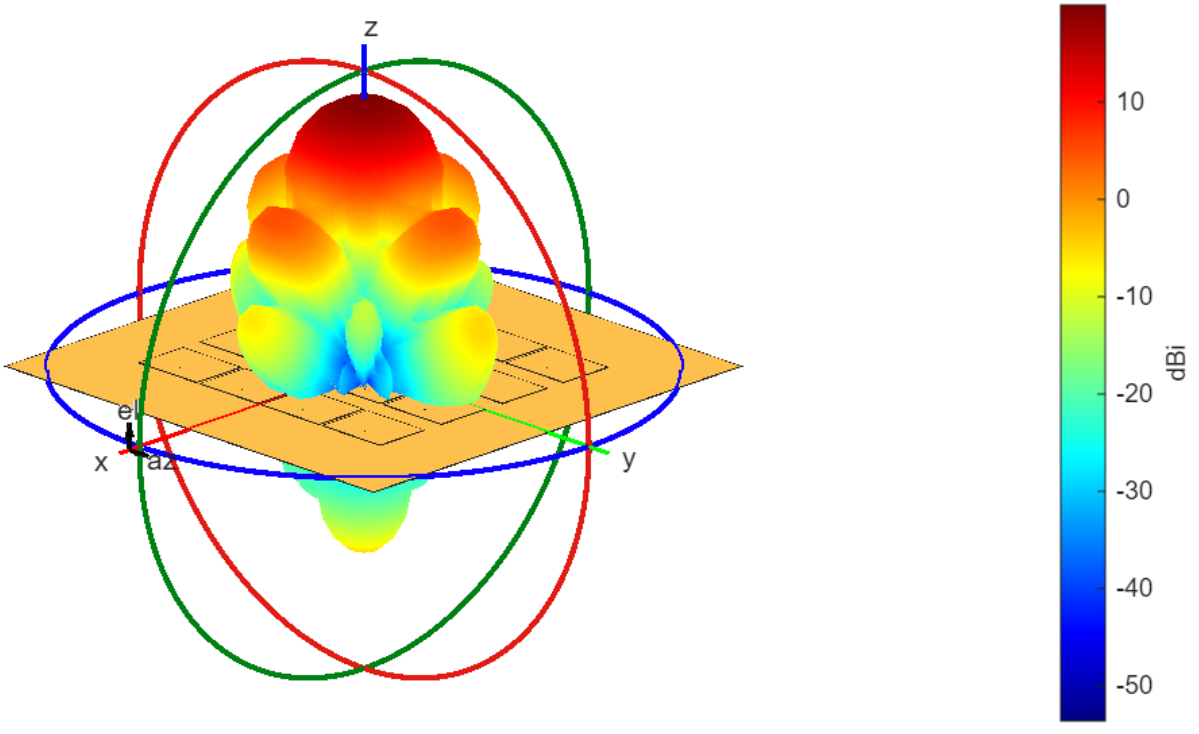


Nota. Disposición rectangular uniforme del arreglo MIMO 4×4 compuesta por 16 antenas de parche microstrip, diseñadas en MATLAB sobre un plano de tierra simulado. Cada elemento está espaciado a 0.5λ (aproximadamente 57.7 mm para 2.6 GHz) tanto en el eje X como en el eje Y. Esta configuración será utilizada para retransmitir la señal amplificada en el sistema de cobertura sectorial propuesto. **Fuente:** Elaboración propia obtenida de MATLAB.

A partir del diseño mostrado en la Figura 49, se procederá a realizar la simulación del patrón de radiación tridimensional del arreglo MIMO 4×4. Esta simulación permitirá analizar el comportamiento conjunto de los elementos radiantes en términos de directividad, ganancia y cobertura angular. De esta manera, se podrá evaluar la eficiencia del arreglo como componente clave dentro del sistema de retransmisión sectorial propuesto.

Figura 50

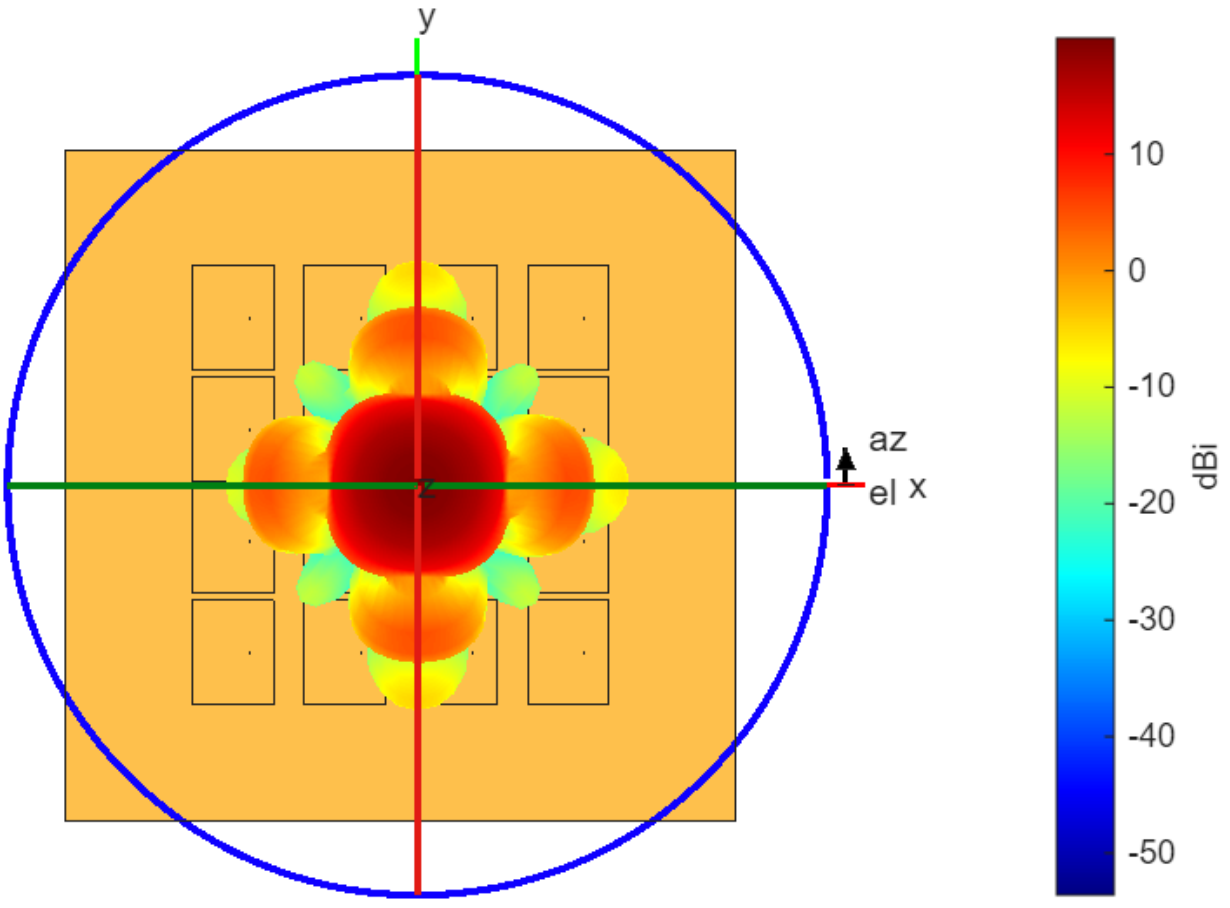
Patrón tridimensional de radiación del arreglo MIMO 4×4 a 2.6 GHz



Nota. Simulación del patrón de radiación 3D del arreglo rectangular uniforme 4×4 compuesto por antenas de parche microstrip. Se observa una concentración de energía en la dirección perpendicular al plano del arreglo (eje Z), lo que indica una alta directividad. La escala de colores muestra los niveles de ganancia en dBi, donde las zonas en rojo representan las regiones de mayor intensidad radiada. En esta simulación, el arreglo alcanzó una ganancia máxima aproximada de 20 dBi. **Fuente:** Elaboración propia obtenida de MATLAB.

Figura 51

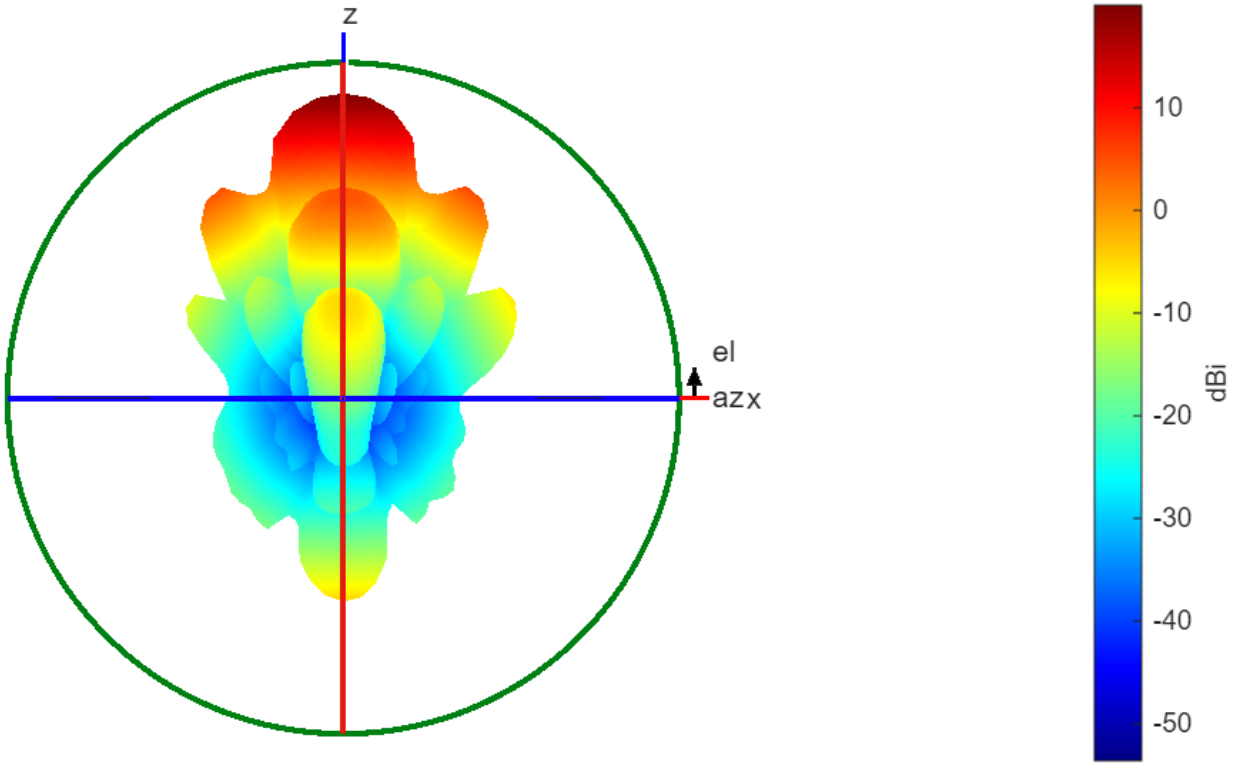
Vista superior (XY) del patrón de radiación del arreglo MIMO 4×4 a 2.6 GHz



Nota. Se evidencia una distribución simétrica de los lóbulos de radiación en el plano horizontal, lo que indica una cobertura amplia y uniforme en azimut. La zona central en color rojo representa el área de máxima intensidad (20 dBi). **Fuente:** Elaboración propia obtenida de MATLAB.

Figura 52

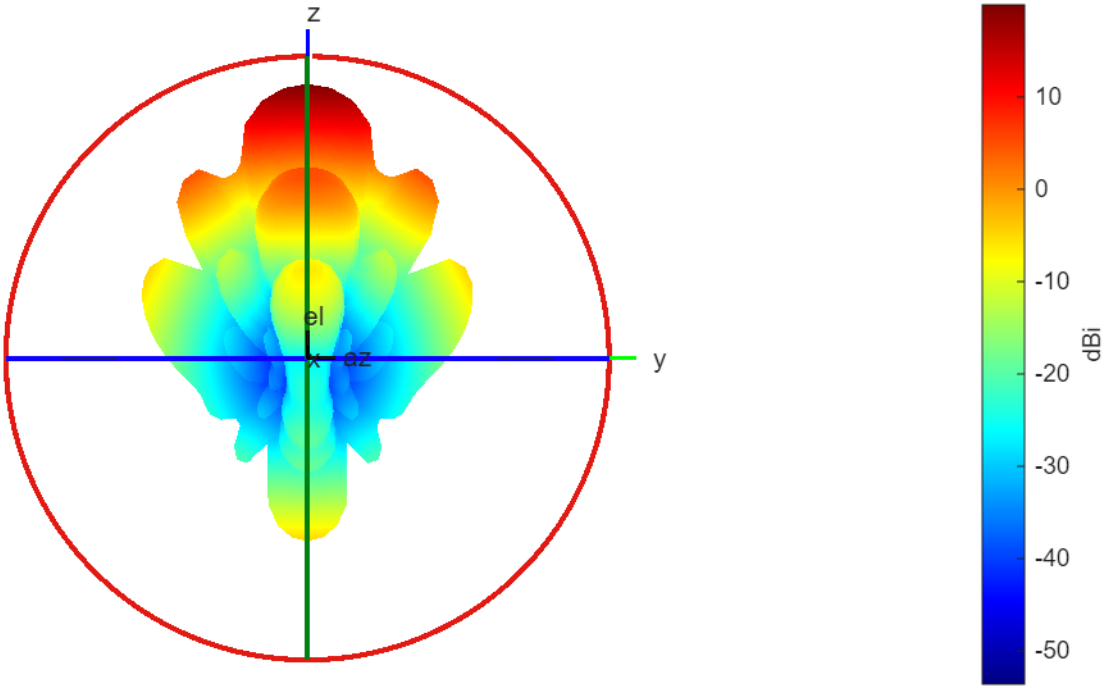
Vista lateral (XZ) del patrón de radiación del arreglo MIMO 4×4 a 2.6 GHz



Nota. Proyección del patrón de radiación tridimensional sobre el plano XZ, que permite observar el comportamiento del arreglo en el plano vertical. **Fuente:** Elaboración propia obtenida de MATLAB.

Figura 53

Vista lateral (YZ) del patrón de radiación del arreglo MIMO 4×4 a 2.6 GHz



Nota. Visualización del patrón de radiación tridimensional proyectado sobre el plano YZ, correspondiente a la vista lateral desde el eje Y. Se observa una distribución vertical de la energía radiada con fuerte concentración hacia el eje Z, lo que refleja la directividad del arreglo. **Fuente:** Elaboración propia obtenida de MATLAB.

8.3. Resultados del objetivo específico #3: Valorar la propuesta de diseño del sistema de antenas con expertos cualificados.

En este apartado se analizarán los resultados de la encuesta que se puede ver en la Tabla 14 de nuestro Anexo H de este documento, encuesta que fue diseñada con precisión para cada uno de los componentes que conforman nuestro sistema y obtener datos más precisos.

8.3.1. Resultado de la encuesta a expertos

Para dar cumplimiento al Objetivo #3 del presente proyecto, se realizó una evaluación técnica del diseño propuesto mediante la aplicación de una encuesta dirigida a expertos calificados en el área de telecomunicaciones. Esta evaluación tiene como finalidad valorar la pertinencia, viabilidad y grado de completitud del sistema diseñado, en función de su capacidad para resolver el problema de cobertura identificado en la comunidad de David Tejada.

8.3.1.1. Resultados de encuesta a expertos cualificados para validar el diseño. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la encuesta aplicada a expertos calificados en telecomunicaciones. El propósito de este apartado es analizar las percepciones de los expertos en relación con el nivel de completitud técnica del sistema diseñado, su viabilidad práctica y su capacidad para resolver el problema de cobertura de red en la comunidad David Tejada.

La evaluación fue realizada por dos docentes universitarios de UNICIT de amplia trayectoria y reconocido prestigio en el campo de la ingeniería electrónica y las telecomunicaciones:

- Dr. Ing. Jorge Luis Palacios Linarte, Doctor en Investigación y Docencia Universitaria, Ingeniero Electrónico, Máster en Telecomunicaciones y Máster en Electrónica.
- Ing. Fausto Leonidas Palacio Amador, Ingeniero Electrónico, Máster en Telecomunicaciones y Redes Informáticas.

Adicional, con el fin de ampliar el espectro de opiniones técnicas, el Dr. Jorge Palacios recomendó la participación de cinco colegas expertos adicionales, también especializados en el área de telecomunicaciones, lo que elevó el número total de evaluadores a siete.

Las respuestas fueron recolectadas, organizadas en una tabla de frecuencia y analizadas mediante el cálculo de frecuencias absolutas y relativas. Esta información permitió establecer

un juicio técnico fundamentado sobre la calidad y aplicabilidad del diseño propuesto, sirviendo como validación externa especializada por parte de profesionales del sector.

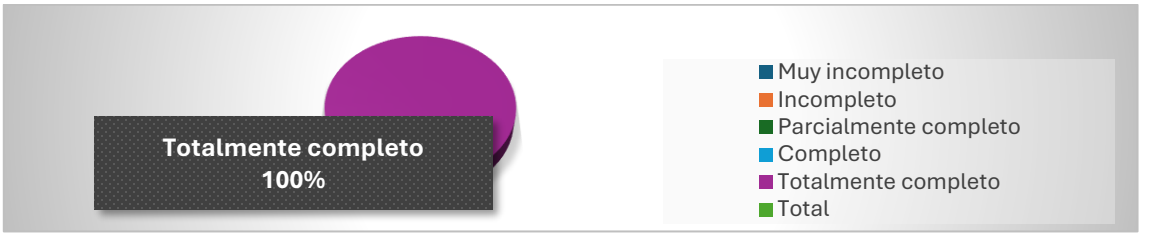
8.3.1.1.2. Sección 1. Apartado del diseño completo

1) ¿Qué tan completo considera el diseño mostrado para resolver el problema de cobertura de la comunidad?

Respuestas:

Figura 54

Valoración del nivel de completitud del diseño propuesto por expertos



Análisis:

El 100 % de los expertos encuestados calificó el diseño propuesto como “Totalmente completo”.

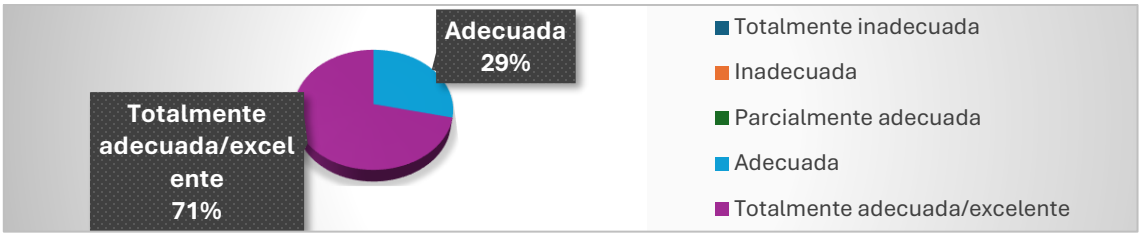
8.3.1.1.3. Sección 2. Apartado de diseño de la antena de bocina receptora

2) ¿Qué tan apropiada considera la antena de bocina piramidal elegida para captar la señal LTE en la banda de 2,6 GHz, considerando su directividad, ganancia y tamaño en comparación con otros estilos de antena disponibles?

Respuestas:

Figura 55

Evaluación de la adecuación de la antena de bocina piramidal para captar señal LTE en 2.6 GHz



Análisis:

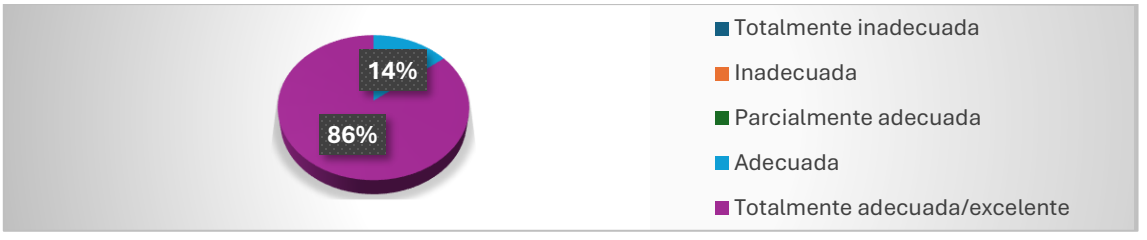
El 71 % de los expertos encuestados calificaron la antena de bocina piramidal como “Totalmente adecuada / Excelente” y el 29% como “Adecuada”.

3) ¿La geometría de la antena permite una orientación precisa hacia la fuente de señal como enlace punto a punto?

Respuestas:

Figura 56

Opinión sobre la capacidad de orientación precisa de la antena como enlace punto a punto



Análisis:

El 86 % de los expertos calificó la geometría de la antena como “Totalmente adecuada / Excelente” y el otro 14 % como “Adecuada”.

4) ¿Considera adecuado el uso de aluminio, un material de bajo costo, como conductor de la antena, tomando en cuenta su conductividad, peso y resistencia a la intemperie?

Respuestas:

Figura 57

Evaluación del uso del aluminio como material conductor en la antena



Análisis:

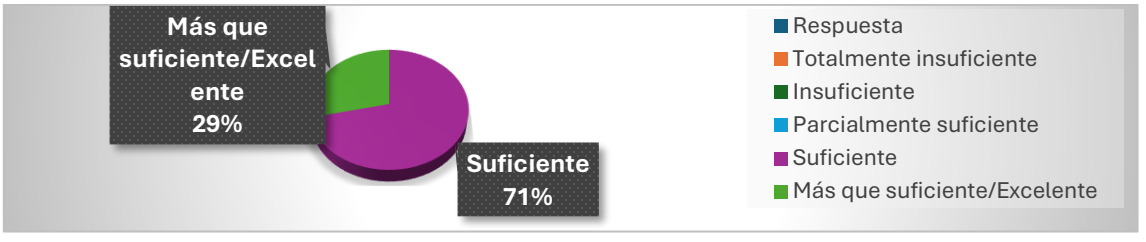
El 100 % de los expertos encuestados evaluaron el uso del aluminio como “Totalmente adecuado / Excelente”.

5) ¿La ganancia máxima simulada de 21.54 dBi a 2.6 GHz es suficiente para captar con fiabilidad la señal LTE en los puntos elevados de la comunidad?

Respuestas:

Figura 58

Valoración de la ganancia simulada de 21.54 dBi para captar señal LTE en zonas elevadas



Análisis:

Los resultados muestran que el 71 % de los expertos considera la ganancia como “Suficiente”, mientras que el otro 29 % la califica como “Más que suficiente / Excelente”.

6) ¿El ancho de banda operativo de 470 MHz (2.34 – 2.81 GHz), resulta suficiente para cubrir toda la banda 7 LTE y ofrecer margen ante posibles desvíos de frecuencia?

Respuestas:

Figura 59

Evaluación del ancho de banda operativo de 470 MHz para cubrir la banda 7 LTE



Análisis:

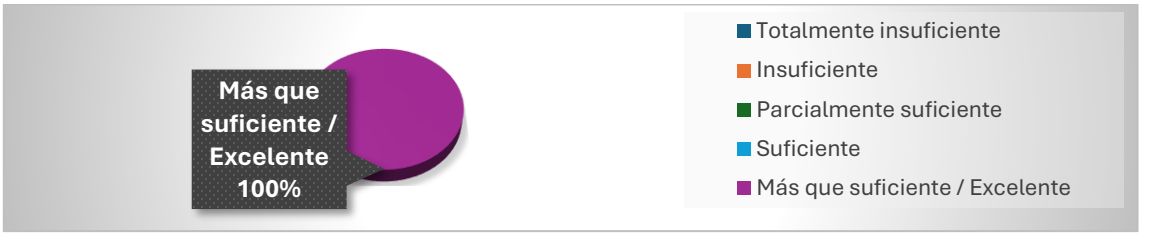
El 100 % de los expertos calificó el ancho de banda como “Más que suficiente / Excelente”.

7) El diseño presenta un ancho de banda fraccional del 18 %. ¿Considera que este margen es suficiente para compensar variaciones de frecuencia, tolerancias de fabricación y futuras ampliaciones de servicio dentro de la banda LTE?

Respuestas:

Figura 60

Opinión sobre la suficiencia del ancho de banda fraccional del 18 % para aplicaciones LTE



Análisis:

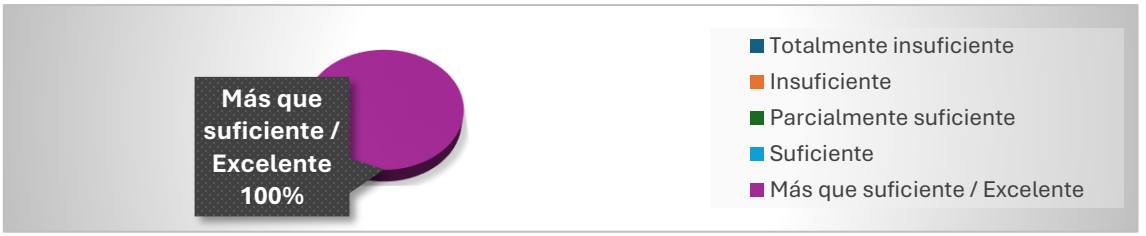
La totalidad de los expertos (100 %) evaluó el margen de 18 % de ancho de banda fraccional como “Más que suficiente / Excelente”.

8) La antena presenta una eficiencia teórica del 84 %. ¿Considera que este nivel de eficiencia es suficiente para minimizar pérdidas y preservar la calidad de la señal en la aplicación propuesta?

Respuestas:

Figura 61

Evaluación de la eficiencia teórica del 84 % de la antena propuesta



Análisis:

El 100 % de los expertos evaluó el nivel de eficiencia como “Más que suficiente / Excelente”.

8.3.1.1.4. Sección 3. Apartado de diseño del Filtro Pasabanda Chebyshey de 5to orden con topología interdigital

9) ¿Qué tan adecuada considera la selección del filtro pasabanda microstrip Chebyshev de 5to orden construido sobre substrato Rogers RO4003C ($\varepsilon_r \approx 3.55$, h = 1.6 mm) con cobre de 0.035 mm, respecto a rendimiento, costo y facilidad de fabricación?

Respuestas:

Figura 62

Valoración de la selección del filtro pasabanda microstrip Chebyshev de 5.º orden



Análisis:

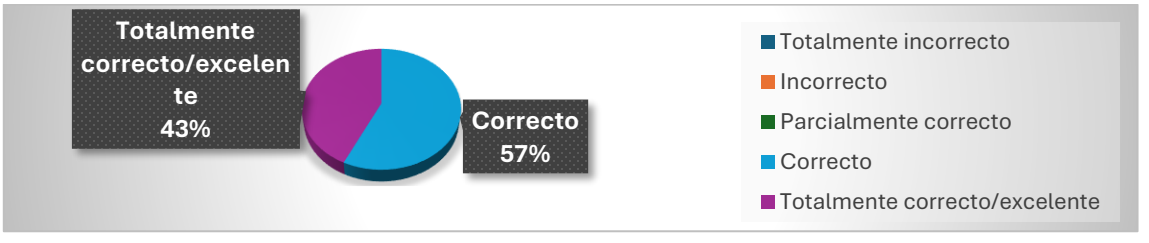
El 100 % de los expertos calificó la selección del filtro como "Totalmente adecuada / Excelente".

10) A la luz de la curva de S-parámetros, ¿el filtro permite el paso limpio de la portadora LTE a 2.6 GHz ($S_{21} \approx 0$ dB dentro de 2.47–2.73 GHz) y rechaza eficazmente las señales fuera de banda?

Respuestas:

Figura 63

Evaluación del comportamiento del filtro pasabanda según la curva de S-parámetros



Análisis:

Los resultados muestran que el 57 % de los expertos calificó el comportamiento del filtro como "Correcto", y el otro 43 % como "Totalmente correcto / Excelente".

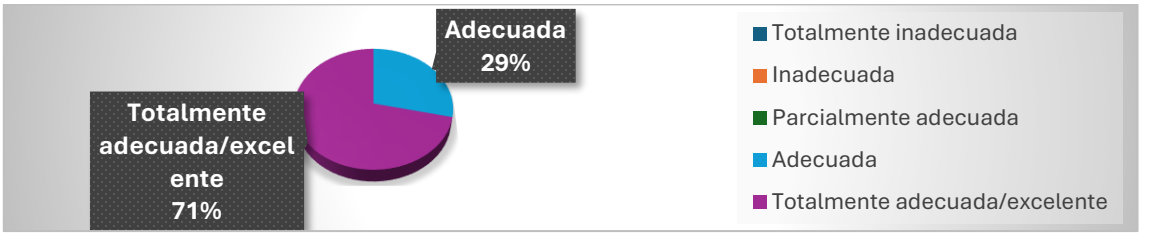
8.3.1.1.5. Sección 4. Apartado de diseño del amplificador de bajo ruido LNA CMOS

11) Considera que la elección del LNA CMOS con degeneración inductiva es adecuada para una operación eficiente a 2.6 GHz?

Respuestas:

Figura 64

Evaluación de la adaptaion del LNA CMOS con degeneración inductiva para 2.6 GHz



Análisis:

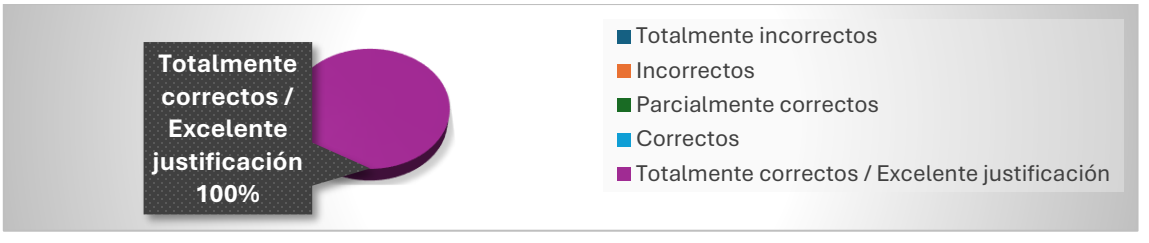
El 29 % consideró la elección “Adecuada” y el otro 71 % la calificó como “Totalmente adecuada / Excelente”.

12) ¿Los cálculos realizados para cada componente del circuito (transistores, inductores y voltajes) le parecen correctos y bien justificados?

Respuestas:

Figura 65

Evaluación de la corrección y justificación de los cálculos del circuito LNA CMOS



Análisis:

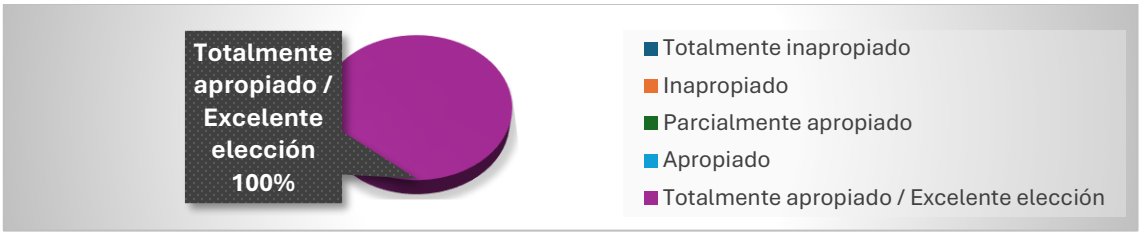
El 100 % de los expertos encuestados calificaron los cálculos como “Totalmente correctos / Excelente justificación”.

13) ¿El uso del modelo de transconductancia y resonancia resulta apropiado para garantizar la adaptación de impedancia a 50 Ω?

Respuestas:

Figura 66

Opinión sobre el uso del modelo de transconductancia y resonancia para adaptación de impedancia



Análisis:

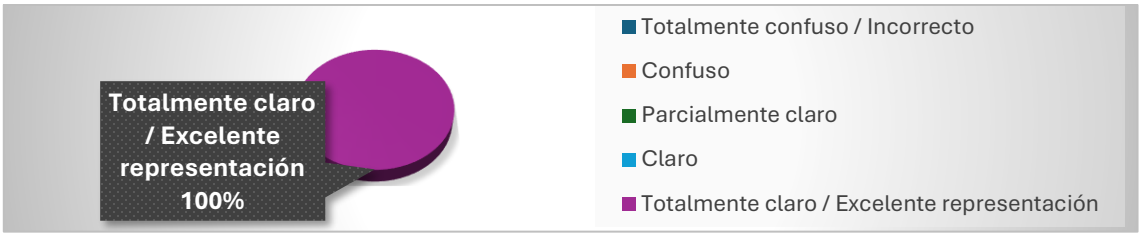
El 100 % de los expertos calificó el enfoque como “Totalmente apropiado / Excelente elección”.

14) ¿Cree que el diagrama esquemático del circuito es claro y refleja correctamente los resultados obtenidos en los cálculos?

Respuestas:

Figura 67

Evaluación de la claridad y coherencia del diagrama esquemático del circuito



Análisis:

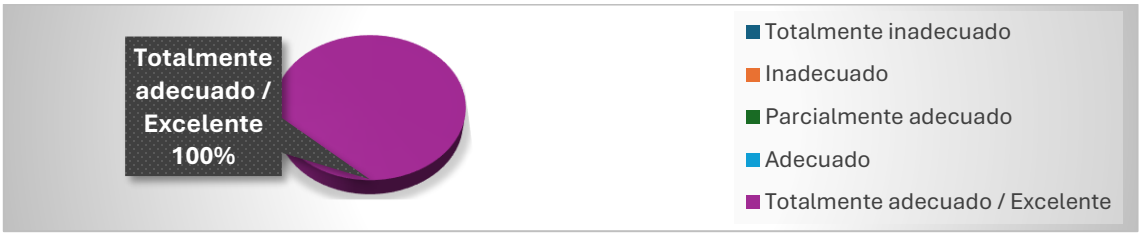
El 100 % de los expertos valoró el diagrama esquemático del circuito como “Totalmente claro / Excelente representación”.

15) ¿El nivel de detalle técnico (fórmulas, parámetros y resultados) incluido en el diseño del LNA es el adecuado para un proyecto de este tipo?

Respuestas:

Figura 68

Valoración del nivel de detalle técnico incluido en el diseño del LNA CMOS



Análisis:

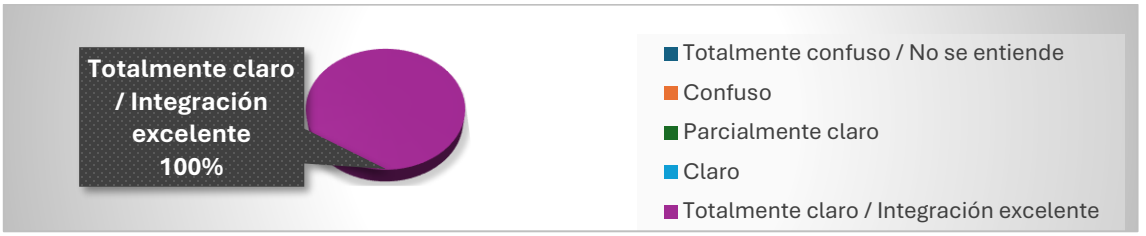
El 100 % de los expertos evaluó el nivel de detalle técnico del diseño como “Totalmente adecuado / Excelente”.

16) ¿Le resulta claro cómo se logró la adaptación entre el filtro pasabanda microstrip y el LNA?

Respuestas:

Figura 69

Claridad en la integración entre el filtro pasabanda microstrip y el LNA



Análisis:

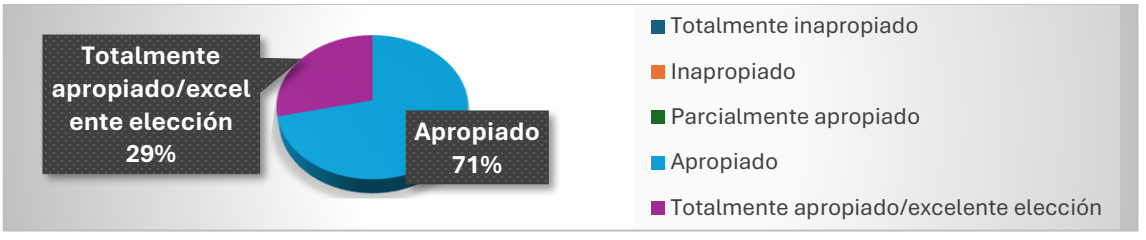
El 100 % de los expertos respondió “Totalmente claro / Integración excelente”.

17) ¿Considera que fue apropiado seleccionar el libro *RF Microelectronics* de Behzad Razavi como base para el diseño del amplificador LNA CMOS?

Respuestas:

Figura 70

Evaluación de la pertinencia del libro RF Microelectronics de Behzad Razavi como base del diseño del LNA CMOS



Análisis:

Los resultados muestran que el 71 % de los expertos consideró la selección como “Apropiada”, mientras que el otro 29 % la valoró como “Totalmente apropiada / Excelente elección”.

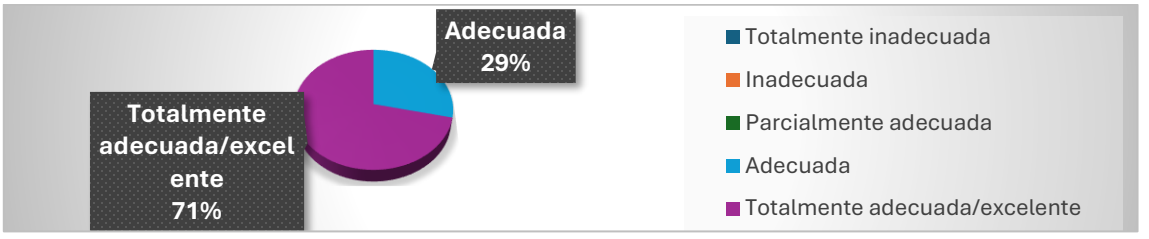
8.3.1.1.6. Seccion 5. Apartado de diseño de antenas sectoriales con tecnología MIMO adaptadas para Beamforming

18) ¿Considera adecuada la elección de un arreglo MIMO 4×4 para lograr una cobertura eficiente en el sistema de retransmisión propuesto?

Respuestas:

Figura 71

Valoración de la elección del arreglo MIMO 4×4 para cobertura eficiente en el sistema de retransmisión



Análisis:

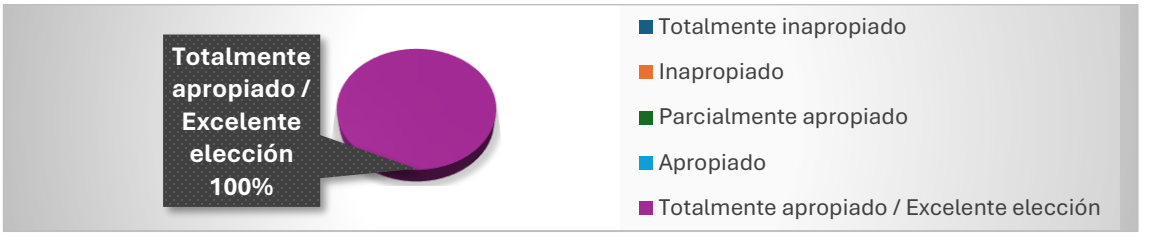
El 50 % de los expertos valoró la elección como “Adecuada”, mientras que el otro 50 % la calificó como “Totalmente adecuada / Excelente”.

19) ¿Cree que el uso de antenas de parche microstrip es apropiado para este tipo de aplicación en sistema de arrays?

Respuestas:

Figura 72

Opinión sobre la adecuación del uso de antenas de parche microstrip en sistemas de arrays



Análisis:

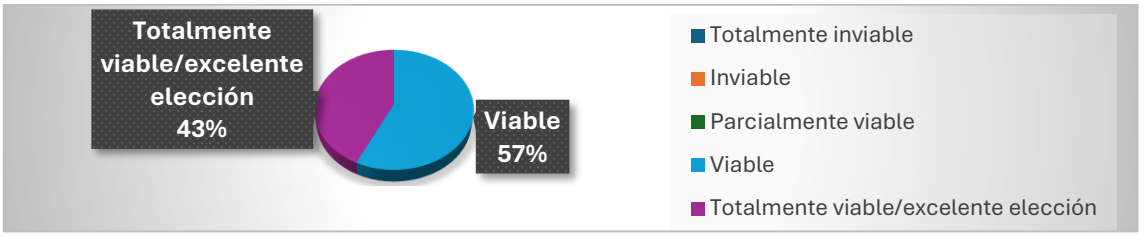
El 100 % de los expertos calificó la elección como “Totalmente apropiado / Excelente elección”.

20) La selección del substrato Rogers RO4003C (ε_r = 3.55, h = 1.6 mm) le parece técnica y económicamente viable para el contexto nacional?

Respuestas:

Figura 73

Evaluación de la viabilidad técnica y económica del substrato Rogers RO4003C en el contexto nacional



Análisis:

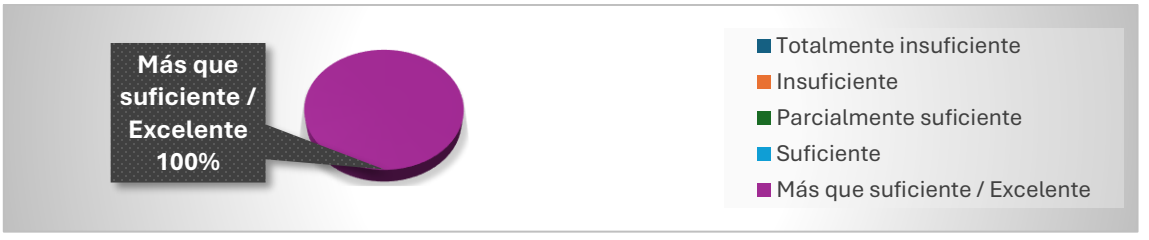
El 57 % de los expertos evaluó la selección del substrato como “Viable”, mientras que el otro 43 % la consideró “Totalmente viable / Excelente elección”.

21) ¿Considera que la ganancia de 20 dBi obtenida en la simulación es suficiente para garantizar una retransmisión efectiva de la señal LTE en la zona objetivo?

Respuestas:

Figura 74

Valoración de la suficiencia de la ganancia de 20 dBi para la retransmisión de señal LTE en la zona objetivo



Análisis:

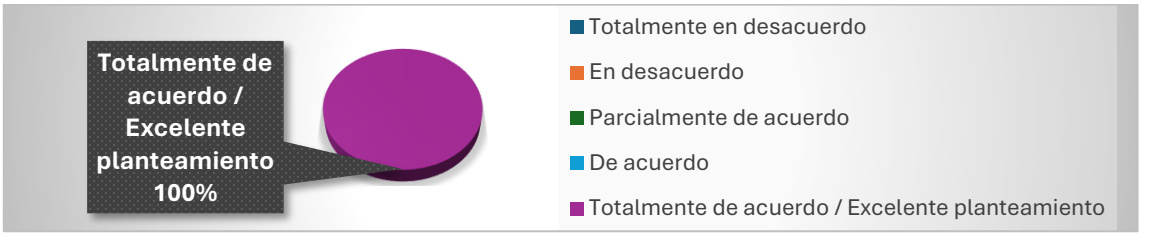
El 100 % de los expertos valoró la ganancia simulada como “Más que suficiente / Excelente”.

22) ¿Está de acuerdo en que la configuración MIMO mejora la confiabilidad del sistema al permitir que, si un lóbulo de señal falla, otros puedan mantener la cobertura?

Respuestas:

Figura 75

Evaluación de la confiabilidad del sistema con configuración MIMO ante fallos de lóbulos de señal



Análisis:

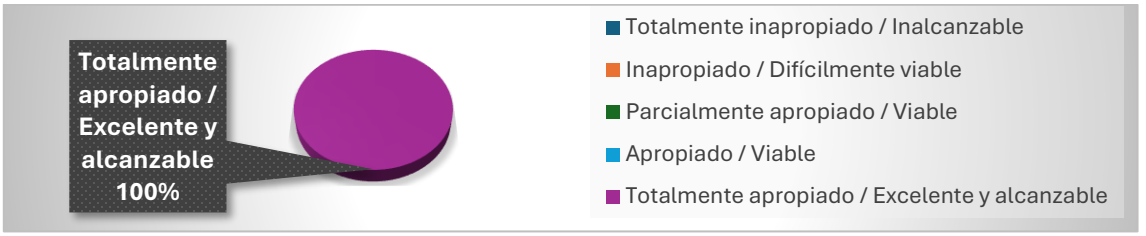
El 100 % de los expertos respondió “Totalmente de acuerdo / Excelente planteamiento”.

23) ¿Cree que el uso de tecnología MIMO en aplicaciones rurales representa una solución moderna y alcanzable dentro del contexto tecnológico actual de Nicaragua?

Respuestas:

Figura 76

Evaluación de la aplicabilidad de la tecnología MIMO en zonas rurales del contexto nacional



Análisis:

El 100 % de los expertos calificó el planteamiento como “Totalmente apropiado / Excelente y alcanzable.

Finalmente, con los dos profesores que se tuvo la oportunidad de encuestarlos se pudo sostener una conversación sobe el diseño lo cual permitió plantearle estas tres preguntas a continuación:

24) ¿Le parece clara y coherente la arquitectura general del sistema propuesta?

Respuestas:

El Ing. Fausto Leonidas Palacio Amador (comunicación personal, 12 de junio de 2025) indicó:

> *“Sí, estás usando tecnología de última generación, y que puede competir con otros países que tienen este tipo de tecnología ya implementada.”*

Asimismo, el Dr. Ing. Jorge Luis Palacios Linarte (comunicación personal, 12 de junio de 2025) afirmó:

“Claro que sí. La propuesta de arquitectura y la propuesta electrónica están sujetas a toda la teoría y a toda la experiencia que existe en el diseño de antenas en cualquier metodología, y es aplicable a cualquier rango de frecuencias. Además, sirve tanto para la zona rural como para la urbana. En este caso, es aún más factible, ya que hay poco

ruido, y esa es una ventaja. Por otro lado, si fuera diseñado para una zona con un nivel industrial grande, habría que tener más delicadeza en el filtraje de la señal con respecto a la relación señal/ruido."

25) ¿Considera moderna y aplicable esta tecnología en contextos rurales como Nicaragua?

Respuestas:

El Ing. Fausto Leonidas Palacio Amador (comunicación personal, 12 de junio de 2025), respondió:

"Sí, porque mejora la comunicación, da soluciones y busca el desarrollo de una comunidad."

Por su parte, el Dr. Ing. Jorge Luis Palacios Linarte (comunicación personal, 12 de junio de 2025), expresó:

"Por supuesto. No solo en Nicaragua sería moderna, sino en cualquier lugar del planeta. No en todas partes existen MIMO aplicados como una forma común de resolver las transmisiones y recepciones de señales."

26) ¿Qué recomendaciones daría para mejorar o validar aún más este diseño antes de su implementación real?

Respuestas:

El Ing. Fausto Leonidas Palacio Amador (comunicación personal, 12 de junio de 2025), recomendó:

"Profundizar un poco más en el uso de software. En este caso estás utilizando MATLAB, pero podrías emplear también Pathloss 5.0, que permite analizar variaciones en una señal multipunto. Este software te ayuda a calcular mayores distancias sin que los obstáculos, como cerros o edificios, representen una limitación. Así, la señal fluye de forma más estable, a diferencia de un enlace punto a punto que puede presentar restricciones temporales. Pathloss 5.0 es más desarrollado y se utiliza precisamente

> *para este tipo de estudios en telecomunicaciones orientados a la mejora continua y al planteamiento de soluciones técnicas."*

Por su parte, el Dr. Ing. Jorge Luis Palacios Linarte (comunicación personal, 12 de junio de 2025), señaló:

> *"Conocer con mayor claridad los altos y bajos del terreno es una condición sine qua non en las tecnologías de telecomunicaciones. Si hay muchos obstáculos, cualquier señal —por muy alta que sea la frecuencia— tendrá problemas; y si el clima es cambiante, también afectará. Como consideraciones generales, es importante verificar los cambios climatológicos en el lugar, la contaminación del medio ambiente, garantizar la potencia del sistema —que es fundamental para lograr una buena comunicación—, y asegurar que los materiales empleados sean de calidad. De forma resumida, es una muy buena propuesta, una propuesta a considerar, a tener en cuenta no solo como monografía, sino como un trabajo futuro a implementar."*

9. Análisis de Resultados

9.1. Análisis de resultados del objetivo específico #1 Analizar el acceso a las redes telefónicas y a la comunicación en la comunidad rural "David Tejada" perteneciente a Bocana de Paiwas-RACCS.

9.1.1. Análisis del sector estudiantil (n = 30)

Los resultados obtenidos en la encuesta aplicada al sector estudiantil de la comunidad David Tejada revelan una problemática crítica en el acceso a los servicios de telecomunicaciones. El 100 % de los encuestados afirmó tener dificultades para conectarse a internet, siendo esto un impedimento constante en sus actividades escolares. La totalidad de los estudiantes manifestó que la señal móvil afecta negativamente su capacidad para estudiar, cargar contenido educativo y participar en clases virtuales, lo cual evidencia una grave brecha digital en la zona.

Además, el 83.3 % de los estudiantes utilizan su teléfono móvil como principal herramienta para acceder a internet, y el 76.7 % lo hace diariamente, lo que refleja una alta dependencia de la conectividad móvil para fines educativos. Sin embargo, el hecho de que el 100 % de los estudiantes indicó que sus teléfonos no reflejan ningún tipo de señal —ni siquiera 2G— pone en evidencia la urgente necesidad de una solución técnica que mejore la cobertura en la comunidad.

Respecto al tipo de actividades realizadas en línea, la mayoría reportó usar el internet para redes sociales (73.3 %) y tareas escolares (63.3 %), lo cual resalta la dualidad entre el uso recreativo y educativo de la red. No obstante, esta demanda se ve frustrada por la lentitud extrema del internet y la falta de señal, que también fue reconocida por la totalidad de los encuestados como un factor que limita su desarrollo académico.

Finalmente, todos los estudiantes expresaron su preferencia por acceder a tecnología 4G LTE, lo que refuerza la pertinencia de la propuesta de esta investigación, la cual plantea un sistema de antenas receptoras y sectoriales con amplificación y tecnologías MIMO y Beamforming para capturar y redistribuir eficazmente la señal LTE. Estos datos validan la necesidad del proyecto y justifican técnicamente su enfoque orientado a reducir la brecha digital en contextos rurales como el de David Tejada.

9.1.2. Análisis del sector adulto productivo (n = 40)

Los resultados obtenidos en la Encuesta #2, aplicada a adultos entre 21 y 50 años de la comunidad David Tejada, revelan que la conectividad móvil deficiente también afecta gravemente a este sector, compuesto en su mayoría por pequeños productores agrícolas y emprendedores. El 100 % de los encuestados indicó que utiliza su teléfono móvil tanto para fines personales como laborales, y el 32.5 % lo emplea diariamente para su trabajo, mientras que el 42.5 % lo hace ocasionalmente.

Las principales actividades reportadas incluyen comunicación con clientes o proveedores (77.5 %), consulta de pronósticos del clima o temas agrícolas (75 %) y publicidad de productos o servicios (70 %), lo cual evidencia un uso funcional del internet móvil como herramienta económica y productiva. Sin embargo, esta dependencia tecnológica contrasta fuertemente con la realidad de la infraestructura: el 95 % de los encuestados declaró no captar señal en sus teléfonos, y el 85 % calificó la calidad de la señal como “muy mala” para realizar actividades laborales en línea.

Además, el 100 % de los adultos señaló haber tenido problemas frecuentes para realizar pagos o mantener comunicación laboral debido a la señal deficiente. En cuanto al impacto productivo, el 75 % reconoció que la baja velocidad de internet afecta significativamente su trabajo, y el 25 % afirmó que le afecta en ocasiones. Ningún encuestado consideró que la conectividad actual no tenga impacto en su rendimiento.

Destaca también que el 100 % expresó su deseo de contar con tecnología 4G LTE, y el 83.3 % estaría dispuesto a pagar más por un servicio de internet de mejor calidad. Además, el 86.7 % consideró que las actuales instalaciones de telecomunicaciones en la comunidad son insuficientes para cubrir sus necesidades de comunicación y acceso a internet.

Estos datos respaldan de forma contundente la propuesta técnica planteada en esta investigación. La implementación de un sistema de antenas receptoras y sectoriales con tecnologías MIMO, Beamforming y amplificación permitiría captar señal desde puntos estratégicos y redistribuirla eficientemente, brindando acceso a servicios de calidad tanto para el desarrollo económico de los adultos como para mejorar la inclusión digital en la comunidad.

9.2. Análisis de resultados del objetivo específico #2 Crear el diseño inicial de un sistema de antenas de acuerdo con la Ley No. 1223, Ley General de Telecomunicaciones Convergentes, y la Ley No. 843, que regula la ubicación, construcción e instalación de estructuras de soporte para equipos de telecomunicaciones que hacen uso del espectro radioeléctrico

9.2.1. Análisis de diseño de la Antena de bocina receptora

El diseño simulado de la antena de bocina piramidal rectangular mostró un desempeño altamente eficiente para aplicaciones de captación de señal LTE en la banda de 2.6 GHz. A través del entorno MATLAB® y su herramienta Antenna Designer, se logró validar tanto la viabilidad geométrica como el comportamiento electromagnético del modelo.

Los resultados obtenidos indican una ganancia máxima de 21.5 dBi, lo cual confirma una fuerte capacidad de concentración de energía en la dirección del lóbulo principal, alineada con el eje X. Esta característica es fundamental para captar señales de estaciones base distantes en zonas rurales, maximizando la relación señal-ruido (SNR) del enlace descendente.

El análisis del coeficiente de reflexión (S11) evidenció una adaptación efectiva en el rango de 2.34 GHz a 2.81 GHz, lo cual equivale a un ancho de banda de 470 MHz, suficiente para cubrir de manera holgada toda la banda LTE y potencialmente otros servicios en la misma región espectral. La frecuencia central se situó en 2.575 GHz, muy próxima al valor objetivo de 2.6 GHz, y el ancho de banda fraccional (FBW) resultante fue del 18.25 %, clasificando al diseño como una antena de banda ancha.

Los patrones de radiación simulado en los planos azimutal y de elevación reflejan una directividad pronunciada. El ancho de haz a –3 dB fue de 13.2° en azimut y 8.8° en elevación, lo cual indica una emisión altamente direccional. A partir de estos valores se calculó una directividad de 25.5 dB, y al compararse con la ganancia simulada, se determinó una eficiencia total del 84 %. Este valor sugiere bajas pérdidas internas y una conversión energética eficaz desde el puerto de entrada hacia la propagación libre.

En conjunto, los resultados confirman que el diseño propuesto de la antena de bocina es adecuado para su implementación como etapa de captación inicial dentro del sistema de retransmisión de señal propuesto para la comunidad de David Tejada. La alta directividad, el

amplio ancho de banda y la elevada eficiencia del modelo simulado lo convierten en una solución técnicamente viable para zonas con cobertura limitada, garantizando una recepción estable de la señal LTE desde puntos estratégicos elevados de la localidad.

9.2.2. Análisis de diseño de Filtro pasa banda

El diseño del filtro pasabanda microstrip se orientó a operar de manera precisa en la frecuencia de 2.6 GHz, valor correspondiente a la Banda 7 del sistema LTE. Se definió un ancho de banda fraccional (FBW) del 10 %, que permitió establecer unas frecuencias de corte inferiores y superiores de 2.4699 GHz y 2.7301 GHz respectivamente. Estos parámetros fueron fundamentales para asegurar la selectividad y eficiencia necesarias en la etapa de filtrado del sistema de telecomunicaciones propuesto.

Mediante el uso de la herramienta profesional Marki Microwave, se logró generar un diseño físico de topología interdigital con respuesta Chebyshev de quinto orden, optimizado para tecnología microstrip sobre un substrato Rogers RO4003C. Esta elección se justifica por las bajas pérdidas dieléctricas del material ($\varepsilon_r = 3.55$) y su compatibilidad con sistemas de alta frecuencia. La configuración resultante proporcionó un balance entre complejidad constructiva y buen desempeño electromagnético.

Los resultados obtenidos a través de la simulación confirmaron que el filtro cumple adecuadamente su función: el parámetro S_{21} (transmisión) se mantuvo cercano a 0 dB dentro de la banda útil, lo cual indica una mínima atenuación de la señal deseada. En paralelo, el parámetro S_{11} (reflexión) mostró valores muy negativos en esa misma región, lo que evidencia una buena adaptación de impedancia y bajo nivel de señal reflejada. Ambos resultados validan el adecuado diseño del filtro en términos de eficiencia de transmisión y rechazo fuera de banda.

Además, el análisis del retardo de grupo reveló una estabilidad aceptable en la región de operación (entre 4 ns y 8 ns), lo cual es clave en aplicaciones móviles como LTE, donde el retardo puede afectar la sincronización de datos. Por otro lado, la pendiente de la fase de S_{21} en la zona de transición evidenció una respuesta altamente selectiva, característica propia de los filtros Chebyshev, lo cual refuerza la capacidad del filtro para discriminar señales fuera de la banda deseada.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que el filtro diseñado no solo cumple con los requerimientos establecidos para la aplicación en LTE, sino que también

presenta características de estabilidad y precisión que lo hacen viable para ser integrado en el sistema general de antenas. Su adecuada respuesta en frecuencia, acoplamiento eficiente y baja distorsión de fase lo posicionan como un componente robusto dentro de la cadena de captación y procesamiento de señal.

9.2.3. Análisis de diseño del Amplificador de bajo ruido LNA (Low Noise Amplifier) CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)

El diseño del amplificador de bajo ruido (LNA) CMOS constituye una etapa crítica en el sistema propuesto, al encargarse de amplificar la señal de 2.6 GHz previamente captada y filtrada, preservando su integridad espectral y reduciendo al mínimo la figura de ruido. Su correcta implementación garantiza un aumento de la sensibilidad del receptor, aspecto fundamental para una comunidad como David Tejada, donde la señal es débil debido a su geografía boscosa y montañosa.

Con base en la topología presentada en el libro *RF Microelectronics* de Behzad Razavi, se diseñó un LNA CMOS con degeneración inductiva, adaptado específicamente para operar a 2.6 GHz. A través del cálculo analítico de cada componente —siguiendo criterios de adaptación, resonancia y estabilidad— se definieron los parámetros críticos que aseguran el desempeño del circuito.

Los valores obtenidos para los inductores L_1 = 21.2 nH y L_s = 0.43 nH permitieron garantizar la adaptación de impedancia a 50 Ω en el nodo de entrada, compatible con la salida del filtro pasabanda. Además, el inductor de carga L_D = 25 nH fue calculado para maximizar la ganancia a la frecuencia objetivo mediante resonancia con la capacitancia de salida del nodo de drenaje.

En cuanto a los transistores, tanto M_1 como M_2 fueron dimensionados con una razón geométrica W/L = 1000 (180 µm / 0.18 µm), lo cual asegura una transconductancia de g_m = 20 mS. Esta configuración permite un espejo de corriente estable y eficiente, asegurando que la corriente de drenaje I_D = 1 mA fluya correctamente a través de M_1, manteniendo el circuito en región activa con un voltaje de polarización calculado de Vb = 0.5 V.

El nodo de salida V_{out}, diseñado para operar en torno a 1.8 V, se conecta directamente con el siguiente bloque del sistema, lo que permite una transición fluida sin necesidad de etapas

intermedias de adaptación. Este nivel de voltaje es coherente con la alimentación estándar de 1.8 V establecida por la tecnología CMOS de 0.18 μm, utilizada en el diseño.

En conjunto, los resultados obtenidos mediante los cálculos permiten presentar un diseño inicial robusto, con parámetros bien fundamentados para operar en la banda LTE correspondiente. Aunque la simulación del circuito completo no pudo realizarse debido a la falta de acceso a la herramienta Cadence Virtuoso, el diseño teórico proporciona una base sólida que podrá ser validada en el futuro mediante una herramienta alternativa o una vez disponible el entorno de simulación.

Este diseño no solo satisface los requerimientos técnicos del sistema, sino que también se adapta a la realidad del contexto rural nacional, ya que el uso de tecnologías CMOS de bajo costo y eficiencia comprobada representa una solución viable, escalable y replicable para mejorar la conectividad en zonas aisladas como la comunidad de David Tejada.

9.2.4. Análisis de diseño de Antenas sectoriales con tecnología MIMO adaptadas para Beamforming

El diseño de la antena sectorial representa la etapa final del sistema propuesto, siendo responsable de la retransmisión optimizada de la señal LTE amplificada. Se optó por una configuración de arreglo rectangular MIMO 4×4 compuesto por antenas de parche microstrip debido a su facilidad de implementación, bajo costo, y capacidad de operar eficientemente en la frecuencia objetivo de 2.6 GHz. Este tipo de topología es ideal para cobertura sectorial en zonas rurales como David Tejada, ya que permite un control preciso de la dirección y forma del haz radiado.

Los parámetros definidos para el diseño, como el espaciado de 0.076735 m entre elementos (equivalente a 0.5λ), aseguran una buena directividad sin acoplamientos indeseados entre antenas. Cada uno de los elementos fue caracterizado individualmente (longitud de 55.3 mm, ancho de 72.1 mm), y el substrato idealizado como aire ($\varepsilon_r = 1$) permitió realizar simulaciones simplificadas pero eficaces para observar el comportamiento del arreglo completo.

En la simulación del patrón de radiación tridimensional (Figura 50), se obtuvo una ganancia máxima aproximada de 20 dBi, lo cual demuestra una concentración significativa de energía en la dirección perpendicular al plano del arreglo (eje Z). Esta ganancia es suficiente

para garantizar una cobertura eficiente del sector asignado, lo que se alinea con el objetivo técnico del sistema de retransmisión.

La vista superior (XY) del patrón de radiación (Figura 51) muestra una distribución uniforme y simétrica en el plano horizontal, confirmando que la señal se dispersa de manera amplia y estable en el azimut, ideal para alcanzar múltiples usuarios en una dirección geográfica específica. Por su parte, las vistas laterales XZ (Figura 52) e YZ (Figura 53) evidencian la alta directividad vertical del arreglo, esencial para evitar dispersión hacia el suelo o cielo y maximizar la proyección horizontal.

Estos resultados indican que el arreglo diseñado cumple satisfactoriamente con los requerimientos de cobertura, directividad y ganancia exigidos para su función dentro del sistema. La arquitectura MIMO, además, mejora la confiabilidad de la señal retransmitida, ya que permite mantener la conectividad incluso si uno de los lóbulos principales experimenta atenuación por obstáculos físicos. Así, se garantiza redundancia espacial y mayor inmunidad a desvanecimientos, cualidades particularmente útiles en entornos rurales irregulares.

Cabe señalar que, aunque el diseño se encuentra adaptado estructuralmente para una futura implementación de *beamforming*, esta técnica no fue aplicada en la presente simulación debido a limitaciones técnicas, específicamente la indisponibilidad del *Phased Array System Toolbox* en MATLAB, herramienta necesaria para aplicar retardos de fase y controlar la dirección del haz. Esta restricción limitó el análisis al patrón de radiación natural del arreglo uniforme, sin orientación electrónica del haz.

No obstante, la configuración geométrica estándar y el diseño modular de la antena permitirán, en una segunda fase, implementar *beamforming* para dirigir la señal con mayor precisión hacia áreas de mayor demanda. Esta posibilidad amplía el potencial del diseño, asegurando su escalabilidad y adaptación a futuras mejoras.

En conclusión, el diseño inicial de la antena sectorial MIMO 4×4 proporciona una solución viable y técnicamente robusta para la distribución eficiente de la señal LTE en la comunidad. Su integración con las etapas anteriores (captación, filtrado y amplificación) cierra el ciclo funcional del sistema, acercando una solución concreta al problema de conectividad que enfrenta David Tejada.

9.3. Análisis de resultados del objetivo específico #3: Valorar la propuesta de diseño del sistema de antenas con expertos cualificados.

9.3.1. Análisis de resultados del apartado del diseño completo

Los resultados obtenidos revelan una aceptación unánime: el 100 % de los expertos calificó el diseño del sistema como "totalmente completo**"** para resolver el problema de cobertura identificado en la comunidad David Tejada.

Esta valoración resulta altamente significativa, ya que confirma que el diseño no presenta vacíos técnicos importantes y abarca integralmente todas las etapas necesarias: captación de señal LTE mediante una antena de bocina de alta ganancia, filtrado selectivo con un filtro pasabanda microstrip Chebyshev de 5to orden, amplificación mediante un LNA CMOS con adaptación precisa, y retransmisión sectorial a través de un arreglo MIMO 4×4.

9.3.2. Análisis de resultados del apartado de diseño de la antena de bocina receptora

El análisis de los resultados del diseño de la antena de bocina receptora, evaluado por siete expertos del área de telecomunicaciones, confirma la solidez técnica de esta primera etapa del sistema. El 71 % calificó la antena como "Totalmente adecuada / Excelente" para captar la señal LTE en la banda de 2.6 GHz, mientras que el 29 % la consideró simplemente "Adecuada". Esta opinión se basa en las propiedades del diseño, que incluye una ganancia simulada de 21.5 dBi, un ancho de banda de 470 MHz (entre 2.34 y 2.81 GHz), directividad elevada y una eficiencia estimada del 84 %.

Respecto a su capacidad de orientación como enlace punto a punto, el 86 % de los expertos la calificó como "Totalmente adecuada / Excelente" y el 14 % como "Adecuada". Esto valida que la geometría piramidal y la apertura de la bocina permiten una orientación precisa hacia la estación base, lo cual es indispensable en zonas rurales con obstáculos naturales.

Otro punto favorable es la elección del material de construcción. El 100 % de los evaluadores valoró como "Totalmente adecuado / Excelente" el uso de aluminio, destacando su bajo peso, buena conductividad y resistencia a la intemperie. Esto garantiza un rendimiento confiable incluso en condiciones climáticas adversas.

En cuanto al desempeño electromagnético, el 71 % de los expertos consideró que la ganancia de 21.5 dBi es “Suficiente” para captar señal LTE con fiabilidad, mientras que el 29 % la calificó como “Más que suficiente / Excelente”. Asimismo, el ancho de banda de 470 MHz fue considerado “Suficiente” por el 71 % y “Más que suficiente” por el 29 % restante, confirmando que la antena cubre adecuadamente toda la Banda 7 LTE e incluso ofrece margen ante posibles desvíos de frecuencia.

En conjunto, estos resultados validan que el diseño de la antena de bocina receptora es técnicamente apropiado y funcional para su papel como primer eslabón del sistema. Su desempeño cumple con los requisitos clave de ganancia, directividad, ancho de banda y robustez estructural, lo cual refuerza su idoneidad para captar señal en entornos rurales como el de David Tejada.

9.3.3. Análisis de resultados del apartado de diseño del Filtro Pasabanda Chebyshey de 5to orden con topología interdigital

El 100 % de los evaluadores calificó como “Totalmente adecuada / Excelente” la selección del filtro microstrip Chebyshev de quinto orden construido sobre substrato Rogers RO4003C, considerando su rendimiento, bajo costo y facilidad de fabricación.

En cuanto al análisis del comportamiento en frecuencia según la curva de parámetros S, todos los expertos coincidieron en que el filtro permite un paso limpio de la portadora LTE centrada en 2.6 GHz (con $S_{21} \approx 0$ dB en la banda de 2.47–2.73 GHz) y un rechazo eficaz fuera de banda. Específicamente, el 57 % calificó el desempeño como “Correcto” y el 43 % como “Totalmente correcto / Excelente”.

Este respaldo empírico se alinea con los resultados de simulación obtenidos mediante la herramienta de diseño Marki Microwave, en los que se evidenció una baja atenuación dentro de la banda útil ($S_{21} \approx 0$ dB) y una reflexión mínima (S_{11} muy negativo), lo que asegura una buena adaptación de impedancia y eficiencia en la transmisión. Además, el retardo de grupo del filtro se mantuvo estable entre 4 y 8 ns, condición deseable en sistemas LTE donde la estabilidad de fase afecta la sincronización de datos.

La respuesta altamente selectiva, característica de los filtros Chebyshev, también fue valorada positivamente por los expertos, dado que proporciona un rechazo preciso fuera de banda sin comprometer el paso de la señal deseada. Esto refuerza el rol crítico del filtro como etapa de discriminación espectral en el sistema propuesto, permitiendo una limpieza efectiva del canal antes de la amplificación.

En conjunto, la validación confirma que el filtro pasabanda diseñado no solo es técnicamente robusto y viable de fabricar, sino que también cumple satisfactoriamente con los requisitos operativos para su integración dentro del sistema de captación y retransmisión LTE en la comunidad David Tejada.

9.3.4. Análisis de resultados del apartado de diseño del amplificador de bajo ruido LNA CMOS

Los resultados del análisis del diseño del amplificador de bajo ruido (LNA) CMOS reflejan una validación técnica sólida por parte de los expertos. El 71 % de los evaluadores calificó la configuración de degeneración inductiva como “Totalmente adecuada / Excelente”, mientras que el 29 % restante la consideró “Adecuada”. Esta valoración confirma que la topología seleccionada cumple con los principios fundamentales para minimizar el ruido e igualar impedancias en aplicaciones de alta frecuencia como LTE a 2.6 GHz.

En relación con los cálculos del circuito (dimensiones de transistores, valores de inductancia y tensiones de operación), el 100 % de los expertos los consideró “Totalmente correctos / Excelente justificación”. Esta aceptación evidencia que el diseño teórico fue bien fundamentado y desarrollado con rigor académico.

Asimismo, el uso del modelo de transconductancia y resonancia para la adaptación de impedancia a 50 Ω fue calificado como “Totalmente apropiado / Excelente elección” por todos los expertos. Esta validación es crucial, ya que dicha adaptación es indispensable para garantizar la mínima pérdida de potencia en la transferencia hacia la siguiente etapa del sistema.

El diagrama esquemático del LNA fue considerado “Totalmente claro / Excelente representación” por el 100 % de los participantes, lo que sugiere que la documentación técnica fue elaborada con precisión y coherencia visual. De igual forma, el nivel de detalle técnico**,**

incluyendo fórmulas, parámetros característicos y justificaciones, fue valorado como "Totalmente adecuado / Excelente".

Otro aspecto destacado fue la evaluación de la integración entre el filtro pasabanda microstrip y el LNA, calificada como "Totalmente clara / Integración excelente" por todos los expertos, lo que respalda la coherencia entre ambas etapas del sistema.

Finalmente, el uso del texto **"**RF Microelectronics" de Behzad Razavi como base teórica del diseño recibió respaldo unánime, al ser considerado una fuente de referencia válida y confiable en el campo de diseño de circuitos de radiofrecuencia.

En conjunto, estos resultados confirman que, aunque no se realizaron simulaciones físicas debido a la ausencia de licencia para Cadence Virtuoso, el diseño teórico del LNA CMOS es completamente viable, bien documentado y técnicamente adecuado para su propósito dentro del sistema de retransmisión LTE.

9.3.5. Análisis de resultados del apartado de diseño de antenas sectoriales con tecnología MIMO adaptadas para Beamforming

El diseño del arreglo de antenas sectoriales con tecnología MIMO 4×4 adaptadas para beamforming fue bien valorado por los expertos. El 50 % de los evaluadores lo calificó como "Totalmente apropiado / Excelente elección" y el otro 50 % como "Apropiado / Viable". Esta distribución indica un consenso sobre la idoneidad del arreglo MIMO para la mejora de cobertura LTE en zonas rurales con baja conectividad.

El diseño fue destacado por cumplir satisfactoriamente con los requisitos de ganancia, directividad y cobertura sectorial. La arquitectura seleccionada aporta redundancia espacial, lo cual incrementa la confiabilidad del sistema frente a desvanecimientos e interferencias en el entorno físico montañoso de la comunidad David Tejada.

Aunque en esta fase del proyecto no se implementó beamforming activo debido a la falta de acceso al *Phased Array System Toolbox* de MATLAB, todos los expertos reconocieron que

el diseño está preparado estructuralmente para incorporar esta técnica en el futuro sin necesidad de rehacer el hardware.

Se valoró positivamente la elección de antenas de parche en tecnología microstrip y el uso de un substrato Rogers RO4003C, considerando su viabilidad técnica y económica en el contexto nicaragüense. Además, la ganancia estimada de 20 dBi del arreglo fue considerada suficiente para asegurar la cobertura sectorial en zonas con barreras geográficas.

En conjunto, los resultados evidencian que el diseño del sistema MIMO propuesto es escalable, moderno y técnicamente adecuado. Representa una solución eficiente para zonas rurales, y su preparación para una futura integración con beamforming adaptativo constituye un elemento clave que fortalece su aplicabilidad práctica.

Con el objetivo de obtener una validación cualitativa más profunda, se formularon tres preguntas clave a dos expertos con los que se pudo sostener una conversación directa posterior a la encuesta. Las respuestas permiten evaluar de forma integral la percepción de la arquitectura propuesta, su aplicabilidad y las oportunidades de mejora antes de una posible implementación real.

Respecto a la claridad y coherencia de la arquitectura general del sistema, ambos expertos coincidieron en que la propuesta es sólida, actualizada y técnicamente bien fundamentada. El Ing. Fausto Leonidas Palacio la describió como una solución que emplea “tecnología de última generación”, capaz de competir con implementaciones internacionales. Por su parte, el Dr. Jorge Luis Palacios destacó que el sistema está basado en principios ampliamente aceptados en el diseño de antenas, y que su adaptabilidad tanto para zonas rurales como urbanas refuerza su aplicabilidad. Además, enfatizó que el entorno rural presenta menos ruido electromagnético, lo que constituye una ventaja técnica en este tipo de despliegue.

En cuanto a la modernidad y aplicabilidad de la tecnología MIMO en contextos rurales como Nicaragua, ambos expertos fueron categóricos al afirmar que esta solución no solo es viable, sino que también representa una mejora significativa en términos de conectividad y desarrollo comunitario. El Dr. Palacios subrayó que incluso a nivel global, la implementación de MIMO aún no es común en muchas regiones, lo que resalta el carácter innovador de su

aplicación en este proyecto. El Ing. Palacio reforzó este punto, indicando que se trata de una tecnología con potencial para transformar las comunicaciones y el acceso a oportunidades en comunidades marginadas.

Finalmente, al consultar sobre recomendaciones para validar y mejorar aún más el diseño antes de su ejecución**,** los expertos ofrecieron observaciones prácticas y orientadas al fortalecimiento técnico. El Ing. Palacio sugirió complementar el uso de MATLAB con herramientas como Pathloss 5.0**,** que permitirían analizar de forma más precisa el comportamiento de la señal en enlaces multipunto, considerando obstáculos del terreno y variaciones topográficas. El Dr. Palacios, por su parte, recomendó incluir u**n** análisis más detallado del relieve geográfico y del comportamiento climático en la zona de implementación. Además, enfatizó la importancia de garantizar la calidad de los materiales, la potencia del sistema y el impacto de posibles contaminantes ambientales**.**

En conjunto, esta retroalimentación cualitativa valida el enfoque técnico de la propuesta, destaca su aplicabilidad real en entornos rurales y proporciona lineamientos concretos para fortalecer su implementación futura**.** Ambas opiniones no solo respaldan el trabajo monográfico, sino que lo proyectan como una propuesta de alto valor para su desarrollo en el campo profesional y comunitario.

10. Conclusiones

El propósito de esta investigación fue diseñar e integrar un sistema de captación, filtrado, amplificación y retransmisión de señal LTE que mejore el acceso a la red telefónica en la comunidad rural “David Tejada”. Una vez cumplidos los objetivos específicos, el equipo investigador arriba a las siguientes conclusiones:

- Diagnóstico de conectividad. Mediante dos encuestas (sector estudiantil n = 30; sector adulto productivo n = 40) se comprobó que la mayor parte de la población depende de señal 2G/3G de baja calidad y manifiesta siempre tener dificultades para estudiar, trabajar y realizar transacciones en línea, lo que confirmó la necesidad de una solución técnica para cerrar la brecha digital.
- Diseño de la antena de bocina receptora. Se implementó un modelo piramidal en MATLAB Antenna Designer optimizado para 2.6 GHz (banda 7 LTE). Los resultados de simulación mostraron 21.5 dBi de ganancia, 25.49 de directividad, 470 MHz de ancho de banda y 84 % de eficiencia, valores que superan los mínimos requeridos para un enlace de captación en zonas rurales.
- Desarrollo del subsistema RF.
    1) Se confeccionó un filtro pasabanda microstrip Chebyshev 5.º orden con 10 % de FBW, $S_{21} \approx 0$ dB y $S_{11} < -15$ dB en la banda pasante, con buen comportamiento en la banda 7, garantizando adecuada selectividad y adaptación a 50 Ω.
    2) Se dimensionó un LNA CMOS de 1.8 V con degeneración inductiva, transconductancia de 20 mS y carga resonante de 25 nH, capaz de elevar la señal sin degradar la relación señal-ruido en la etapa de recepción.
- Diseño de la antena sectorial de retransmisión. Se configuró un arreglo rectangular 4×4 de parches microstrip (espaciado 0.5 λ) que entrega ≈ 20 dBi de ganancia. Aunque no se efectuó beamforming debido a la ausencia del módulo Phased Array System Toolbox, la topología MIMO quedó preparada para su activación futura.
- Validación con expertos. Siete profesionales en telecomunicaciones calificaron el diseño global como “totalmente apropiado / excelente y alcanzable”. Entre sus recomendaciones destacan: (i) incorporar software de planeamiento de radioenlaces

como Pathloss 5.0 para modelar la topografía y (ii) contemplar variaciones climáticas y calidad de materiales antes de la implementación real.

- Viabilidad y proyección. El sistema propuesto aprovecha la señal LTE existente sin requerir infraestructura celular adicional, lo que reduce costos y tiempos de despliegue. Su modularidad permite replicarlo en otras comunidades rurales de Nicaragua y adaptarlo a diferentes bandas de frecuencia, contribuyendo así a la inclusión digital y al desarrollo socioeconómico local.

En síntesis, los resultados obtenidos y la valoración experta respaldan que el diseño cumple con los requisitos técnicos y regulatorios, valida la hipótesis de que un sistema de antenas integrado puede mejorar significativamente la cobertura móvil en zonas rurales, y sienta las bases para una implementación piloto en la comunidad “David Tejada”.

11. Recomendaciones

A continuación, se detallarán las recomendaciones sugeridas por el equipo investigador para optimizar aún más los diseños y obtener resultados más precisos:

Recomendaciones generales

1. Profundizar en la etapa de simulación de cada uno de los componentes:
   Antes de fabricar cualquier prototipo, amplíe la validación numérica con herramientas complementarias (p. ej. Pathloss 5.0 para escenarios multipunto y CST/HFSS para análisis 3-D). Esto permitirá refinar pérdidas, calcular distancias reales y anticipar la influencia del relieve.

2. Caracterizar el entorno físico con mayor detalle:
   Levante un perfil topográfico y registre variables climáticas (lluvia, humedad, ráfagas de viento). Estos datos son esenciales para ajustar la altura de instalación, la potencia del LNA y el tipo de protección contra descargas.

3. Optimizar cada subsistema de forma iterativa:

   - Antena de bocina: explore materiales alternativos (aleaciones anticorrosivas) y evalúe transiciones de guía-onda más compactas.
   - Filtro pasabanda: afine la ondulación (ripple) y verifique la estabilidad térmica del substrato.
   - LNA CMOS: revise la figura de ruido con transistores de última generación y calibre inductores con factor Q elevado.
   - Arreglo MIMO: cuando disponga de Phased Array System Toolbox, implemente beamforming digital para comparar directividad y cobertura.

4. Prototipar en laboratorio antes de campo:
   Monte una maqueta a escala para medir VSWR, ganancia y figura de ruido con instrumentos de RF. Detectar desajustes en banco reduce costos y tiempos durante la instalación real.

5. Planificar pruebas piloto en la comunidad:

   Instale un enlace experimental en el punto alto de David Tejada, registre métricas (RSRP, SINR, throughput) durante al menos dos semanas y ajuste los parámetros de diseño con base en resultados reales.

6. Gestionar alianzas y licencias

   Coordine con TELCOR y el operador móvil local para obtener frecuencias, permisos y, de ser posible, apoyo logístico. Esto facilitará la fase de despliegue y garantizará la compatibilidad regulatoria.

7. Capacitar y transferir conocimiento a la comunidad

   Prepare guías operativas sencillas y forme a usuarios locales en mantenimiento básico, de modo que el sistema siga operativo sin depender exclusivamente de personal especializado.

8. Mantener un ciclo de mejora continua

   Documente todos los ajustes, mida su impacto y conserve un repositorio de versiones. Este enfoque incremental permitirá que la solución evolucione y se optimice a medida que cambien las condiciones o se disponga de nuevas tecnologías.

12. Referencias Bibliográficas

AliExpress. (2025). *Práctico filtro pasabanda microstrip 2,4 GHz para mejorar la relación señal-ruido*. https://spanish.alibaba.com/g/make-bandpass-filter.html

ALOTSER. (2025). *Desmitificando los decibelios: Guía para la conversión de dB a dBi y la ganancia de antena*. https://www.alotceriot.com/es/desmitificando-los-decibelios-una-guia-para-la-conversion-de-db-a-dbi-y-la-ganancia-de-antena/

Antenna-Theory.com. (s. f.). *Horn antennas*. https://www.antenna-theory.com/antennas/aperture/horn.php

Asamblea Nacional de Nicaragua. (2024). *Ley General de Telecomunicaciones Convergentes* (La Gaceta, Diario Oficial N.º 238). https://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/b92aaea87dac762406257265005d21f7/b36ffc254bbdd5de06258692006da0f3

ATL Europa. (s. f.). *¿Qué es la tecnología beamforming y qué aporta a la comunicación inalámbrica?* https://www.atleuropa.es/que-es-tecnologia-beamforming-que-aporta-a-comunicacion-inalambrica/

Balanis, C. A. (2016). *Antenna theory: Analysis and design* (4.ª ed.). John Wiley & Sons.

Calvo, J. F. (s. f.). *Amplificación* [Folleto]. Centro Integrado de Formación Profesional N.º 1.

Castillo, E. G., Castillo-Aranibar, P., Sotomayor Polar, M. G., & Gonzales Fuentes, L. (2014, marzo). *Aplicaciones y teoría de ingeniería de microondas* [Archivo PDF]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/313823162

Centeno, E. (2014). *Aplicaciones y teoría de ingeniería de microondas* [Archivo PDF]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/313823162

Claro Nicaragua. (2025). *Planes Claro Hogar*. https://tiendaenlinea.claro.com.ni/categories/planesserviciosfijos/planesclarohogar

Colombia Potencia de la Vida. (s. f.). *Composición del espectro electromagnético*. https://portalespectro.ane.gov.co/Style%20Library/ane_master/que-es-el-espectro-radioelectrico.aspx

Comisión Europea. (2024, 29 octubre). *Espectro de radio: La base de las comunicaciones inalámbricas*. https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/policies/radio-spectrum

Eduardo_D. (2023, 8 junio). Tecnología beamforming en las redes 5G y cómo mejora la calidad de la señal. *Foro Huawei*. https://forum.huawei.com/enterprise/intl/es/thread/667241515635851264

FIBOS Medicament Technology (Changzhou) Co., Ltd. (2024, 29 diciembre). *¿Qué es un amplificador de señal?* https://www.fibossensor.com/es/what-is-a-signal-amplifier.html

Fibocom Wireless Inc. (2025). *¿Qué es la tecnología Massive MIMO y cómo impacta al 5G?* https://www.fibocom.com/en/blog/what-massive-mimo-technology-how-does-it-impact-5g.html?id=5867

Freedman, D., Pisani, R., & Purves, R. (2014). *Statistics* (4th ed.). W. W. Norton & Company. Goldsmith, A. (2005). *Wireless communications*. Cambridge University Press.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Huidobro, J. M. (2013). Antenas de telecomunicaciones. *Revista Digital de ACTA*. https://revistadigitalacta.files.wordpress.com/2013/11/antenas_de_telecomunicaciones.pdf

IELECTEL. (2025). *¿Qué es una antena? Tipos, funcionamiento y aplicaciones*. https://ielectel.com/que-es-una-antena-tipos-funcionamiento-y-aplicaciones/

Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT). (2021). *Conformación de haces (beamforming)*. https://www.ift.org.mx

Instituto Federal de Telecomunicaciones. (2025). *El espectro radioeléctrico* [Ilustración]. https://www.ift.org.mx/node/6283

Instituto Federal de Telecomunicaciones. (2025). *Espectro radioeléctrico*. https://www.ift.org.mx/secciones/espectro-radioelectrico?page=10

Instituto Federal de Telecomunicaciones. (2025). *Espectro radioeléctrico – Generalidades*. https://www.ift.org.mx/espectro-radioelectrico/generalidades

Instituto Federal de Telecomunicaciones. (2025). *Usos del espectro radioeléctrico*. https://www.ift.org.mx/secciones/espectro-radioelectrico?page=10

Instituto Nacional de Información de Desarrollo. (2008). *Estimaciones y proyecciones de población: Revisión 2007*. https://www.inide.gob.ni

Instituto Nicaragüense de Telecomunicaciones y Correos. (2021, 21 julio). *Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF)*. https://telcor.gob.ni/espectro2/

Kraus, J. D., & Marhefka, R. J. (2002). *Antennas for all applications* (3.ª ed.). McGraw-Hill.

Mancera, M. (2013). *Comunicación inclusiva a través de las TIC en las aulas* [Tesis doctoral, Universidad de Málaga]. http://hdl.handle.net/10630/12345Murillo Fuentes, J. J. (2013). *Fundamentos de radiación y radiocomunicación* (2.ª ed.). Universidad de Sevilla.

Orfanidis, S. J. (2002). *Electromagnetic waves and antennas*. Rutgers University.

Pagés Álvarez, J. C. (2017). *Diseño y análisis de una antena monopulso en banda W* [Trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio UPV. https://riunet.upv.es/handle/10251/91850

Radicelli, D., & Cardona, N. (2018). *Propuesta de conectividad a Internet para zonas rurales mediante un canal de retorno para ISDB-Tb*. Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia, Universitat Politècnica de València.

Radicelli-García, C. D., & Cardona, N. (2015). A second-generation digital terrestrial television wireless return channel standard for providing Internet connectivity in rural areas in Latin America. *IEEE Latin America Transactions, 13*(9), 2837–2844.

Razavi, B. (1998). *RF microelectronics*. Prentice Hall.

Sangucho Taco, I. S. (2011). *Estudio de tecnología MIMO y su aplicación en las telecomunicaciones* [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio EPN. http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4170

Schiavon, M. I. (2003). *Circuitos analógicos y amplificación* [Apuntes de cátedra]. Universidad Nacional de Rosario. https://www.fceia.unr.edu.ar/eca1/files/teorias/AmplificacionRF-2003.pdf

The MathWorks, Inc. (s. f.). *Catálogo de antenas de bocina* (Antenna Toolbox). https://la.mathworks.com/help/antenna/horn-antennas.html

The MathWorks, Inc. (1994–2025). *Beamforming (concept overview)*. MATLAB & Simulink. https://www.mathworks.com/discovery/beamforming.html

Thede, L. (2004). *Practical analog and digital filter design*. Artech House.

Universidad de Sevilla. (s. f.). Capítulo 3. Tecnología MIMO. En *Redes de área local inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College. Parte I: Estudio teórico*. https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11579/fichero/g.+Cap%C3%ADtulo+3+-+Tecnolog%C3%ADa+MIMO.pdf

Universidad Nacional de Tucumán. (s. f.). *Elementos de sistemas de comunicaciones* [Apuntes de cátedra]. https://catedras.facet.unt.edu.ar/ft/wpcontent/uploads/sites/123/2019/03/02-Elementos-de-Sistemas-de-comunicaciones.pdf

13. Anexos

Anexo A, Vista satelital oblicua de la comunidad David Tejada, Bocana de Paiwas RACCS

En este anexo se muestra la vista satelital de la comunidad.

Figura 77

Vista satelital oblicua de la comunidad David Tejada, Bocana de Paiwas (RACCS)



Nota. La imagen muestra una vista oblicua en Google Earth™ de la comunidad rural David Tejada, situada en Bocana de Paiwas, RACCS (Nicaragua), señalada en las coordenadas 12° 51′ 25″ N, 85° 10′ 45″ W; el punto marcado se encuentra a una elevación aproximada de 222 m s. n. m., mientras que la cámara estaba posicionada a unos 336 m de altura según la escala inferior.

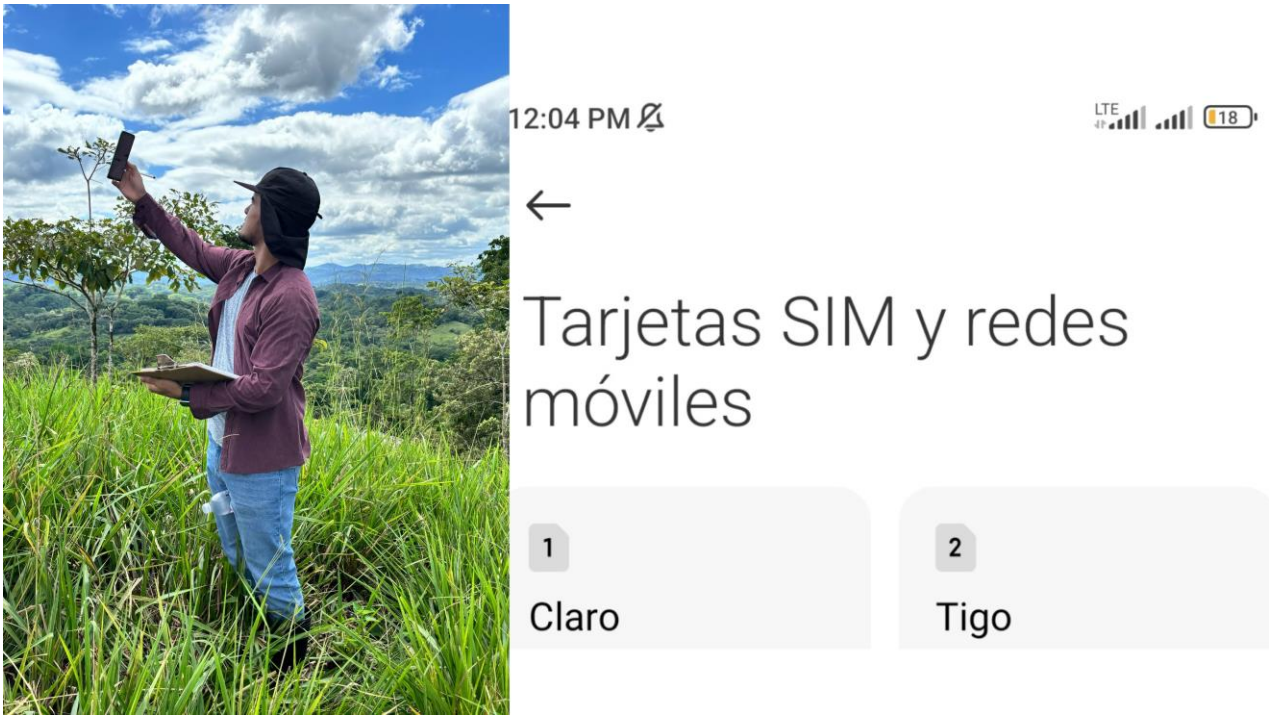
Fuente: Elaboración propia obtenida de Google Earth™.

Anexo B, Mediciones de señal en la comunidad David Tejada, Bocana de Paiwas RACCS

En este anexo a como se muestra en la Figura 78, se muestra la medición de la señal LTE en el punto alto de la comunidad David Tejada.

Figura 78

Punto alto de medición de señal en la comunidad David Tejada para ubicación de la antena receptora

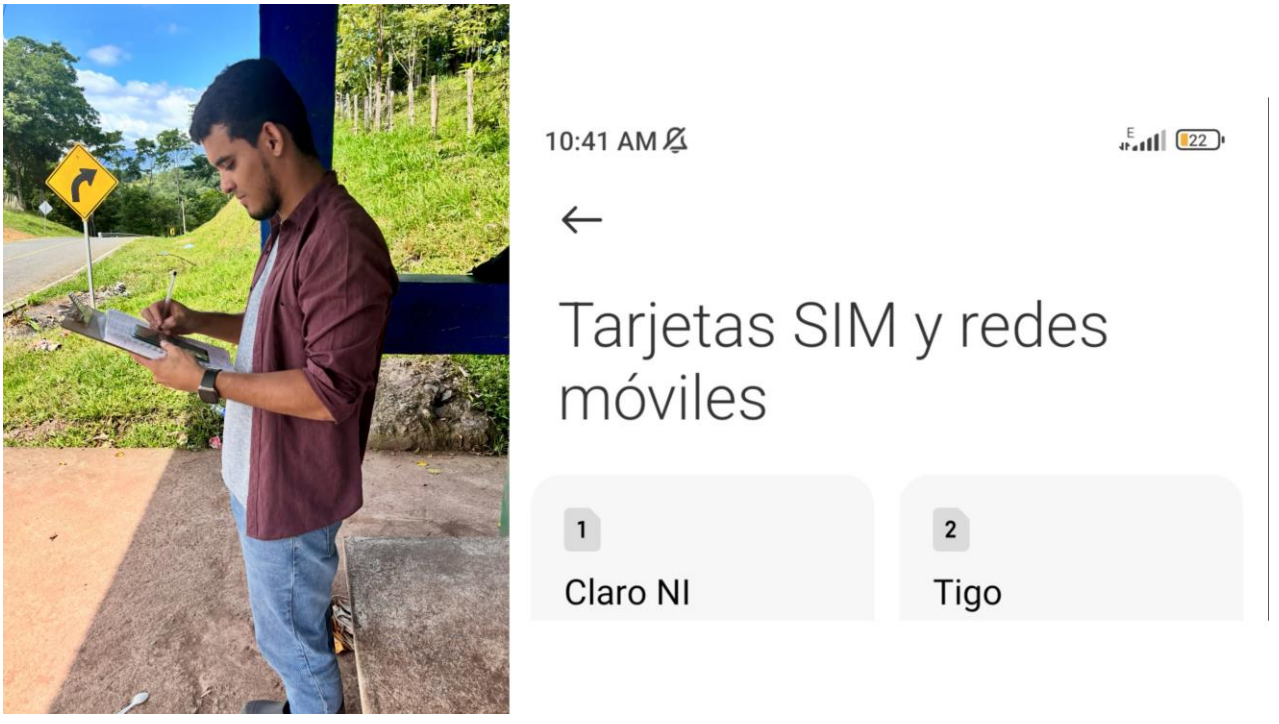


Nota. La imagen muestra el proceso de medición de señal LTE en uno de los cerros aledaños a la comunidad David Tejada, en Bocana de Paiwas (RACCS). Este punto fue identificado por los pobladores como el lugar con mejor recepción de señal móvil, evidenciado en la imagen por la conectividad LTE registrada por el dispositivo. Dado su carácter elevado y despejado, con baja presencia de obstáculos físicos, se propone como el sitio óptimo para la instalación de la antena de bocina receptora del sistema. Desde este punto, la señal podrá ser captada con mayor eficiencia para su posterior procesamiento y redistribución. **Fuente:** Elaboración propia.

Anexo C, Seguimiento de las mediciones de la señal en la comunidad David Tejada, Bocana de Paiwas RACCS

Figura 79

Parte de las mediciones de señal realizadas



Nota. La imagen evidencia una de las áreas ubicadas entre el punto elevado de captación y la zona donde se concentra la mayoría de viviendas en la comunidad David Tejada. En este lugar, correspondiente a una parada intermedia, se registró una señal móvil extremadamente débil (solo red 2G/E) y, al acercarse más a las viviendas, la conectividad desaparecía por completo. Esta observación coincide con los resultados reflejados en la Figura 78 del documento, donde una parte significativa de los habitantes indicó no recibir señal alguna. La falta de cobertura en este sector refuerza la necesidad del sistema propuesto, cuyo objetivo es captar la señal desde el punto alto y retransmitirla hacia estas zonas críticas. **Fuente:** Elaboracion propia.

Anexo D, Encuesta 1: Sector Estudiantil (12-20 años)

Tabla 12

Encuesta 1: Sector Estudiantil (12-20 años)

Por favor, lea cuidadosamente cada pregunta y marque la opción que mejor describa su situación o percepción. Las respuestas serán tratadas de manera confidencial y solo se usarán para fines de investigación



1) ¿Cuántos años tienes?

☐7-12 años ☐13-17 años ☐18-20 años

2) ¿Usas tu teléfono móvil para acceder a internet?

☐si ☐no

3) ¿Qué tan seguido usas internet en tu teléfono móvil?

☐Todos los días ☐Algunas veces a la semana ☐Solo de vez en cuando ☐Nunca

4) ¿Para qué actividades usas internet en tu teléfono móvil? (Puedes marcar más de una opción)

☐Investigar para tareas escolares ☐Jugar videojuegos

☐Redes Sociales ☐Ver videos o películas

☐Leer noticias o artículos ☐Otra (especificar)

5) ¿Cuánta dificultad tienes para cargar o ver contenidos en internet (como videos, páginas educativas, etc.)?

☐Siempre tengo dificultades ☐A veces tengo dificultades ☐No tengo dificultades

6) ¿La calidad de la señal (2G, 3G, 4G) afecta tu capacidad para estudiar o hacer tareas en línea?

☐Si, afecta mucho ☐A veces afecta ☐No afecta

7) ¿Has tenido alguna vez dificultades para participar en clases virtuales o hacer tareas debido a la mala calidad de la red?

☐Si, frecuentemente ☐A veces ☐No, nunca

8) ¿Qué tipo de señal capta en tu teléfono móvil?

☐2G ☐3G ☐4G LTE ☐No refleja señal

9) ¿Qué tan rápido o lento consideras que es el internet en tu teléfono móvil?

☐Muy lento ☐Lento ☐Rápido ☐Muy rápido

10) Si pudieras mejorar la señal de internet, ¿preferirías tener acceso a 4G LTE?

☐Si ☐No

Anexo E, Encuesta 2: Sector Adulto Productivo (21-50 años)

Tabla 13

Encuesta 2: Sector Adulto Productivo (21-50 años)

Por favor, lea cuidadosamente cada pregunta y marque la opción que mejor describa su situación o percepción. Las respuestas serán tratadas de manera confidencial y solo se usarán para fines de investigación

UNICIT
UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA
DE CIENCIA Y TECNOLOGIA

1) ¿Cuántos años tienes?

☐21-40 años ☐41-50 años ☐Mas de 50 años

2) ¿Usas tu teléfono móvil para acceder a internet en tu trabajo o uso personal?

☐si ☐No

3) ¿Qué tan seguido usas internet en tu teléfono móvil para el trabajo o negocio?

☐Todos los días ☐Algunas veces a la semana ☐Solo de vez en cuando ☐Nunca

4) ¿Para qué actividades usas internet en tu teléfono móvil para el trabajo? (Puedes marcar más de una opción)

☐Publicidad de productos o servicios ☐Comunicación con clientes o proveedores

☐Consultar precios o información del mercado ☐Realizar pagos o transferencias

☐Consultar pronósticos del clima o temas agrícolas ☐Otra(especificar)

5) ¿Cómo calificarías la calidad de la señal para realizar tus actividades laborales en línea?

☐Muy mala ☐Mala ☐Aceptable ☐Buena ☐Muy buena

6) ¿Has tenido problemas para realizar pagos en línea o comunicarte con clientes o proveedores debido a la mala calidad de la señal?

☐Si, frecuentemente ☐A veces ☐No, nunca

7) ¿Qué tipo de señal captas en tu teléfono móvil?

☐2G ☐ 3G ☐4G LTE ☐No refleja señal

8) ¿Consideras que la velocidad de internet (2G, 3G) afecta negativamente tu productividad laboral?

☐Si, afecta mucho ☐A veces afecta ☐No afecta

9) ¿Te gustaría tener acceso a una mejor señal, como 4G LTE, para mejorar tu negocio o trabajo?

☐Si ☐No

10) ¿Estarías dispuesto a pagar más por un servicio de internet de mejor calidad para tu uso personal y/o negocio?

☐Si ☐No ☐No estoy seguro

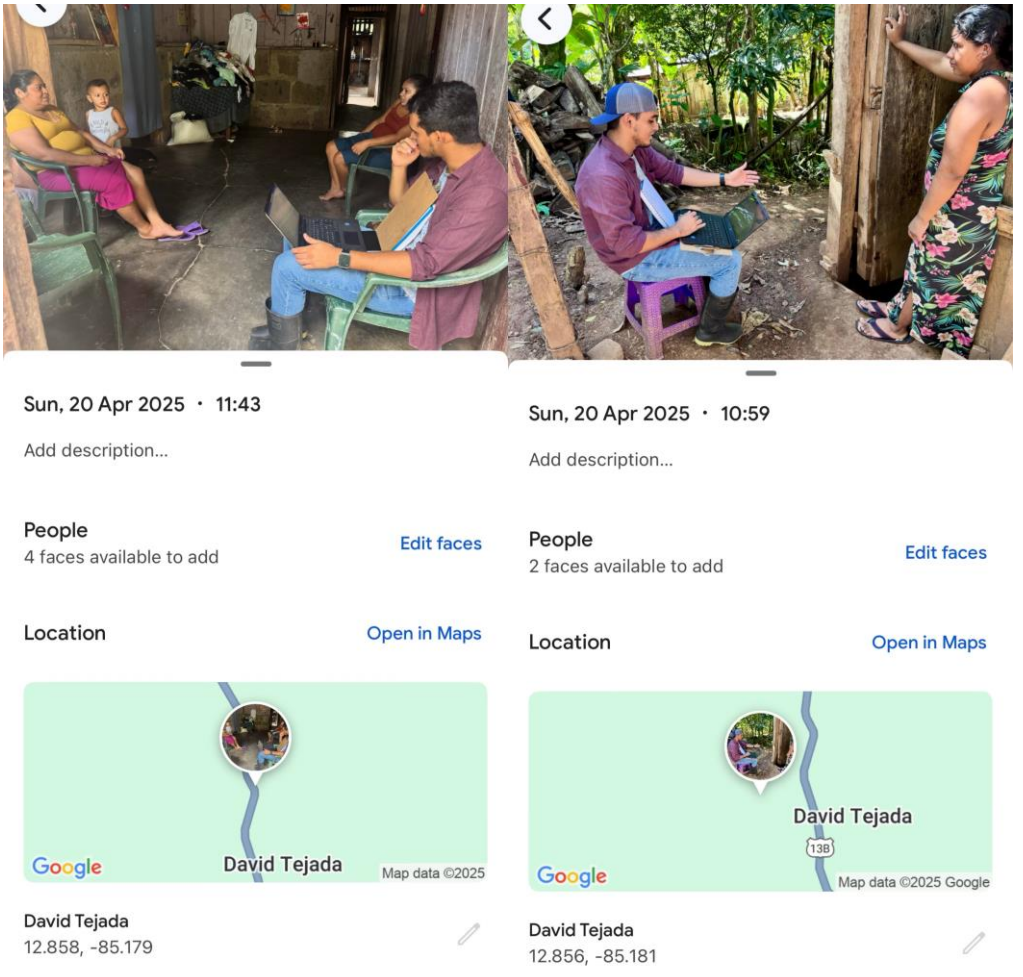
11) ¿Considera que las instalaciones de telecomunicaciones en su comunidad (David Tejada) son suficientes para cubrir sus necesidades de comunicación y acceso a Internet?

☐Si ☐No ☐No estoy seguro

Anexo F, Aplicación de encuestas a personas seleccionadas en la comunidad David Tejada, Bocana de Paiwas RACCS

Figura 80

Aplicación de encuestas a pobladores de la comunidad David Tejada

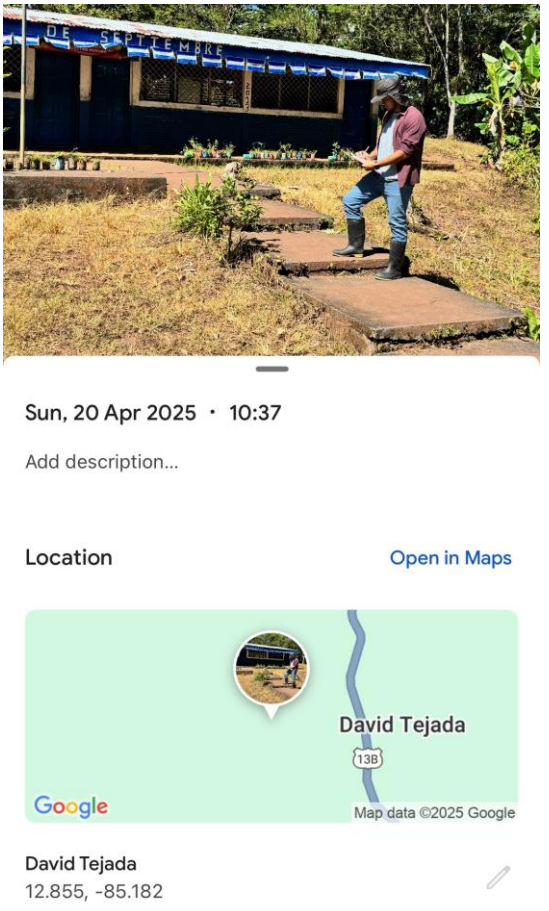


Nota. Las imágenes muestran el proceso de levantamiento de encuestas realizado el 20 de abril de 2025 en distintos puntos de la comunidad rural David Tejada. Estas encuestas formaron parte de la recolección de datos para evaluar el acceso a la red telefónica móvil, la percepción sobre la calidad del servicio y las necesidades de conectividad de los habitantes. Las entrevistas se realizaron de forma presencial en los hogares, asegurando la participación directa de los pobladores y obteniendo información contextualizada y representativa del entorno. **Fuente:** Elaboración propia.

Anexo G, Aplicación de encuestas al sector estudiantil en la escuela de la comunidad David Tejada Bocana de Paiwas RACCS

Figura 81

Aplicación de encuestas al sector estudiantil en la escuela de la comunidad David Tejada



Nota. La imagen corresponde al momento en que se aplicaron encuestas a estudiantes de la comunidad rural David Tejada, específicamente en las afueras del centro educativo local, el 20 de abril de 2025. Esta actividad formó parte del proceso de recolección de información del sector juvenil (12 a 20 años), con el objetivo de conocer sus necesidades de conectividad, el uso de la red móvil para fines educativos y las limitaciones que enfrentan en el acceso a internet dentro de su entorno escolar. **Fuente:** Elaboración propia.

Anexo H, Encuesta de validación del diseño propuesto con expertos cualificados

Tabla 14

Encuesta de validación del flujo del sistema completo

Facultad de Ingenierías y Arquitectura

Trabajo monográfico Para optar al título de Ingeniero en

Electrónica y Telecomunicaciones

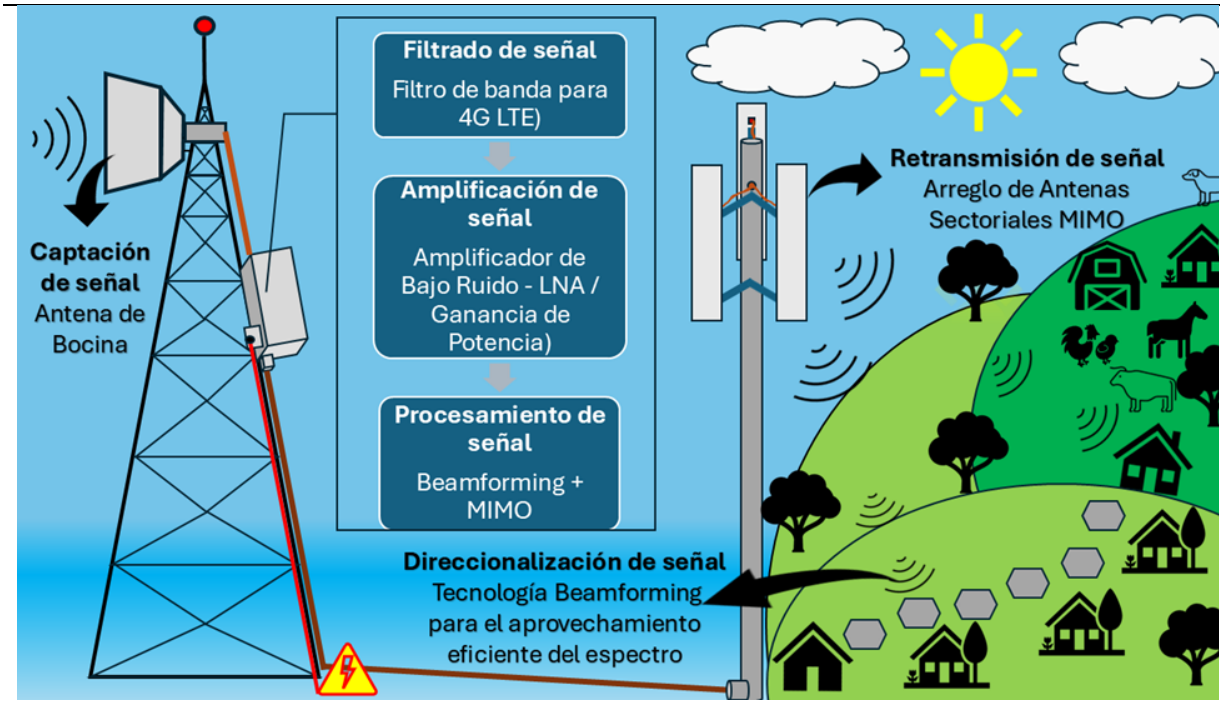
Tema:

Diseño de un sistema de antenas integrado con amplificación y tecnologías avanzadas de MIMO y Beamforming para mejorar el acceso a la red telefónica en la comunidad David Tejada durante el primer semestre de 2025

Estimado Profesor:

Agradezco de antemano su valiosa colaboración en la evaluación técnica de esta propuesta. Su criterio profesional es esencial para confirmar la pertinencia, viabilidad y calidad de este diseño inicial para su defensa. Completar la guía le tomará aproximadamente 10 minutos. La información que nos brinde se empleará exclusivamente con fines académicos, Dios les bendiga.

Diseño inicial del sistema propuesto



Pregunta única

1) ¿Qué tan completo considera el diseño mostrado para resolver el problema de cobertura de la comunidad?

☐ Muy Incompleto ☐ Incompleto ☐ Parcialmente completo ☐ Completo ☐ Totalmente completo

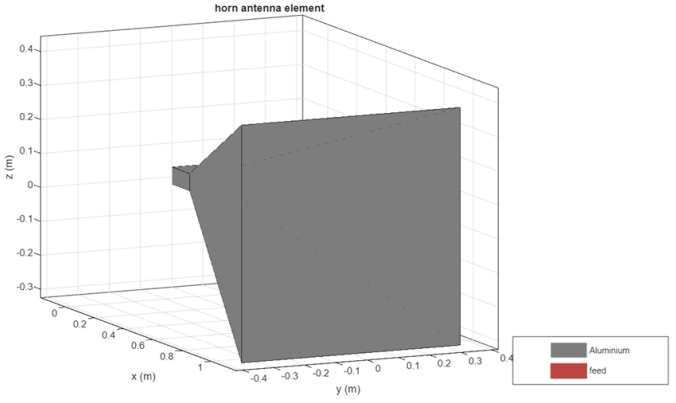
---

Tabla 15

Encuesta de validación de geometría de la antena receptora

Estimado profesor, con el fin de otorgar mayor precisión y profundidad a su valiosa validación, procederemos a desglosar los cuatro componentes de nuestro diseño como es la captación, filtrado, amplificación y retransmisión MIMO, presentando para cada uno los esquemas implementados y los resultados obtenidos hasta la fecha. Su evaluación detallada de estos bloques nos permitirá confirmar la solidez técnica de la propuesta y reforzar su fundamentación para la defensa.

Componente #1 Diseño de la antena de bocina receptora



Notas.

Diseño en MATLAB

Diseñada a prueba y error debido a los limites de medidad en el software y limitantes de tiempo en calculos extensos

Especificaciones

Material: Aluminio

Frecuencia de operación (f_0): 2 600 MHz (Banda 7 LTE)

Geometría de la bocina:

Flare Length = 1 m

Flare Width = 0.70 m

Flare Height = 0.70 m

Guía de ondas rectangular:

Largo = 0.12 m

Ancho = 0.10 m

Alto = 0.05 m

Preguntas sobre las dimensiones de la antena

2) ¿Qué tan apropiada considera la antena de bocina piramidal elegida para captar la señal LTE en la banda de 2,6 GHz, considerando su directividad, ganancia y tamaño en comparación con otros estilos de antena disponibles?

☐ Totalmente Inadecuada ☐ Inadecuada ☐ Parcialmente Adecuada

☐ Adecuada ☐ Totalmente Adecuada/Excelente

3) ¿La geometría de la antena permite una orientación precisa hacia la fuente de señal como enlace punto a punto?

☐ Totalmente Inadecuada ☐ Inadecuada ☐ Parcialmente Adecuada

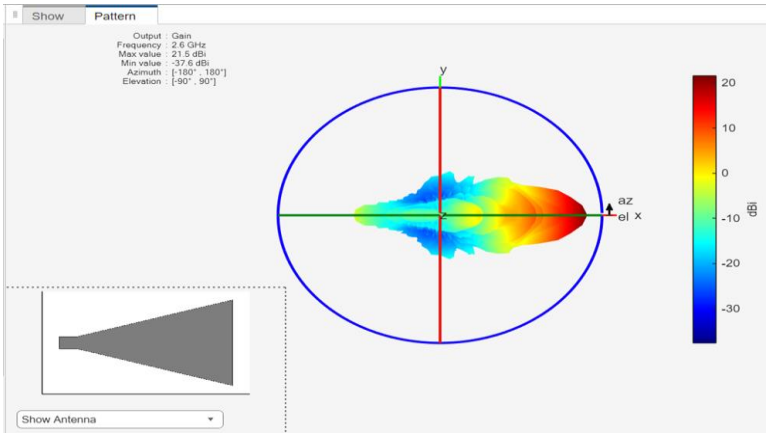
☐ Adecuada ☐ Totalmente Adecuada/Excelente

4) ¿Considera adecuado el uso de aluminio, un material de bajo costo, como conductor de la antena, tomando en cuenta su conductividad, peso y resistencia a la intemperie?

☐ Totalmente Inadecuado ☐ Inadecuado ☐ Parcialmente Adecuado

☐ Adecuado ☐ Totalmente Adecuado/Excelente

Patron de radiacion obtenido



Resultados generales obtenidos

Ganancia: 21.54 dbi

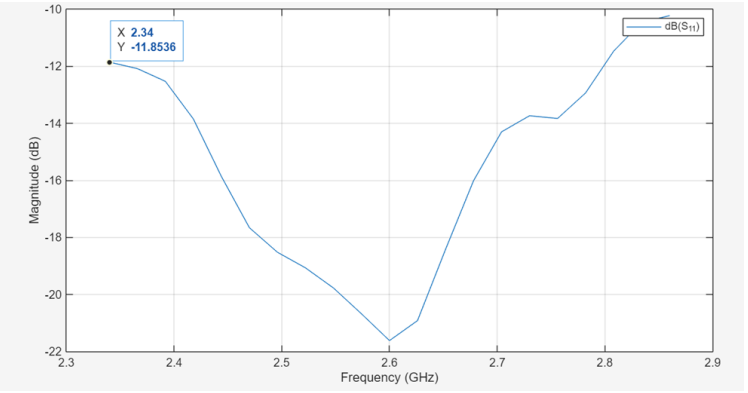
Rango s11: 2.34 Ghz – 2.81 Ghz

Ancho de banda: 470 Mhz

Freecuencia central: 2.575 Ghz

Ancho de banda fraccional: 18.25%

Coeficiente de reflexión



Beamwidth a -3:

Azimutb= 13.2°

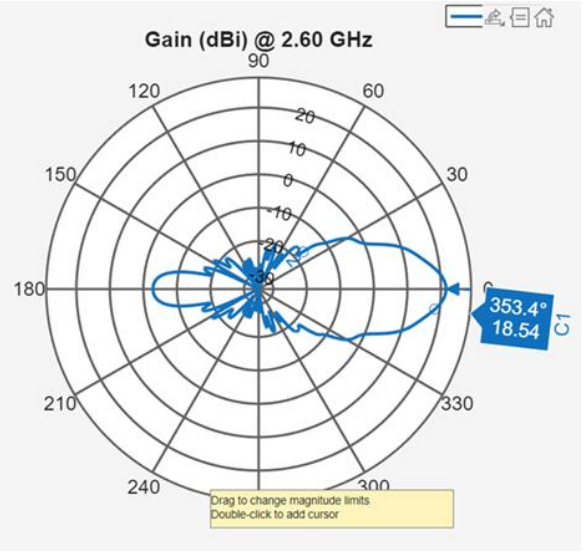
Elevación = 8.8°

Directividad: 25.5 db

Eficiencia: 84%

Radiación Azimutal

Sidelobes: –37.6 dBi



Preguntas sobre resultados de simulación y cálculos

5) ¿La ganancia máxima simulada de 21.54 dBi a 2.6 GHz es suficiente para captar con fiabilidad la señal LTE en los puntos elevados de la comunidad?

☐ Totalmente Insufuciente ☐ Insufuciente ☐ Parcialmente Suficiente

☐ Suficiente ☐ Mas que suficiente/Excelente

6) ¿El ancho de banda operativo de 470 MHz (2.34 – 2.81 GHz), resulta suficiente para cubrir toda la banda 7 LTE y ofrecer margen ante posibles desvíos de frecuencia?

☐ Totalmente Insufuciente ☐ Insufuciente ☐ Parcialmente Suficiente

☐ Suficiente ☐ Mas que suficiente/Excelente

7) El diseño presenta un ancho de banda fraccional del 18 %. ¿Considera que este margen es suficiente para compensar variaciones de frecuencia, tolerancias de fabricación y futuras ampliaciones de servicio dentro de la banda LTE?

☐ Totalmente Insuficiente ☐ Insuficiente ☐ Parcialmente Suficiente

☐ Suficiente ☐ Mas que suficiente/Excelente

8) La antena presenta una eficiencia teórica del 84 %. ¿Considera que este nivel de eficiencia es suficiente para minimizar pérdidas y preservar la calidad de la señal en la aplicación propuesta?

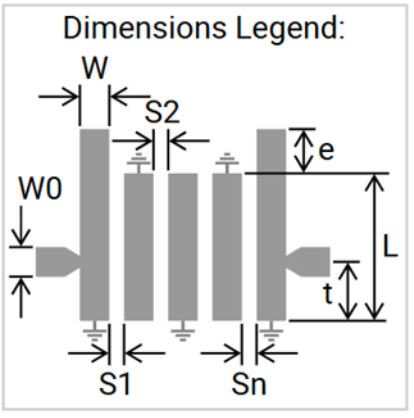
☐ Totalmente Insuficiente ☐ Insuficiente ☐ Parcialmente Suficiente

☐ Suficiente ☐ Mas que suficiente/Excelente

Tabla 16

Encuesta de validación del diseño del filtro pasabanda

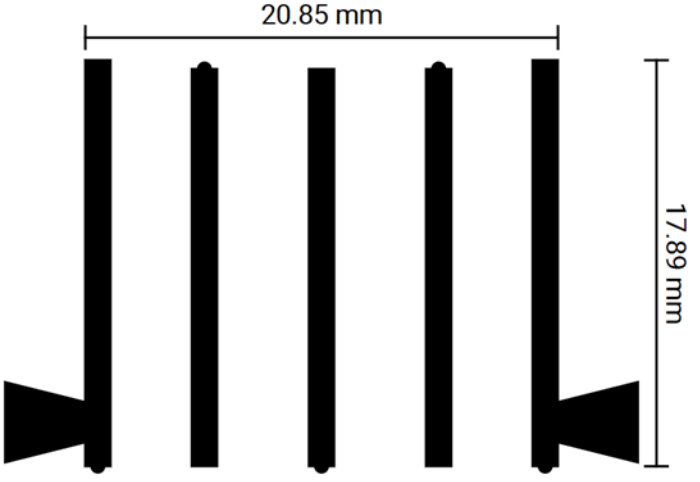
Componente #2 Diseño del Filtro Pasabanda	**Notas.**
Dimensiones del filtro pasabanda Chebyshey de 5to orden con topología interdigital	Se procedió s utilizar la herramienta en línea desarrollada por Marki Microwave porque es ampliamente reconocida



W0 = 3.532 mm
W = 1.117 mm
L = 17.50 mm
t = 1.937 mm
e = 390.1 um

S1 = 3.585 mm
S2 = 4.048 mm
S3 = 4.048 mm
S4 = 3.585 mm

Vista general del layout



en la industria de radiofrecuencias y microondas.

Su uso se justifica por mayor rapidez y precisión en el proceso del diseño inicial.

Los parámetros ingresados en la herramienta fueron cuidadosamente calculados para la frecuencia 2.6Ghz.

Especificaciones:

Tipo de filtro: Pasabanda

Frecuencia de corte inferior: 2.4699 Ghz

Frecuencia de corte superior: 2.7301 Ghz

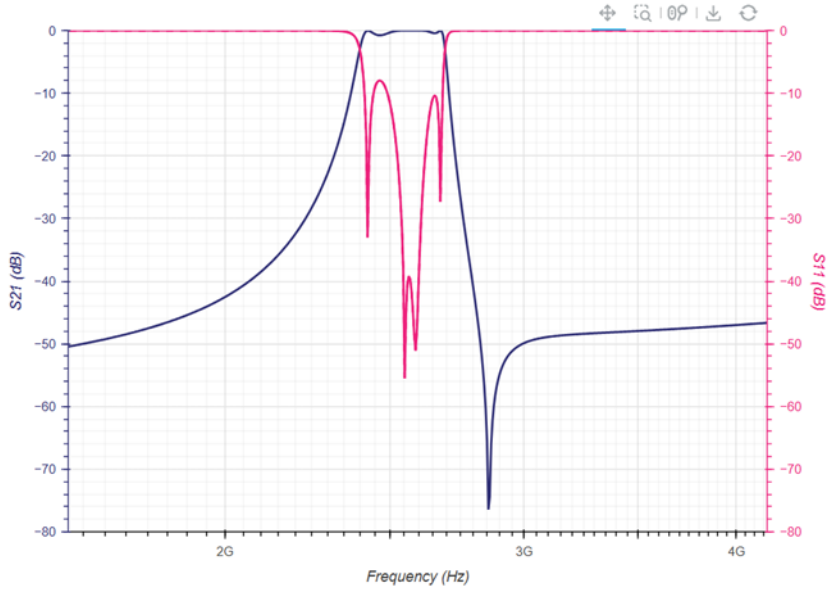
Impedancia de entrada/salida: 50 Ω

Material: Rogers RO4003C (material de bajo factor de perdida)

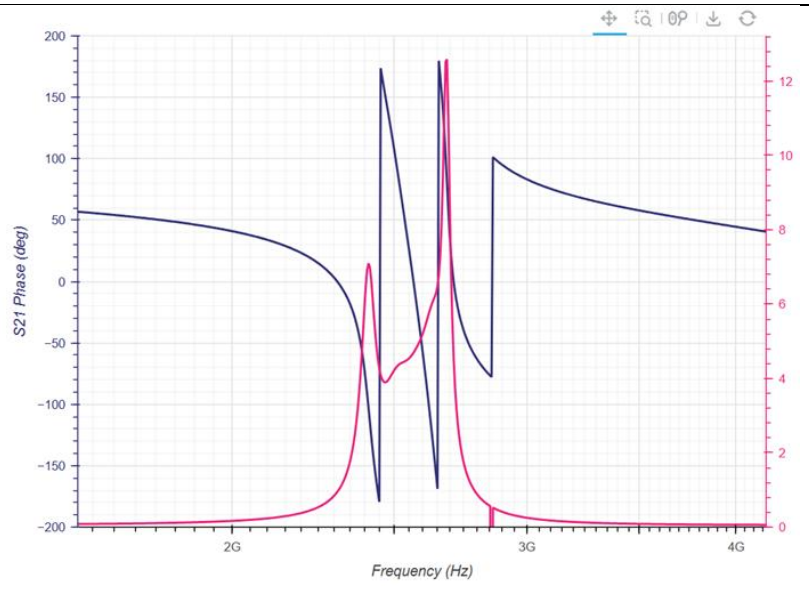
Constante dieléctrica del substrato: 3.55

Espesor del conductor de cobre: 0.035mm

Respuesta de frecuencia del filtro pasabanda



Fase de transmisión y retardo de grupo del filtro



Preguntas

9) ¿Qué tan adecuada considera la selección del filtro pasabanda microstrip Chebyshev de 5to orden construido sobre substrato Rogers RO4003C ($\varepsilon_r \approx 3.55$, h = 1.6 mm) con cobre de 0.035 mm, respecto a rendimiento, costo y facilidad de fabricación?

☐ Totalmente Inadecuada ☐ Inadecuada ☐ Parcialmente Adecuada

☐ Adecuada ☐ Totalmente Adecuada/Excelente

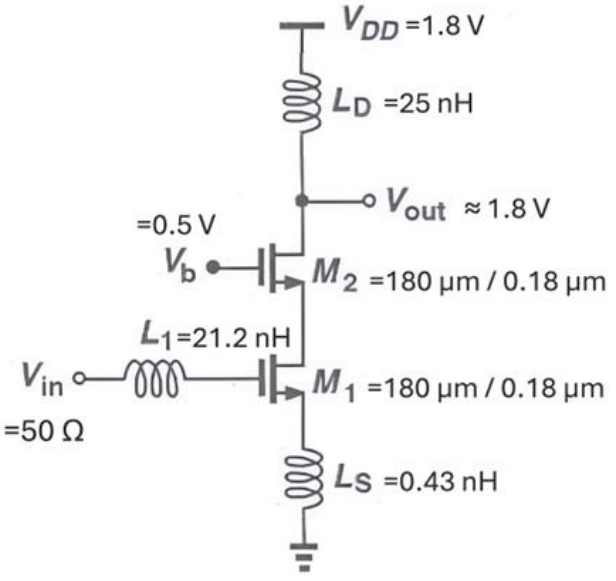
10) A la luz de la curva de S-parámetros, ¿el filtro permite el paso limpio de la portadora LTE a 2.6 GHz ($S_{21} \approx 0$ dB dentro de 2.47–2.73 GHz) y rechaza eficazmente las señales fuera de banda?

☐ Totalmente Incorrecto ☐ Incorrecto ☐ Parcialmente Correcto

☐ Correcto ☒ Totalmente Correcto/Excelente

Tabla 17

Encuesta de validación de adaptación del filtro LNA CMOS a 2.6GHz

Componente #3 Amplificador pasabanda microstrip	**Notas.**
Diseño del amplificador de bajo ruido LNA CMOS  **Especificaciones** M_1(principal) W/L = 180 µm / 0.18 µm M_2(espejo de corriente) W/L = 180 µm / 0.18 µm Frecuencia de operación: 2.6GHz Tecnología: CMOS de 0.18 µm Topología: LNA con degeneración inductiva	La simulación del amplificador LNA CMOS no se llevó a cabo debido a la imposibilidad de obtener una licencia activa del software Cadence Virtuoso, herramienta especializada necesaria para realizar simulaciones precisas en tecnología CMOS. Por esta razón, el presente trabajo se limita al diseño analítico y dimensionamiento teórico del circuito, posponiendo la validación numérica hasta que se disponga del entorno de simulación adecuado o se opte por una alternativa compatible. El diseño del amplificador LNA CMOS presentado en este apartado se basa en la topología del libro *RF Microelectronics* de Behzad Razavi. Esta referencia fue seleccionada por su enfoque académico riguroso y por presentar un diseño probado de LNA con degeneración inductiva, ampliamente utilizado en aplicaciones de alta frecuencia. Además, el texto proporciona las fórmulas analíticas

Impedancia de entrada (V_{in}): 50 Ω (adaptada del filtro previo)

Transconductancia (g_m): 20mS (0.02S)

Capacitancia de M_1 (C_{gs}): 173 fF

Corriente de drenaje (I_D): 1 mA

Voltaje de alimentación (V_{DD}): 1.8 V

Voltaje de polarización (V_b): 0.5 V (para polarizar M_2 en saturación)

Nodo de salida V_{out}: 1.8 V en DC, salida de señal en AC

necesarias para el cálculo preciso de los componentes, lo cual permitió adaptar el circuito a la frecuencia objetivo de 2.6 GHz manteniendo las características deseadas de bajo ruido y buena adaptación de impedancia.

Formulas utilizadas

1. Condición de adaptación de impedancia de entrada
2. Cálculo del inductor de degeneración
3. Condición de resonancia del circuito de entrada
4. Cálculo del inductor de puerta
5. Cálculo de la transconductancia del transistor
6. Cálculo de la relación geométrica W/L
7. Ecuación del espejo de corriente
8. Cálculo del voltaje de polarización V_b
9. Fórmula de resonancia del inductor de carga

Preguntas

11) ¿Considera que la elección del LNA CMOS con degeneración inductiva es adecuada para una operación eficiente a 2.6 GHz?

☐ Totalmente Inadecuada ☐ Inadecuada ☐ Parcialmente Adecuada

☐ Adecuada ☐ Totalmente Adecuada/Excelente

12) ¿Los cálculos realizados para cada componente del circuito (transistores, inductores y voltajes) le parecen correctos y bien justificados?

☐ Totalmente Incorrectos ☐ Incorrectos ☐ Parcialmente correctos

☐ Correctos ☐ Totalmente correctos/Excelente justificación

13) ¿El uso del modelo de transconductancia y resonancia resulta apropiado para garantizar la adaptación de impedancia a 50 Ω?

☐ Totalmente Inapropiado ☐ Inapropiado ☐ Parcialmente apropiado

☐ Apropiado ☐ Totalmente apropiado/Excelente elección

14) ¿Cree que el diagrama esquemático del circuito es claro y refleja correctamente los resultados obtenidos en los cálculos?

☐ Totalmente confuso/Incorrecto ☐ Confuso ☐ Parcialmente claro

☐ Claro ☐ Totalmente claro/Excelente representación

15) ¿El nivel de detalle técnico (fórmulas, parámetros y resultados) incluido en el diseño del LNA es el adecuado para un proyecto de este tipo?

☐ Totalmente Inadecuado ☐ Inadecuado ☐ Parcialmente Adecuado

☐ Adecuado ☐ Totalmente Adecuado/Excelente

16) ¿Le resulta claro cómo se logró la adaptación entre el filtro pasabanda microstrip y el LNA?

☐ Totalmente confuso/No se entiende ☐ Confuso ☐ Parcialmente claro

☐ Claro ☐ Totalmente claro/integración excelente

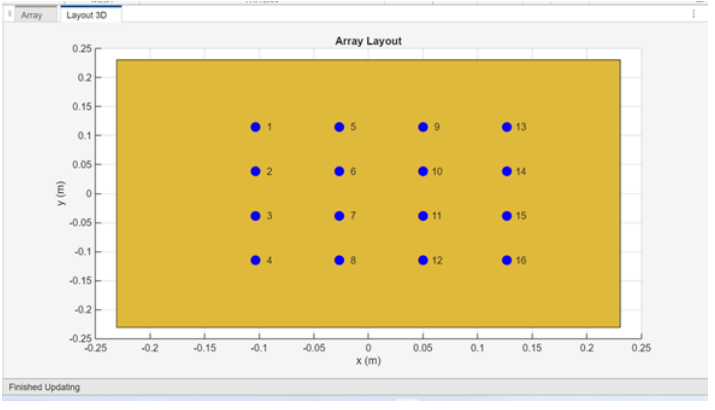
17) ¿Considera que fue apropiado seleccionar el libro *RF Microelectronics* de Behzad Razavi como base para el diseño del amplificador LNA CMOS?

☐ Totalmente Inapropiado ☐ Inapropiado ☐ Parcialmente apropiado

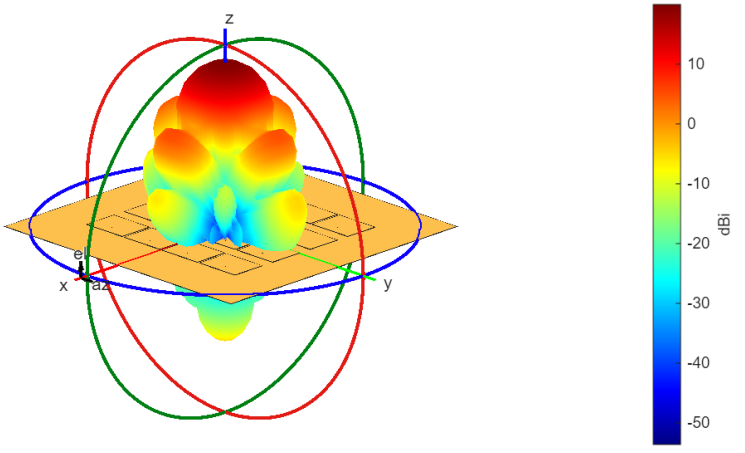
☐ Apropiado ☐ Totalmente apropiado/Excelente elección

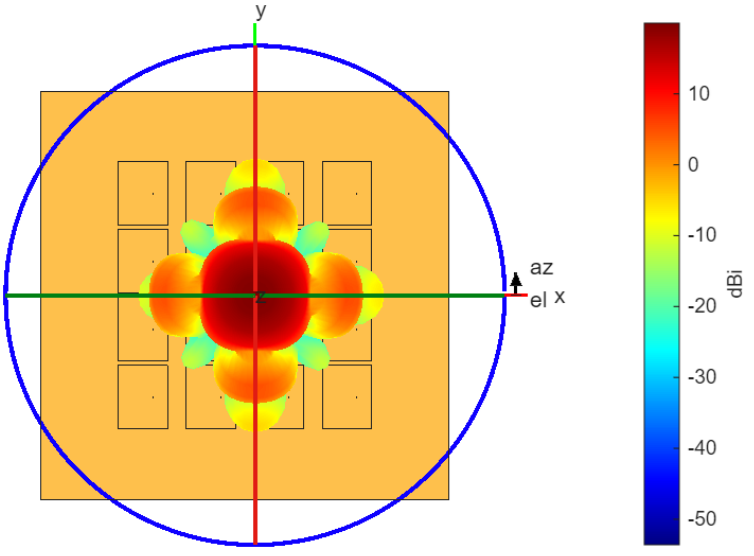
Tabla 18

Encuesta de validación del diseño de antenas sectoriales con tecnología MIMO adaptadas para Beamforming

Componente final #4 Antena MIMO	**Notas.**
Diseño de antenas sectoriales con tecnología MIMO adaptadas para Beamforming **Configuración MIMO 4x4** 	El desarrollo del sistema de antenas sectoriales se limitó al diseño de la configuración MIMO 4×4 y a la simulación de su patrón de radiación tridimensional. Esta decisión se debió a restricciones técnicas del software utilizado, ya que al intentar realizar simulaciones más avanzadas o incluir configuraciones adicionales, el programa presentó errores de

Patrones de radiación obtenido





memoria insuficiente ("Out of memory"), lo cual impidió continuar con cálculos posteriores. No obstante, el análisis realizado sobre la configuración 4×4 permite validar adecuadamente su comportamiento y eficiencia para los fines del proyecto.

Especificaciones

Tipo de antena**:** Microstrip patch (parche rectangular)

Frecuencia de operación: 2.6 GHz (banda LTE)

Número de elementos: 16 elementos (configuración 4×4)

Tipo de arreglo: Matriz rectangular uniforme

Tecnología utilizada: MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Separación entre elementos: $0.5\lambda \approx 57.7$ mm

Substrato**:** Rogers RO4003C

Constante dieléctrica del substrato (ε_r): 3.55

Espesor del substrato (h): 1.6 mm

Resultados

Ganancia máxima obtenida (simulación): ≈ 20 dBi

Preguntas

18) ¿Considera adecuada la elección de un arreglo MIMO 4×4 para lograr una cobertura eficiente en el sistema de retransmisión propuesto?

☐ Totalmente Inadecuada ☐ Inadecuada ☐ Parcialmente Adecuada

☐ Adecuada ☐ Totalmente Adecuada/Excelente

19) ¿Cree que el uso de antenas de parche microstrip es apropiado para este tipo de aplicación en sistema de arrays?

☐ Totalmente Inapropiado ☐ Inapropiado ☐ Parcialmente apropiado

☐ Apropiado ☐ Totalmente apropiado/Excelente elección

20) ¿La selección del substrato Rogers RO4003C ($\varepsilon_r = 3.55$, h = 1.6 mm) le parece técnica y económicamente viable para el contexto nacional?

☐ Totalmente Inviable ☐ Inviable ☐ Parcialmente viable

☐ Viable ☐ Totalmente viable/Excelente elección

21) ¿Considera que la ganancia de 20 dBi obtenida en la simulación es suficiente para garantizar una retransmisión efectiva de la señal LTE en la zona objetivo?

☐ Totalmente Insuficiente ☐ Insuficiente ☐ Parcialmente suficiente

☐ Suficiente ☐ Mas que suficiente/Excelente

22) ¿Está de acuerdo en que la configuración MIMO mejora la confiabilidad del sistema al permitir que, si un lóbulo de señal falla, otros puedan mantener la cobertura?

☐ Totalmente en desacuerdo ☐ En desacuerdo ☐ Parcialmente de acuerdo

☐ De acuerdo ☐ Totalmente de acuerdo /Excelente planteamiento

23) ¿Cree que el uso de tecnología MIMO en aplicaciones rurales representa una solución moderna y alcanzable dentro del contexto tecnológico actual de Nicaragua?

☐ Totalmente Inapropiado/Inalcanzable ☐ Inapropiado/Difícilmente viable ☐ Parcialmente apropiado/Viable ☐ Apropiado/Viable ☐ Totalmente apropiado/Excelente y alcanzable

Preguntas abiertas finales Sobre el diseño global e implementación

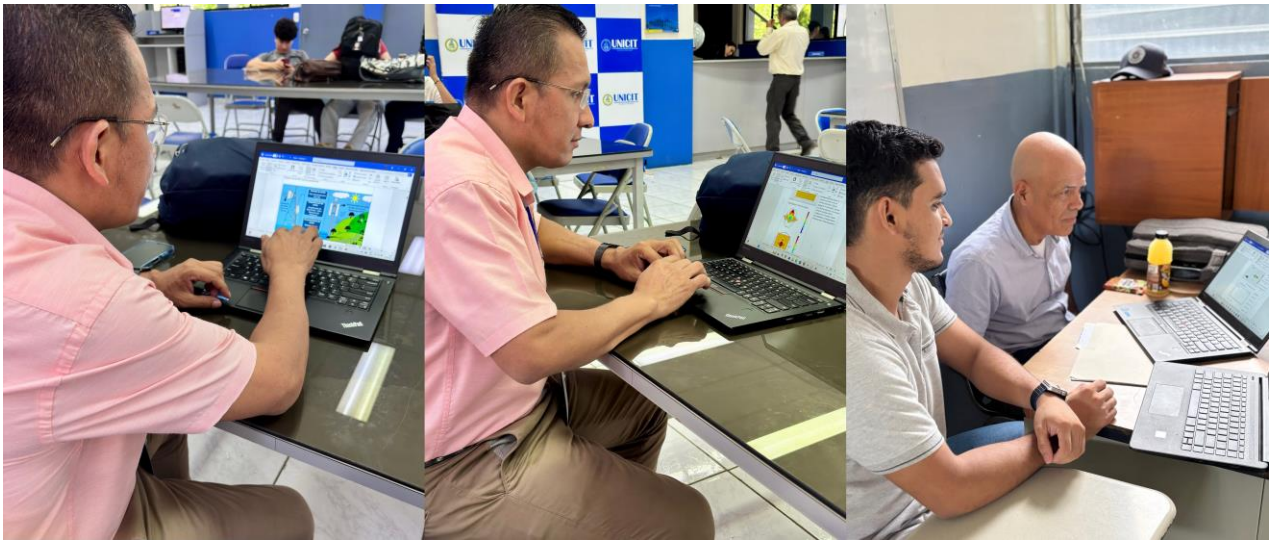
24) ¿Le parece clara y coherente la arquitectura general del sistema propuesta?
25) ¿Considera moderna y aplicable esta tecnología en contextos rurales como Nicaragua?
26) ¿Qué recomendaciones daría para mejorar o validar aún más este diseño antes de su implementación real?

Muchas gracias por su tiempo estimados profesores, agradecemos su experiencia y sobre todo su amabilidad con mi persona.

Anexo I, Aplicación de encuestas de validación de diseño propuesto a expertos

Figura 82

Aplicación de la encuesta a expertos en telecomunicaciones



Nota. La imagen muestra el proceso de validación técnica del diseño mediante la aplicación de encuestas a expertos en telecomunicaciones. En las dos fotografías de la izquierda, se observa al Ing. Fausto Leonidas Palacio Amador durante su evaluación del sistema propuesto, mientras revisa detenidamente los apartados técnicos del documento. En la fotografía de la derecha, se aprecia al Dr. Ing. Jorge Luis Palacios Linarte en una sesión de retroalimentación directa, en la que se discutieron aspectos clave del diseño y posibles recomendaciones. Esta fase fue fundamental para fortalecer la viabilidad académica y técnica del proyecto antes de su implementación. **Fuente:** Elaboración propia.