



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACSISTEL

INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**Implementación de un amplificador para señales LTE en la
banda UHF sustentada con energía fotovoltaica.**

**Angie Anahí Gonzabay Muñiz
Mayrin Candy Quiroz Catuto**

**Dirigido por:
Ing. Luis Miguel Amaya, Mgtr.**

La Libertad – 2026



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ing. Ronald Rovira Jurado, Ph. D.
DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Luis Amaya Fariño, Mgtr.
DOCENTE TUTOR

Ing. Daniel Jaramillo Chamba, Mgtr.
DOCENTE ESPECIALISTA

Ing. Corina Gonzabay de la A, Mgtr.
SECRETARIA



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y la estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por la cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por **Gonzabay Muñiz Angie Anahí** y **Quiroz Catuto Mayrín Candy**, como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero en telecomunicaciones.

La Libertad, a los 04 días del mes de agosto del año 2026

TUTOR

Ing. Amaya Fariño Luis Miguel, Mgtr.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotras, **Gonzabay Muñiz Angie Anahí y Quiroz Catuto Mayrín Candy**

DECLARAMOS QUE:

El trabajo de titulación, **Implementación de un amplificador para señales LTE en la banda UHF sustentada con energía fotovoltaica**, previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado respetando los derechos intelectuales de terceros, conforme a las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. En consecuencia, este trabajo es de nuestra total autoría. En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los 04 días del mes de agosto del año 2026

Gonzabay Muñiz Angie Anahí

Quiroz Catuto Mayrín Candy



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado **Implementación de un amplificador para señales LTE en la banda UHF sustentada con energía fotovoltaica**, presentado por las estudiantes, **Gonzabay Muñoz Angie Anahí y Quiroz Catuto Mayrín Candy**, fue enviado al Sistema Antiplagio, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 9%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



Certificado de análisis
Compilatio Magister® | UPSE-ECU

Trabajo_de_Integración_Curricular_Gonzabay_Quiroz_
ID : 2dcfe60a35bff41ae1f25f44b3467c57e082c0a7



9%

Textos sospechosos

Nombre del fichero :
Trabajo_de_Integración_Curricular_Gonzabay_Quiroz_.txt
Tamaño del archivo original : 20,12 MB
Número de palabras : 32.271

Depositante : AMAYA FARIÑO LUIS MIGUEL
Fecha de depósito : 20 de agosto de 2026
Tipo de carga : Interface
Fecha de fin de análisis : 20 de agosto de 2026

TUTOR


Ing. Amaya Fariño Luis Miguel, Mgtr.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

Nosotras, Gonzabay Muñoz Angie Anahí y Quiroz Catuto Mayrín Candy

Autorizamos a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación, o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedemos los derechos en línea patrimoniales del artículo profesional de alto nivel con fines de difusión pública, además, aprobamos la reproducción de este artículo académico dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando nuestros derechos de autor.

Santa Elena, a los 04 días del mes de agosto del año 2026

Gonzabay Muñoz Angie Anahí

Quiroz Catuto Mayrín Candy

AGRADECIMIENTO

Quiero dar gracias a cada una de las personas que han formado parte de este camino tan bonito y que me han brindado su apoyo constante.

En primer lugar, a Dios por darme la fortaleza y sabiduría para seguir adelante, por no dejarme desvanecer en los momentos más difíciles y permitirme culminar con éxito esta etapa de mi vida.

A mi madre, Yomaira Muñiz, mi mejor amiga, por enseñarme a seguir adelante a pesar de las dificultades, por transmitirme el valor de la perseverancia y enseñarme a no rendirme jamás. Gracias por estar presente en cada paso importante de mi vida.

A mi padre, Fernando Gonzabay, por brindarme siempre su cobijo y sus palabras de aliento diario. Le agradezco por estar siempre presente y predispuesto a apoyarme; porque cuando no sabía cómo hacer algo, ahí estaba él para guiarme y enseñarme.

A mi familia, por ser mi refugio constante. Gracias a ellos estoy donde estoy, pues siempre me han brindado su apoyo y han sido un pilar fundamental, enseñándome que las metas exigen esfuerzo, constancia y sacrificio, pero que al final cada logro vale la pena.

A los amigos que conocí a lo largo de la carrera y a aquel grupo que desde el principio se mantuvo unido (JJEMAS), donde siempre reinó el apoyo, los aprendizajes, las enseñanzas, los chistes y el crecimiento compartido. Verlos hoy culminar esta etapa académica me llena de una satisfacción enorme. Gracias por todo lo construido: por las experiencias vividas, por las frustraciones superadas y por compartir tanto los buenos como los malos momentos. Gracias por cada viaje, por las risas interminables y por convertir esta etapa universitaria en una travesía maravillosa que recordaré siempre.

A mi grupo “Los estudiosos”, mi más sincero agradecimiento a ustedes, que supieron ser excelentes amigos. Gracias por cada chiste agrio, por las vivencias compartidas. Fuimos aquellos que, desde antes de iniciar las clases presenciales, empezamos con un saco lleno de metas y terminamos divirtiéndonos al máximo en toda esta travesía.

Al Ing. Luis Amaya y al Ing. Daniel Jaramillo, por su dedicación, paciencia y valioso apoyo durante todo el desarrollo de este trabajo. Gracias por brindarnos la orientación necesaria y ser excelentes docentes guías; su compromiso y sabiduría, tutorías e indicaciones fueron clave para sacar adelante este trabajo.

A cada docente por sus consejos, recomendaciones y deseos de superación. Gracias por haber sido parte fundamental de mi proceso de formación.

Y, finalmente, expreso mi sincero agradecimiento a cada persona que cruzó su camino con el mío durante esta etapa universitaria. A quienes me acompañaron de cerca y a

todos aquellos que, de una u otra forma, aportaron a mi crecimiento. A quienes me demostraron que siempre se puede salir adelante, tanto a las personas que permanecen a mi lado como a quienes hoy están distantes. Gracias a cada uno por su compañía, por las enseñanzas dejadas y por haber sumado en este camino.

Cierro esta etapa recordando que, como bien se dice: “Al final somos una mezcla de todas las personas que han formado parte de nuestro camino”. A cada una de ellas, mi eterna gratitud por ayudarme a construir la persona que soy hoy.

GONZABAY MUÑOZ ANGIE ANAHÍ

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a cada una de las personas que me han acompañado y me han brindado su apoyo para culminar esta etapa.

A Lucía Manuela Catuto Tomalá, mi madre, por ser una mujer fuerte, trabajadora, por inspirarme, impulsarme y apoyarme incondicionalmente en este proceso; no tengo ninguna duda de que tengo a la mejor mamá del mundo.

A Isidro Colón Quiroz Chilán, mi papá, por cada consejo, por impulsarme a cumplir mis metas, por consentirme; eres parte fundamental de que me guste la ingeniería, gracias por enseñarme a usar herramientas y quitarme el miedo, aunque siempre te termino pidiendo ayuda.

A mis amigos Dilay, Thalía, Williams, Misael y Angie, gracias por ser mi escape de la rutina estudiantil, cada uno ha estado en diferentes etapas de mi vida: Dila desde pequeña, Thalía y Williams desde la escuela y el colegio, y Angie y Misa desde la u, sin embargo, hay algo que tienen en común, siempre están para mí, han pasado años y estoy agradecida de aún tenerlos en mi vida, de poder contar con cada uno de ustedes incondicionalmente. Nos esperan muchos más logros tanto para mí como para ustedes.

A mis colegas y amigos de la universidad, gracias por cada chiste malo que contaban y que nos sacaba una sonrisa en hora de clase o fuera de ella, gracias por cada reunión fuera de la U para olvidarnos un poco de la rutina, por cada partido de fútbol, por cada parrillada, por cada viaje fuera de la provincia, fueron y serán momentos inolvidables que siempre estarán en mi corazón, gracias a JJEMAS por enseñarme, aunque a veces no con tanta paciencia cuando no entendía algún tema. Estoy muy agradecida de haber culminado todo este proceso con personas como ustedes. Sé que a cada uno de ustedes le irá excelente como ingenieros.

A los ingenieros que me han acompañado a lo largo de este proceso, especialmente al Ing. Daniel Jaramillo, Ing. Fernando Chamba, Ing. Luis Amaya, Ing. Mónica Jaramillo, Ing. Edison Coral e Ing. Gregory Ricardo por su apoyo y motivación, por compartir generosamente sus conocimientos, experiencias y consejos. Gracias a cada uno por su paciencia, confianza y orientación, cualidades que han contribuido significativamente a mi formación profesional y a la ingeniera que aspiro a ser.

A los ingenieros de CNT, en especial al equipo del área O&M, por abrirme las puertas durante mis prácticas preprofesionales y permitirme formar parte de su equipo de trabajo. Gracias por brindarme la oportunidad de aprender de su experiencia, involucrarme en las actividades de campo y fortalecer mi interés por el área de las telecomunicaciones. Agradezco especialmente que, incluso después de culminadas mis prácticas, continúen ofreciéndome la oportunidad de seguir aprendiendo junto a ustedes. Su confianza, apoyo y disposición marcaron profundamente mi crecimiento profesional.

Al Ing. Carlos Andrade y la Dra. Gricelda Herrera, mis consejeros no de rama o de capítulo, sino de vida. Gracias por inspirarme a ir más allá de las aulas y demostrarme que la formación de un ingeniero también se construye a través del liderazgo, el servicio y la participación en iniciativas que generan impacto. Gracias por abrirme las puertas al mundo de IEEE y WIE, por creer en mis capacidades e impulsarme a participar en proyectos, becas y nuevas oportunidades, y por brindarme siempre su apoyo y confianza. Su ejemplo, compromiso y vocación por formar profesionales íntegros han marcado profundamente mi crecimiento personal y profesional, convirtiéndose en una fuente constante de inspiración.

A todas aquellas personas que, por diferentes motivos o circunstancias, hoy ya no forman parte de mi vida, pero que en algún momento caminaron junto a mí durante este proceso. Gracias por las enseñanzas, los momentos compartidos y las experiencias que dejaron en mi camino. Cada momento, por breve que haya sido, contribuyó de alguna manera a mi crecimiento personal y profesional; siempre les guardaré gratitud.

Al final somos una mezcla de todas las personas que han sido parte de nuestro camino. Me alegra saber que algunas de ellas son parte esencial de quien soy hoy.

QUIROZ CATUTO MAYRIN CANDY

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación, en primer lugar, a Dios, quien ha sido mi apoyo, mi guía y mi pilar en el transcurso de mi vida y cierre de esta etapa universitaria.

A mis padres, quienes han sido mi apoyo incondicional, por creer en mí incluso en los momentos en que yo misma dudé; por su paciencia infinita, por sus abrazos que reconfortaban en los días más pesados y por no dejarme renunciar cuando el camino se volvía demasiado difícil. Cada uno de sus sacrificios y enseñanzas guía mi vida. Por esa razón, este logro no me pertenece solo a mí, también es de ustedes; es el fruto directo de su entrega y amor.

A mis hermanos Naldo, Ricardo, Sebastián y Dylan, por su presencia, su comprensión en los momentos complejos y por ser siempre un motivo para superarme. A mi hermana Melany, por siempre escucharme y decirme “tú puedes”, impulsándome y creyendo en mí en todo momento.

A mis abuelos, por preocuparse, por brindarme sus palabras, tan reconfortantes como siempre, por sus oraciones y fe inquebrantable hacia mí.

A mi amiga incondicional y compañera de tesis, Mayrin, con quien compartí cada paso de este camino hasta este momento tan importante porque más que una gran amiga, fuiste un pilar y un apoyo incondicional. Por las risas, por cada lágrima compartida, por las desveladas y por la valentía para afrontar juntas cada dificultad. Es extremadamente grato saber que, con el apoyo mutuo que nos brindamos día a día, logramos culminar este trabajo que tanto esfuerzo y entrega nos exigió. Te aprecio muchísimo.

A mi compañero perruno, Coqui, quien estuvo a mi lado en cada noche de desvelo y estudio, por brindarme su amor incondicional y por ser esa compañía silenciosa pero constante que hizo este camino mucho más cálido.

Y a mí misma, por la fortaleza de no rendirme. Porque sin importar lo duro que fuera el camino, siempre encontré la manera de seguir adelante y dar lo mejor de mí. Me demostré que soy capaz de lograr lo que me propongo, y que cada desvelo y cada sacrificio valieron totalmente la pena.

GONZABAY MUÑIZ ANGIE ANAHÍ

DEDICATORIA

Con profundo amor y gratitud, dedico este trabajo a las personas que han sido mi mayor fortaleza e inspiración a lo largo de este camino. Este logro representa el resultado del esfuerzo, la perseverancia y el apoyo incondicional de quienes siempre creyeron en mí.

A Dios por permitirme llegar hasta este punto de mi vida, por mantener a mis padres, hermanos y familia junto a mí.

A mis padres: ellos han sido un pilar fundamental en cada paso de mi vida. Son ellos quienes me han levantado y apoyado, son mi inspiración y motivo cada vez que pienso en rendirme. Estoy totalmente y eternamente agradecida con ellos. Este logro es más suyo que mío.

A Angie, por ser una amiga incondicional y parte fundamental en este logro, gracias por cada palabra de aliento, por los regaños, la paciencia y por estar cuando ni siquiera yo estaba para mí, por acompañarme en los momentos de estrés, de incertidumbre y también en las grandes alegrías de este camino. Agradezco infinitamente a Dios por haberte puesto en mi vida y permitirme compartir este sueño con una excelente persona, amiga y compañera de tesis. Más que culminar un proyecto juntas, me llevo una amistad que valoro profundamente.

A mis hermanos Xavier, Rosita e Isaac, por ser mi impulso y apoyo en este proceso, por ser mi ejemplo a seguir (en varias cositas no), pero cada uno, a su manera, ha dejado enseñanzas valiosas en mi vida y ha contribuido a la persona que soy hoy.

A mis niños, Lunita y Argos, por acompañarme en las noches, por dormir junto a mí, por sacarme siempre una sonrisa con sus juegos, por ser mi alarma en las mañanas y mi paño de lágrimas. Su compañía fue crucial en este proceso y en las últimas semanas.

QUIROZ CATUTO MAYRIN CANDY

RESUMEN

El presente proyecto aborda la problemática de la deficiente cobertura de conectividad móvil LTE en zonas de difícil acceso, agravada por la falta de infraestructura de la red eléctrica comercial. Para solventar este inconveniente, se propone la implementación de un sistema de amplificación de señal LTE operando en la banda UHF (banda 2 y banda 66), cuya sostenibilidad energética se fundamenta en un sistema fotovoltaico autónomo.

El proyecto utiliza un equipo amplificador de señal, el cual integra una antena exterior (donante) para captar la señal procedente de la radiobase, un módulo amplificador (booster) para elevar la potencia del enlace y una antena interior (servidora) para irradiar la cobertura amplificada en la zona de estudio. La metodología comprendió la evaluación en campo de los parámetros de calidad de red (RSRP, RSRQ y SINR), la calibración del equipo para evitar autooscilaciones entre antenas y el dimensionamiento del sistema fotovoltaico para garantizar la alimentación eléctrica continua del dispositivo.

Los resultados confirman una mejora sustancial en la intensidad y estabilidad de la cobertura celular dentro del área delimitada, incrementando la velocidad de transmisión de datos y consolidando una solución autosustentable de bajo impacto ambiental. Se concluye que la implementación de este equipo amplificador alimentado por energía solar representa una alternativa eficiente y técnicamente viable para reducir la brecha digital en sectores desconectados.

Palabras clave: *LTE, banda UHF, booster, antena interior, antena exterior, energía fotovoltaica, cobertura celular.*

ABSTRACT

The present project addresses the problem of inadequate LTE mobile network coverage in hard-to-reach areas, exacerbated by the lack of commercial power grid infrastructure. To overcome this limitation, the implementation of an LTE signal amplification system operating in the UHF band (Band 2 and Band 66) is proposed, with its energy sustainability based on an autonomous photovoltaic power system.

The proposed solution employs a signal amplifier that integrates an outdoor donor antenna to receive the signal transmitted from the base station, a booster module to increase the link power, and an indoor service antenna to distribute the amplified coverage throughout the study area. The methodology included field evaluation of network quality parameters (RSRP, RSRQ, and SINR), equipment calibration to prevent self-oscillation between antennas, and the sizing of the photovoltaic system to ensure a continuous power supply for the device.

The results confirm a substantial improvement in both the strength and stability of cellular coverage within the defined area, increasing data transmission speeds and providing a self-sustaining solution with low environmental impact. It is concluded that the implementation of this solar-powered signal amplification system represents an efficient and technically feasible alternative for reducing the digital divide in underserved areas.

Keywords: LTE, UHF band, booster, indoor antenna, outdoor donor antenna, photovoltaic energy, cellular coverage.

ÍNDICE GENERAL

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	III
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	IV
AUTORIZACIÓN	V
AGRADECIMIENTO	VI
DEDICATORIA	X
RESUMEN	XII
ABSTRACT.....	XIII
ÍNDICE GENERAL	XIV
ÍNDICE DE TABLAS	XX
ÍNDICE DE FIGURAS	XXIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: ASPECTOS GENERALES Y CONTEXTUALIZACIÓN DE LA	
PROPUESTA	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Descripción del proyecto.	6
1.3. Objetivos	9

1.3.1. Objetivo general.....	9
1.3.2. Objetivos específicos	10
1.4. Justificación	10
1.5. Alcance del proyecto.....	13
1.6. Metodología	14
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	16
2.1. Tecnología LTE y espectro UHF en Ecuador	16
2.1.1. Espectro UHF (Ultra High Frequency)	17
2.2. Propagación de la señal electromagnética	18
2.2.1. Principios generales de propagación del espectro radioeléctrico.....	18
2.2.2. Clasificación de bandas de frecuencia	19
2.2.3. Modos de propagación: LOS y NLOS.....	24
2.2.4. Zonas de Fresnel y obstrucciones	33
2.3. Factores limitantes de la señal	35
2.3.1. Pérdida por trayectoria.....	36

2.3.2.	Interferencia: CCI y ACI.....	37
2.3.3.	Interferencia causada por objetos físicos	39
2.3.4.	Tabla comparativa entre canales	40
2.3.5.	Desvanecimiento y dispersión.	41
2.3.6.	Absorción atmosférica y efectos climáticos.....	44
2.4.	Métricas de calidad de señal LTE	45
2.4.1.	RSSI, RSRP, RSRQ y SNR	45
2.4.2.	Modelos de propagación	49
2.4.3.	Herramientas de medición	53
2.5.	Componentes para mitigar los problemas de propagación	55
2.5.1.	Antenas direccionales tipo Yagi	55
2.5.2.	Antenas panel LTE con soporte MIMO.....	56
2.5.3.	Amplificadores de señal LTE	57
2.5.4.	Amplificador de bajo ruido (LNA)	57
2.5.5.	Amplificador monobanda	58

2.5.6. Amplificador triple banda	59
2.6. Sistemas fotovoltaicos para telecomunicaciones	61
2.6.1. Evaluación técnica de tecnologías renovables	61
2.6.2. Dimensionamiento energético: cálculo de consumo y autonomía	63
2.6.3. Selección de paneles solares	67
2.7. Integración técnica: Presupuesto de enlace y estabilidad de señal	75
2.7.1. Presupuesto de enlace	75
2.7.2. Ganancia de antenas dBi	76
2.7.3. Potencia de transmisión y recepción	77
CAPÍTULO 3: DISEÑO Y METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN	79
3.1. Caracterización del sitio de prueba	79
3.1.1. Operadoras móviles.....	82
3.1.2. Mediciones de señal base	84
3.2. Selección final de componentes.....	88
3.2.1. Infraestructura existente del sistema autónomo	89

3.2.2.	Especificaciones del sistema fotovoltaico.....	89
3.2.3.	Criterios técnicos para la incorporación del amplificador LTE	94
3.2.4.	Diagrama de bloques del sistema integrado.....	96
3.3.	Análisis de comportamiento energético	97
3.4.	Diseño del sistema de alimentación.....	98
3.4.1.	Cálculo de consumo diario del amplificador y periféricos	99
3.4.2.	Dimensionamiento del panel solar y banco de baterías	101
3.4.3.	Modelado 3D de estructura modificada	105
3.4.4.	Esquema de conexiones	107
3.4.5.	Implementación de la estructura modificada	109
3.5.	Metodología de medición.....	112
3.6.	Análisis experimental del sistema.....	113
3.6.1.	Simulación (Atoll).....	113
3.6.2.	Equipo de conectividad implementado	120
3.6.3.	Descripción técnica del equipo y bandas de trabajo	121

CAPÍTULO 4: RESULTADOS	124
4.1. Configuración de parámetros y calibración del booster RF.....	124
4.1.1. Configuración de las bandas de operación.....	124
4.1.2. Configuración de las antenas	125
4.2. Resultados de la implementación del sistema.....	127
4.3. Zona de instalación	130
4.4. Comparativa entre la simulación teórica en Atoll y los datos experimentales	
133	
4.4.1. Análisis de error absoluto y grado de concordancia	135
4.5. Evaluación del desempeño energético del sistema	136
4.5.1. Comportamiento diario del sistema	137
4.5.2. Consumo energético de equipos conectados.....	138
4.6. Validación del diseño mediante comparación con resultados de campo ..	139
CONCLUSIONES	141
RECOMENDACIONES	143
REFERENCIAS	145
ANEXOS	152

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Bandas de frecuencias.....	20
Tabla 2. Bandas y frecuencias de servicios móviles en Ecuador.....	22
Tabla 3. Materiales y su nivel de interferencia en las señales	40
Tabla 4. Comparativa de interferencia co-canal y adyacente	41
Tabla 5. Medida, rango y rendimiento de los parámetros de una señal.....	48
Tabla 6. Características de antenas Yagi	56
Tabla 7. Características del panel LTE con soporte MIMO	57
Tabla 8. Características de amplificadores LTE	57
Tabla 9. Características del amplificador de bajo ruido	58
Tabla 10. Características del amplificador monobanda.....	58
Tabla 11. Características del amplificador triple banda.....	59
Tabla 12. Comparativa de tipos de amplificadores.....	60
Tabla 13. Comparativa de la energía fotovoltaica frente a otras energías renovables.....	62
Tabla 14. Comparativa de la energía renovable frente a la energía tradicional.....	68
Tabla 15. Características técnicas de las placas fotovoltaicas monocristalinas.....	69
Tabla 16. Características técnicas de las placas fotovoltaicas policristalinas.....	71

Tabla 17. Características técnicas de las placas fotovoltaicas de capa fina	72
Tabla 18. Placas fotovoltaicas frente a placas térmicas	73
Tabla 19. Irradiación solar promedio diaria para cada mes (2020-2025)	81
Tabla 20. Distribución de bandas de frecuencia por operador móvil	83
Tabla 21. Comparativa de las operadoras en zonas donde la cobertura es inestable	84
Tabla 22. Clasificación de niveles de cobertura móvil Claro	85
Tabla 23. Clasificación de niveles de cobertura móvil Tuenti.....	86
Tabla 24. Clasificación de niveles de cobertura móvil CNT	88
Tabla 25. Variables técnicas del panel.....	90
Tabla 26. Variables técnicas del inversor	91
Tabla 27. Variables técnicas de la batería.....	92
Tabla 28. Variables técnicas del protector de voltaje	93
Tabla 29. Comparativa de escenarios de diseño	104
Tabla 30. Condición de cobertura de las operadoras móviles	119
Tabla 31. Especificaciones de bandas y rangos de ajuste del amplificador.....	122
Tabla 32. Parámetros para la configuración de la antena	126
Tabla 33. Niveles de señal	129
Tabla 34. Puntos estratégicos de medición y resultados generales obtenidos	129

Tabla 35. Análisis de los niveles de señal del sistema con y sin amplificador	131
Tabla 36. Análisis del rendimiento del sistema con y sin amplificador	132
Tabla 37. Comparativa teórica vs datos reales.....	133
Tabla 38. Comportamiento diario del sistema fotovoltaico.....	137
Tabla 39. Consumo de los equipos conectados al sistema.....	139
Tabla 40. Comparación de diseño teórico vs resultados.....	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diseño del Amplificador	9
Figura 2. Espectro electromagnético.....	20
Figura 3. Canalización y asignación de bandas de frecuencia SMA	23
Figura 4. Horizonte radioeléctrico	25
Figura 5. Efecto de la troposfera sobre las ondas radioeléctricas y el horizonte de radio	26
Figura 6. Modelo de $k = 43$ del radio terrestre.....	26
Figura 7. Frente de onda y rayos.....	31
Figura 8. Tipos de difracción a) por filo de cuchillo b) por la curvatura de la superficie terrestre	31
Figura 9. Absorción atmosférica de las ondas electromagnéticas	32
Figura 10. Representación de la primera zona de Fresnel	34
Figura 11. Elipsoide de Fresnel para un radioenlace	35
Figura 12. Aplicación G-NetTrack Lite.....	53
Figura 13. Menú de visualización cartográfica para métricas de calidad de señal (RSRP, RSRQ y SNR)	54
Figura 14. Antena direccional Yagi	56
Figura 15. Panel monocristalino	69
Figura 16. Panel policristalino	71

Figura 17. Panel de capa fina.....	72
Figura 18. Lugar de estudio dentro del campus UPSE	80
Figura 19. Mapa de cobertura y niveles de potencia de la señal LTE (Claro).....	85
Figura 20. Mapa de cobertura y niveles de potencia de la señal LTE (Tuenti)	86
Figura 21. Mapa de cobertura y niveles de potencia de la señal LTE (CNT).....	87
Figura 22. Panel solar	90
Figura 23. Batería 12 V 55 Ah.....	92
Figura 24. Protector de voltaje.....	93
Figura 25. Antena Wavlink AC600	94
Figura 26. Amplificador ANNTLENT AN-CPL70APLUS	95
Figura 27. Diagrama de bloques del prototipo.....	96
Figura 28. Modelado 3D	106
Figura 29. Esquema de conexiones requerido para el prototipo	108
Figura 30. Esquema multifilar del sistema fotovoltaico	109
Figura 31. Estructura modificada para el uso del amplificador de cobertura celular alimentado por energía solar	110
Figura 32. Conexiones del sistema y equipos periféricos.....	111
Figura 33. Puntos estratégicos de medición.....	112
Figura 34. Parámetros de configuración de las radiobases	115

Figura 35. Configuración de celdas para cada operadora móvil.....	115
Figura 36. Modelo de propagación en el software Atoll	117
Figura 37. Cobertura por nivel de señal (Coverage by Signal Level)	117
Figura 38. Cobertura móvil de las operadoras LTE.....	118
Figura 39. Cobertura Tuenti, CNT y Claro.....	118
Figura 40. Área de cobertura del amplificador (antena interior)	120
Figura 41. Amplificador de señal (booster)	122
Figura 42. Configuración de perillas activas según la banda utilizada.....	125
Figura 43. Vista del amplificador integrado en la estructura modificada.....	126
Figura 44. Medición en los puntos estratégicos sin amplificar.....	128
Figura 45. Medición en los puntos estratégicos con amplificación	128
Figura 46. Punto estratégico elegido para el montaje definitivo por su óptimo nivel de señal ..	130
Figura 47. Entorno de simulación de la antena interior	134

INTRODUCCIÓN

La evolución de las redes móviles hacia estándares de alta velocidad exige soluciones de infraestructura que sean tanto técnicamente eficientes como energéticamente sostenibles. En la actualidad, la escasa cobertura móvil en zonas rurales y de difícil acceso es un problema crítico, ya que la infraestructura limitada de telecomunicaciones y la falta de acceso a la red eléctrica dificultan la prestación de servicios de comunicación y mantienen una brecha digital persistente. Esta problemática pone en evidencia la necesidad de desarrollar alternativas tecnológicas que permitan mejorar la cobertura móvil haciendo uso de fuentes de energía renovable.

La presente investigación plantea implementar un prototipo de sistema de amplificación de cobertura LTE alimentado con energía fotovoltaica en un ambiente controlado, específicamente en los laboratorios de la carrera de Telecomunicaciones de la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE). En este entorno, la implementación permite validar el desempeño del sistema mediante mediciones experimentales, evaluando tanto los parámetros de la señal LTE como el comportamiento energético del sistema fotovoltaico bajo condiciones controladas.

Con la finalidad de analizar las señales amplificadas, se hará uso de herramientas de análisis de radiofrecuencia para evaluar la calidad de la señal y otros factores esenciales, con el objetivo de valorar el desempeño del amplificador bajo diferentes circunstancias, lo que además permite determinar la eficacia del sistema, la existencia de interferencias y la potencia de la señal amplificada. Para abordar estos desafíos, se optó por el uso de energía solar como fuente de alimentación del amplificador. La energía solar es una alternativa autosustentable que permite

operar el sistema sin depender de la red eléctrica convencional, lo que es crucial en zonas donde el acceso a la electricidad es limitado.

De esta manera, el proyecto no solo busca resolver un problema de conectividad técnica dentro del campus, sino que lo hace bajo un modelo de sostenibilidad ambiental, eliminando la dependencia de la red eléctrica convencional y reduciendo los costos operativos de mantenimiento en zonas remotas.

CAPÍTULO 1: ASPECTOS GENERALES Y CONTEXTUALIZACIÓN DE LA PROPUESTA

1.1. Planteamiento del problema

La falta de conectividad genera un impacto social profundo y multifacético, ya que impide el acceso equitativo a derechos fundamentales como la educación, el trabajo, la salud, la información y la participación ciudadana. En la actualidad, la conectividad digital no solo constituye una herramienta tecnológica, sino que es un componente esencial del desarrollo humano. Su ausencia perpetúa la exclusión social y limita las posibilidades de progreso para millones de personas, especialmente aquellas que habitan en zonas rurales, aisladas, o en situación de vulnerabilidad.

Raúl Katz, consultor internacional y experto en telecomunicaciones, señala que, si bien Ecuador ha avanzado en conectividad, aún enfrenta una marcada brecha entre las zonas urbanas y rurales. Actualmente, el 88 % de la población tiene acceso a tecnología 4G y la conectividad de banda ancha fija alcanza el 52 %, ubicando al país en una posición intermedia en América Latina. Sin embargo, la cobertura en áreas rurales sigue siendo baja, con una adopción del 20 % frente al 70 % en zonas urbanas. (Katz, 2023)

El experto sostiene que la clave para reducir esta brecha es la inversión en infraestructura, particularmente mediante el uso conjunto de torres entre operadores, permitiendo que varias antenas se instalen en una misma estructura, lo que reduce costos y aumenta la cobertura. En Ecuador, alrededor del 42 % de las torres están gestionadas de esa manera, lo que favorece este modelo (Katz, 2023).

Estos antecedentes dejan en evidencia que, aunque el avance de la tecnología dentro del país es intermedio, existe una clara diferencia entre las zonas urbanas, donde la cobertura es estable, y las comunidades y sectores rurales, donde la cobertura es limitada o de baja calidad. Esta situación evidencia la necesidad de implementar alternativas que permitan mejorar la conectividad en sectores con deficiencias de cobertura.

Con el objetivo de reducir esta brecha, el Estado ecuatoriano ha implementado iniciativas como los Puntos Digitales Gratuitos, impulsados por el Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL). Estos espacios comunitarios ofrecen acceso a internet, capacitación en herramientas digitales y servicios gubernamentales, beneficiando a miles de ciudadanos en todo el país. (MINTEL, 2022)

No obstante, a pesar de la existencia de más de 900 puntos digitales distribuidos a nivel nacional, estas soluciones no logran cubrir completamente las necesidades de conectividad en zonas rurales debido a limitaciones en infraestructura, calidad de señal y acceso a energía eléctrica. En consecuencia, persiste la necesidad de desarrollar alternativas tecnológicas que permitan mejorar la cobertura de red móvil de manera eficiente, accesible y sostenible.

Galarza Sancan Ronald Alexander, en su trabajo de titulación “Implementación de una antena amplificadora de cobertura de red celular GSM mediante repetidores activos en la comunidad del recinto San José de Villao”, planteó como propósito amplificar la señal celular en una zona con escasa cobertura. Para ello, propuso el uso de un equipo repetidor activo que opera en frecuencias de 850 a 1800 MHz, ubicado estratégicamente en un punto donde no se dispone de acceso al servicio de red móvil. El objetivo principal fue mejorar la intercomunicación entre los

habitantes de la comunidad, facilitando así la conectividad y el acceso a la comunicación móvil (Galarza, 2022).

Por otro lado, Klisman Paúl Cruz Alberca, en su proyecto titulado “Diseño de un sistema distribuido de antenas para mejorar la red móvil en el interior de centros comerciales de Piura”, propuso una red de distribución estratégica de antenas en el interior de centros comerciales, con el fin de mejorar la cobertura del servicio de telefonía móvil en espacios cerrados. El objetivo fue brindar un acceso más eficiente y estable a los usuarios, optimizando la experiencia de conectividad en estos entornos (Alberca, 2019).

De la misma manera, estudios como “Diseño y simulación de una estación de cobertura celular a la población del recinto Cabuyal del cantón Santa Elena” han evidenciado la necesidad de mejorar la conectividad en zonas rurales mediante soluciones tecnológicas adaptadas al entorno. Dicho trabajo aborda problemáticas similares relacionadas con la cobertura móvil limitada, lo cual respalda la pertinencia del presente estudio como alternativa para ampliar y fortalecer la conectividad en sectores con dificultades de infraestructura eléctrica y de red (Herrera & Aguilera, 2022).

En el ámbito energético, diferentes investigaciones han demostrado la factibilidad de utilizar sistemas fotovoltaicos como fuente de alimentación para equipos de telecomunicaciones. El proyecto de Danny Chilibingua presenta un sistema híbrido solar-radiofrecuencia para alimentar terminales 5G, lo que evidencia el potencial de la energía renovable en tecnologías de red móvil (Chilibingua, 2023). Asimismo, Andrés Cabrera desarrolló un sistema de recolección de energía

radioeléctrica en la banda UHF usando antenas tipo PATCH, orientado a la alimentación de dispositivos de bajo consumo (Cabrera & Reino, 2024).

Complementando estas soluciones energéticas, resulta necesario considerar el uso de tecnologías de comunicación móvil, como LTE (Long Term Evolution), que permiten la transmisión de datos a alta velocidad y constituyen una base fundamental para el desarrollo de soluciones orientadas a mejorar la cobertura en zonas con señal deficiente.

1.2. Descripción del proyecto.

La presente investigación tiene como objetivo implementar un sistema de amplificación de señal LTE para mejorar la cobertura celular en zonas donde la señal es limitada; en este contexto, la instalación del equipo se realizó en un ambiente ya estudiado previamente dentro de la universidad. Este sistema incluye un amplificador, una antena logarítmica para la captación de la señal sectorial móvil, una antena tipo panel para la distribución de la señal amplificada y un sistema de energía fotovoltaica para la alimentación e instrumentos de medición para el estudio de la señal.

Dentro del marco del diseño y planificación de la cobertura, se llevó a cabo una simulación en el programa profesional ATOLL. Este software permitió establecer parámetros como el mapa de cobertura antes y después de la instalación, la potencia de la señal en cada lugar del área de cobertura y el estudio de interferencias. Esta herramienta permitió la comparación entre el estado inicial y el final, garantizando que el sistema estuviera adecuadamente dimensionado y dirigido.

El funcionamiento del amplificador LTE consiste en captar la señal débil que proviene de una infraestructura de telecomunicaciones normalmente ubicada en una estación base; esta señal

se amplifica y se retransmite en un área determinada, optimizando la calidad de la cobertura para los usuarios que se encuentran dentro de su rango de cobertura. El equipo está diseñado para funcionar específicamente en la banda de UHF (300 MHz – 3 GHz), la cual es frecuentemente empleada por los operadores locales para servicios LTE.

Para determinar su funcionamiento de manera adecuada, se consideraron las pérdidas de trayectoria (Path Loss) que inciden en la señal desde la torre hasta la antena receptora, empleando el modelo de propagación apropiado de acuerdo con el contexto (como el modelo de Okumura-Hata para ambientes suburbanos).

La fórmula base utilizada para estimar la potencia recibida es el método de presupuesto de enlace (Link Budget) que se presenta a continuación:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L_P - L_C \quad (1)$$

Donde:

P_{RX} = Potencia recibida

P_{TX} = Potencia transmitida dBm

G_{TX} = Ganancia de la antena transmisora dBi

G_{RX} = Ganancia de la antena receptora dBi

L_P = Pérdida de propagación dB

L_C = Pérdida por conectores y cables dB

Para comprobar la falta o insuficiencia de cobertura en el lugar de instalación, se usó la aplicación G-NetTrack. Esta aplicación facilitó la identificación de la potencia de señal en dBm por cada banda de frecuencia y la detección de interferencias. Este análisis permitió elegir adecuadamente la frecuencia de funcionamiento del amplificador y comprobar la eficacia de la mejora después de su instalación.

La selección de la energía solar como fuente de energía se basa en criterios de sostenibilidad y autonomía en las operaciones. El sistema se diseñó para funcionar exclusivamente durante el horario de trabajo de la universidad (mañana y tarde), lo que permite que opere directamente con la energía producida por los paneles solares en tiempo real. Permitiendo que su funcionalidad sea eficaz y duradera.

Se emplearon paneles solares fotovoltaicos policristalinos, con la capacidad necesaria para suministrar energía constante al amplificador, y otros elementos del sistema durante el tiempo necesario. El panel solar se calculó teniendo en cuenta un consumo previsto del amplificador entre 5 W y 10 W, y una duración de funcionamiento diaria de alrededor de 8 horas, incluyendo un margen de seguridad para mitigar posibles fluctuaciones en la radiación solar.

Esto se realizó después de un estudio técnico comparativo entre diferentes tipos de paneles solares, con el objetivo de determinar cuál proporciona el mejor desempeño energético durante las horas de luz solar. En este estudio se tomaron en cuenta elementos como la eficiencia del panel, la irradiancia media del área y la inclinación ideal para optimizar la absorción de luz solar. Considerando el alto grado de irradiación solar en la región costera de Ecuador, teniendo en cuenta el desempeño constante del sistema sin interrupciones durante su horario de operación.

Finalmente, se usaron herramientas para medir la señal captada y amplificada. De esa manera, se contrastaron el antes y el después de la instalación, valorando las mejoras en la potencia obtenida, la calidad de la señal y la estabilidad. Esto permitió confirmar la eficacia del sistema, su sostenibilidad energética y su influencia en la cobertura LTE a nivel local.



Figura 1. Diseño del Amplificador

Fuente: Autores

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Implementar y analizar un prototipo de amplificador de cobertura LTE alimentado por energía fotovoltaica, evaluando su desempeño en un ambiente controlado mediante equipos de telecomunicaciones, con la finalidad de optimizar la cobertura y el consumo energético en zonas de baja accesibilidad a la señal.

1.3.2. Objetivos específicos

- Investigar el estado del arte sobre telecomunicaciones en zonas rurales, analizando las redes LTE y otras tecnologías de acceso.
- Desarrollar una simulación en Atoll basada en un ambiente controlado para validar la implementación del amplificador de señal.
- Estudiar el área destinada dentro de la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE) que presenta cobertura limitada de señal LTE, mediante mediciones y el análisis de los factores ambientales que puedan influir en el desempeño del sistema.
- Medir los parámetros de la señal LTE mediante aplicaciones especializadas, con el fin de verificar el desempeño del sistema de amplificación.
- Comprobar la potencia de propagación del amplificador de señal LTE, optimizando el consumo energético y la cobertura.
- Analizar diferentes fuentes de energía renovable (solar, térmica, eólica, etc.) para determinar cuál es la más eficiente en sistemas autosustentables.
- Optimizar un sistema fotovoltaico sustentable como herramienta de apoyo energético para el amplificador de señal.

1.4. Justificación

El desarrollo de la tecnología móvil ha evolucionado significativamente a nivel mundial, convirtiéndose en un pilar fundamental para la comunicación entre dispositivos mediante señales de ondas electromagnéticas. Sin embargo, la calidad de la señal recibida de un dispositivo móvil depende de varios factores, tales como la distancia entre la antena transmisora y receptora, las

condiciones atmosféricas, la frecuencia utilizada, la potencia de la señal, la radiación de la antena y los obstáculos presentes en el entorno (como edificios o árboles) que pueden generar fenómenos ondulatorios que interactúan mediante la luz, el sonido y las ondas en el entorno.

Como señala (León, 2010), las operadoras celulares enfrentan serias dificultades con los permisos municipales debido al alto impacto visual de las torres, lo que las obliga a recurrir a técnicas de mimetización. A esto se suma que muchas áreas sin cobertura carecen de acceso a la red eléctrica, requiriendo el desarrollo de costosos sistemas de energización. Ante esta problemática, la implementación de amplificadores surge como una solución eficiente tanto en términos visuales como energéticos.

Otro aspecto relevante es el costo-beneficio de este tipo de sistemas. Invertir en infraestructura para extender la cobertura a comunas lejanas no es factible económicamente debido a la baja densidad de población. Esto hace que el costo de implementación y mantenimiento supere los beneficios.

En un lugar abierto, sin ningún tipo de obstáculos, la señal se atenúa a medida que las ondas se propagan. Este comportamiento depende de las condiciones de la señal y puede acentuarse cuando se utilizan frecuencias más altas.

Este efecto se contabiliza por medio del modelo de propagación en el espacio libre, el cual se cuantifica en decibelios y evidencia que la señal pierde más energía mientras viaja a través del aire, incluso sin obstáculos (Quistial, 2016).

La investigación se desarrolló en un medio controlado, debido a que en algunas áreas de la Universidad se ha identificado una cobertura radioeléctrica limitada. Esta condición afecta la comunicación, el acceso y la conectividad de estudiantes, docentes y visitantes. Por ello, la implementación del amplificador busca mejorar la cobertura y la calidad de la señal en estas áreas, permitiendo una comunicación más estable y eficiente. De igual forma, se analizó el comportamiento de la señal mediante parámetros técnicos para evaluar el rendimiento del sistema.

Estos parámetros permitieron asegurar que la señal amplificada sea adecuada para la transmisión de datos y voz, maximizando la eficiencia y minimizando las interrupciones en la comunicación. De esta manera, el proyecto contribuyó a evitar que los usuarios tengan que desplazarse a zonas con mejor cobertura, mejorando la experiencia de los miembros de la comunidad universitaria.

Por otro lado, la creciente preocupación por el impacto ambiental y la sostenibilidad ha impulsado la búsqueda de soluciones energéticas alternativas. En este contexto, el uso de energía fotovoltaica para alimentar estos sistemas de telecomunicaciones se presenta como una opción viable y sostenible. La energía solar no solo reduce la dependencia de fuentes de energía no renovables, sino que también ofrece una solución eficiente para operar amplificadores de señal en zonas remotas o de difícil acceso, donde el suministro eléctrico convencional puede ser costoso o insuficiente.

Dada la viabilidad de este proyecto, se ha logrado establecer que no solo mejoró la cobertura y calidad de la señal en áreas específicas de la UPSE, sino que también contribuyó a la creación de un entorno de comunicación más robusto, accesible y sostenible. A través de la

implementación de tecnologías limpias como la energía fotovoltaica y la optimización de los amplificadores de señal, se promueve la sostenibilidad ambiental y se mejoran las infraestructuras tecnológicas, no solo para la comunidad universitaria, sino también para zonas rurales y periféricas que se enfrentan a desafíos similares.

1.5. Alcance del proyecto

El propósito principal de este proyecto de titulación es implementar un prototipo de amplificador de señal LTE alimentado por energía solar, con el objetivo de incrementar la cobertura móvil en áreas con escaso acceso a la señal, dentro de un ambiente controlado en la UPSE. El prototipo cuenta con un sistema de antena, amplificador, elementos de enlace y una fuente de energía autosustentable fundamentada en paneles solares y, simultáneamente, opera en la frecuencia mencionada anteriormente.

En primer lugar, se elaboró un modelo de simulación en el programa Atoll, lo que facilitó el análisis de la cobertura teórica del sistema en el campo de estudio. Cabe agregar que se emplearon herramientas para el análisis del espectro y el medidor de potencia para realizar pruebas de campo. Estas herramientas permitieron evaluar parámetros fundamentales como la intensidad de la señal, la ganancia y el área de cobertura alcanzada por el sistema amplificado.

A lo largo del desarrollo, se realizó la implementación, instalación y configuración del sistema de monitoreo energético, lo que facilitó el análisis del comportamiento de la generación y el consumo de energía en diversas circunstancias ambientales. Esto resultó crucial para confirmar la independencia del sistema y maximizar el aprovechamiento de la energía solar.

Finalmente, se desarrollaron directrices técnicas para replicar el sistema en otras regiones rurales del país con condiciones similares, fomentando la implementación de soluciones tecnológicas sustentables que optimizan la conectividad móvil en áreas remotas. Esto tiene como objetivo no solo resolver un problema específico en la universidad, sino también crear un modelo escalable que favorezca el progreso tecnológico y social en lugares rurales con poca accesibilidad a internet.

1.6. Metodología

Una vez planteado el problema de la investigación, es necesario establecer los procedimientos del orden metodológico que permiten ejecutar este proyecto de investigación e implementación. Permitiendo escoger el tipo de investigación, los métodos por aplicar, así como las técnicas e instrumentos que se utilizaron para la recopilación de información. Este marco metodológico justifica los métodos de investigación para responder al problema planteado.

Tipo de investigación

Investigación aplicada: Este tipo de investigación se enfoca en encontrar estrategias para lograr un objetivo específico y ponerlo en práctica. En el caso del presente proyecto, buscó dar solución a un problema práctico detectado en una zona específica con cobertura celular deficiente o de difícil acceso con la implementación de amplificadores y paneles solares.

Investigación experimental: La investigación experimental permite analizar el efecto de una variable independiente sobre una o más variables dependientes bajo condiciones previamente establecidas. En este proyecto, se aplicó por medio de la comparación de la señal LTE con el

amplificador apagado (OFF) y encendido (ON), estableciendo el estado del amplificador como variable independiente. Como variables dependientes se consideraron los parámetros RSRP, RSRQ y SNR, cuyos valores permitieron evaluar los cambios producidos en la señal tras la implementación del sistema.

Investigación cuantitativa: Se centra en la recopilación y el análisis de datos. En este proyecto, se aplicó para medir y analizar parámetros de la señal, lo que permitió validar los resultados obtenidos. Además, facilitó el establecimiento de comparaciones entre el estado inicial de la señal y su comportamiento después de la implementación del sistema.

Para la ejecución práctica de la presente investigación y el cumplimiento de los objetivos planteados, se detallan el escenario de pruebas, herramientas a utilizar y parámetros de medición. El equipo se implementó en una estructura móvil en los exteriores del campus cerca de los laboratorios de telecomunicaciones, laboratorios de electrónica y automatización y laboratorios de Cisco, la cual permitió trasladar la estructura para realizar las pruebas en los puntos estratégicos.

Dentro de este contexto, el análisis se enfocará en el espectro correspondiente a la banda UHF, evaluando el comportamiento de las redes de telefonía móvil celular 4G/LTE que operan en este rango a través de las bandas B2 y B4, por ser las frecuencias con mayor presencia y despliegue físico por parte de los operadores locales. Se observó el comportamiento de los operadores Claro, Movistar y CNT en horarios de medición controlados que abarquen horas pico y horas de tráfico de red. Estos puntos se midieron con la aplicación G-NetTrack que permitió realizar pruebas con las operadoras móviles analizadas e identificar cuál presentaba la señal más débil.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se desarrollan los fundamentos teóricos que sustentan el proyecto de investigación, abordando conceptos relacionados con las tecnologías de comunicación móvil, la propagación de señales electromagnéticas, los parámetros de evaluación de la calidad de señal, así como el funcionamiento de amplificadores LTE y sistemas de energía fotovoltaica. Estos elementos permiten comprender el comportamiento del sistema propuesto y respaldan el análisis técnico orientado a mejorar la cobertura en zonas con conectividad limitada.

2.1. Tecnología LTE y espectro UHF en Ecuador

La tecnología LTE (Long Term Evolution) es un estándar de comunicaciones inalámbricas de cuarta generación (4G) que ofrece mayores velocidades de transmisión de datos y una mayor capacidad en comparación con tecnologías anteriores como 2G y 3G. Esta tecnología ha transformado la forma en que los usuarios acceden a los servicios de banda ancha móvil, permitiendo un consumo eficiente de contenido en alta definición y otros servicios de datos. Por otra parte, LTE puede alcanzar velocidades de hasta 100 Mbps en dispositivos móviles en condiciones óptimas, lo que mejora significativamente la experiencia del usuario en aplicaciones como streaming, videollamadas y navegación web.

El sistema puede operar en dos modos: Frequency Division Duplex (FDD) y Time Division Duplex (TDD). Esta generación brinda flexibilidad en el espectro contando con un ancho de banda entre 1,4 MHz y 20 MHz, el cual se puede escoger dependiendo de la disponibilidad del espectro. El ancho de banda de 20 MHz puede proporcionar una tasa de datos de hasta 300 Mbps en

downlink y una tasa de datos de 75 Mbps en uplink. Se reduce la latencia a 10 ms para la transmisión de un paquete desde la red al dispositivo del usuario (Lino, 2016).

2.1.1. Espectro UHF (Ultra High Frequency)

El espectro radioeléctrico es un recurso natural limitado que forma parte del espectro electromagnético y permite la transmisión de señales inalámbricas para servicios de telecomunicaciones. En este contexto, la banda UHF, comprendida entre 300 MHz y 3000 MHz, constituye una de las porciones más relevantes debido a sus propiedades de propagación y capacidad de transmisión de información (Albarrán, 2025).

En Ecuador, la administración y control del espectro radioeléctrico está a cargo de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, entidad responsable de la planificación, asignación y supervisión del uso de frecuencias a nivel nacional. A través de planes de frecuencias, se establecen las condiciones bajo las cuales los distintos servicios pueden operar dentro de la banda UHF, incluyendo telecomunicaciones móviles, radiodifusión y sistemas inalámbricos (Arcotel, 2017).

El funcionamiento del espectro se basa en la propagación de ondas electromagnéticas de alta frecuencia transmitidas mediante antenas. Su corta longitud de onda permite el uso de antenas más pequeñas y facilita la implementación de sistemas modernos de comunicación. Estas señales presentan buena capacidad de penetración en obstáculos como edificaciones y vegetación, lo que las hace adecuadas para entornos urbanos y suburbanos, a la vez ofrece un equilibrio entre cobertura y capacidad de transmisión. No obstante, a mayores frecuencias dentro de esta banda,

aumentan las pérdidas por propagación, reduciendo el alcance y haciendo necesario el uso de estaciones base adicionales o sistemas de amplificación (Arcotel, 2017).

Bajo la regulación de Arcotel, el espectro UHF es fundamental para el desarrollo de redes inalámbricas, ya que permite ampliar la conectividad en zonas con cobertura limitada, contribuyendo a la reducción de la brecha digital (Arcotel, 2017).

2.2.Propagación de la señal electromagnética

2.2.1. Principios generales de propagación del espectro radioeléctrico

El término propagación hace referencia a la transmisión de ondas electromagnéticas a través del espacio. Aunque el espacio libre se refiere estrictamente al vacío, a la propagación a través de la atmósfera terrestre se la suele denominar propagación en el espacio libre y, por lo general, puede tratarse como tal. La diferencia principal radica en que la atmósfera terrestre incorpora pérdidas de la señal que no están presentes en el vacío (Cortés).

Las ondas electromagnéticas se propagan por medio de cualquier material dieléctrico, como es el caso del aire, pero estas no se propagan de forma adecuada a través de conductores con pérdidas como lo es el agua de mar, ya que los campos eléctricos hacen que fluyan como corrientes en el material disipando así la energía de las ondas (Cortés). Estas ondas se desplazan a la velocidad de la luz en el vacío, la cual es aproximadamente $3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Por ello, es imprescindible analizar su longitud de onda, la cual depende directamente de la frecuencia utilizada y determina el comportamiento de propagación en el espacio (Tomasi).

En la ecuación (2) se muestra cómo la longitud de onda está relacionada con la frecuencia de la onda y la velocidad de propagación:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

Donde:

λ (lambda) es la longitud de onda (m)

c velocidad de propagación de la onda (m/s)

f es la frecuencia de la onda (Hz)

Esta relación resulta esencial para el análisis de los fenómenos de propagación, ya que determina cómo la señal interactúa con los diferentes elementos del entorno, tales como edificios, vegetación o accidentes geográficos (Tomasi).

2.2.2. Clasificación de bandas de frecuencia

En el campo de las comunicaciones por radio, el espectro radioeléctrico se segmenta en diversas bandas, cada una determinada por su rango de frecuencias y vinculada a diversas aplicaciones tecnológicas, como se muestra en la Figura 2. Esta categorización es esencial para entender el comportamiento de las señales electromagnéticas en diferentes bandas y su aplicación en los sistemas de telecomunicaciones (Casallo, 2018).

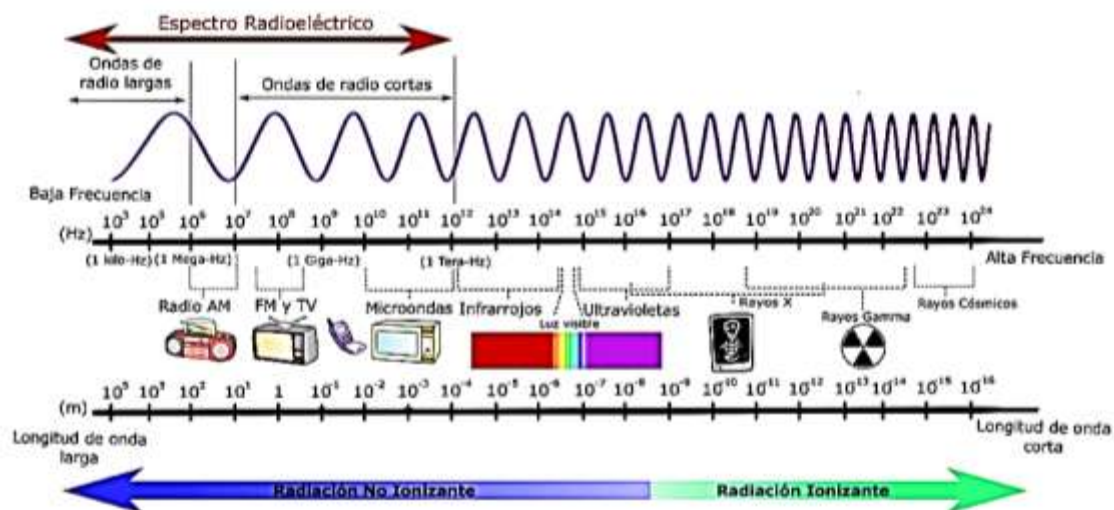


Figura 2. Espectro electromagnético

Fuente: (Casallo, 2018)

En la Tabla 1 se presenta la clasificación estandarizada de las bandas de frecuencia del espectro radioeléctrico, desde Very Low Frequency (VLF) hasta Extremely High Frequency (EHF), incluyendo sus respectivos rangos de operación y designaciones métricas (MINTEL, 2022).

Tabla 1. Bandas de frecuencias

Nº Banda	Símbolos (en inglés)	Gamas de frecuencias	Designación métrica correspondiente
4	VLF	3 a 30 kHz	Ondas miriamétricas
5	LF	30 a 300 kHz	Ondas kilométricas
6	MF	300 a 3 000 kHz	Ondas hectométricas
7	HF	3 a 30 MHz	Ondas decamétricas
8	VHF	30 a 300 MHz	Ondas métricas
9	UHF	300 a 3 000 MHz	Ondas decimétricas
10	SHF	3 a 30 GHz	Ondas centimétricas
11	EHF	30 a 300 GHz	Ondas milimétricas
12	—	300 a 3 000 GHz	Ondas decimilimétricas

Esta clasificación permite conocer las características generales de cada banda de frecuencia y su aplicación en los diferentes sistemas de telecomunicaciones. De ellas, la banda UHF destaca por su intenso empleo en servicios de comunicación inalámbricos, sobre todo en redes móviles. En este rango se han asignado diversas frecuencias para tecnologías como la LTE (Long Term Evolution) que permiten transmitir datos y servicios de conectividad. Según el Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información de Ecuador, las bandas en las que funciona el LTE en Ecuador son B28 (700 MHz), B4 (1700/2100 MHz) y B2 (1900 MHz) (MINTEL, 2022).

- **Asignación de frecuencias para el servicio móvil avanzado (SMA)**

Dentro del espectro de Ultra Alta Frecuencia (UHF), uno de los segmentos de mayor impacto socioeconómico y tecnológico es el destinado al Servicio Móvil Avanzado (SMA). En Ecuador, la administración y control de este recurso están a cargo de la Arcotel, organismo que ha distribuido subbandas específicas dentro del rango UHF para el despliegue de las tecnologías de telefonía móvil celular de segunda (2G), tercera (3G) y cuarta generación (4G LTE) (Arcotel, 2020).

Las redes de telefonía móvil en Ecuador operan en diferentes segmentos del espectro radioeléctrico, distribuidas en canales específicos que varían según la tecnología de transmisión desplegada y el operador asignado; estas asignaciones son administradas por los organismos de control del país y se expresan en unidades de megahercios (MHz) o gigahercios (GHz), destacando rangos clave para los servicios de voz y datos móviles (Moviles.info, 2025).

Tabla 2. Bandas y frecuencias de servicios móviles en Ecuador

Fuente: (Moviles.info, 2025)

Cobertura	Bandas y Frecuencias
2G	B2 (1900 MHz), B5 (850 MHz)
3G	B2 (1900 MHz), B5 (850 MHz)
4G	B2 (1900 MHz), B4 (1700/2100 MHz) y B28 (700 MHz)

- **Bandas de frecuencias LTE objeto de estudio**

Para el desarrollo de las pruebas de campo y validación del prototipo se seleccionaron segmentos específicos del espectro. En este contexto, la investigación se centró concretamente en las bandas B2 y B4.

Para garantizar el rigor metodológico de las pruebas de campo, se toma como referencia la distribución oficial del espectro radioeléctrico emitida por Arcotel para el Servicio Móvil Avanzado en Ecuador, en donde se detalla la canalización de las bandas de frecuencia en el rango UHF, identificando los bloques asignados a cada operador mediante duplexación por división de frecuencia (FDD) (Arcotel, 2018).

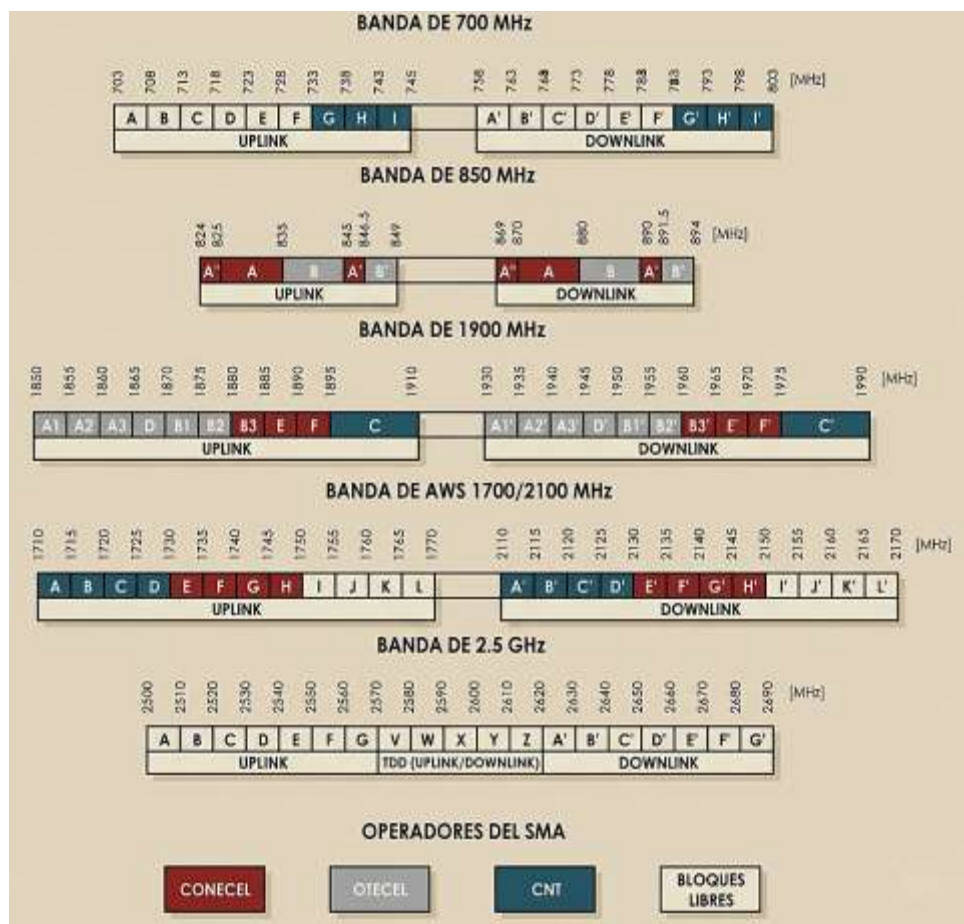


Figura 3. Canalización y asignación de bandas de frecuencia SMA

Fuente: (Arcotel, 2018)

Como se muestra en la Figura 3, las bandas de frecuencias al tener un rango específico y una separación interna estrictamente delimitada garantizan la coexistencia de las redes móviles en el país. Como se observa en la distribución oficial emitida por la Arcotel, el principio físico para evitar el solapamiento o “choque” de señales entre diferentes operadoras se fundamenta en dos estrategias de diseño e ingeniería de espectro (Arcotel, 2018):

- **Segmentación por bloques exclusivos (Letras de Asignación):** El espectro radioeléctrico se fragmenta en bloques discretos identificados alfabéticamente (A,

B, C, etc.). Cada operador (CONECEL en rojo, OTECEL en gris y CNT en azul) tiene asignado un rango numérico exacto en megahercios (MHz) que actúa como una frontera invisible.

- **Separación de canales de subida y bajada (esquema FDD):** La imagen revela que cada banda se encuentra dividida horizontalmente en dos segmentos: el enlace ascendente (*Uplink*) y el enlace descendente (*Downlink*), denotados por letras base y letras con apóstrofo (A y A'). Al transmitir la información de ida y vuelta por “carreteras” frecuenciales completamente separadas, se elimina la posibilidad de que el terminal móvil interfiera con la recepción de la estación base (Arcotel, 2018).

Centrando el interés de esta investigación en la Banda de 1900 MHz (Banda 2) y la Banda de AWS 1700/2100 MHz (Banda 4), se observa que el entorno electromagnético local cuenta con la presencia activa de los operadores CONECEL S.A. (Claro), OTECEL S.A. (Movistar) y Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT EP). La elección de estas frecuencias responde directamente a su predominio en la infraestructura física de las radiobases locales de la provincia, lo que garantiza la captura de datos reales y estables del sistema de amplificador.

2.2.3. Modos de propagación: LOS y NLOS

- Propagación por la línea de vista:

En el modo de propagación *Line Of Sight (LOS)* o “línea de vista”, el transmisor y el receptor se “ven” y la limitación teórica, en espacio libre, viene dada por la curvatura de la Tierra (Moreno), esto quiere decir que la señal de radio viaja directamente entre el transmisor y el receptor sin obstáculos que bloqueen su paso. Para que esto suceda, tanto la antena transmisora como la

receptora deben estar elevadas lo suficiente para que haya una visión directa entre ellas, tal y como se muestra en la Figura 4, considerando una superficie idealizada, es decir, tierra esférica, lisa y sin obstáculos.

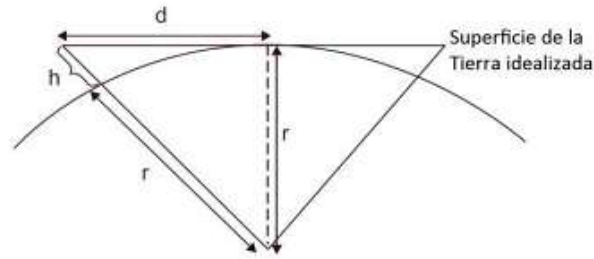


Figura 4. Horizonte radioeléctrico

Fuente: (Moreno)

Para definir el horizonte radioeléctrico, se debe tener en cuenta la curvatura de la Tierra. El modelo más simple es tratarla como una esfera cuyo radio es el radio ecuatorial. Mediante la relación de la distancia, radio y altura se desglosan las ecuaciones (3) y (4), obteniendo la ecuación (5) que hace referencia a la forma geométrica fundamental del horizonte de la Tierra:

$$d^2 + r^2 = (r + h)^2 \quad (3)$$

$$d^2 = (2r + h)h \quad (4)$$

$$d \approx \sqrt{2rh} \quad (5)$$

El radio de la Tierra es aproximadamente de 6378 km en Ecuador. La atmósfera curva las ondas de radiofrecuencia horizontales hacia abajo debido a la variación de la densidad atmosférica con la altura, en particular en la troposfera (Moreno). En la Figura 5 se detalla cómo la troposfera refracta las ondas, extendiendo el horizonte radioeléctrico más allá del horizonte visual (LOS),

donde el rayo horizontal local refractado supera la línea de vista hasta el horizonte, permitiendo una mayor cobertura.

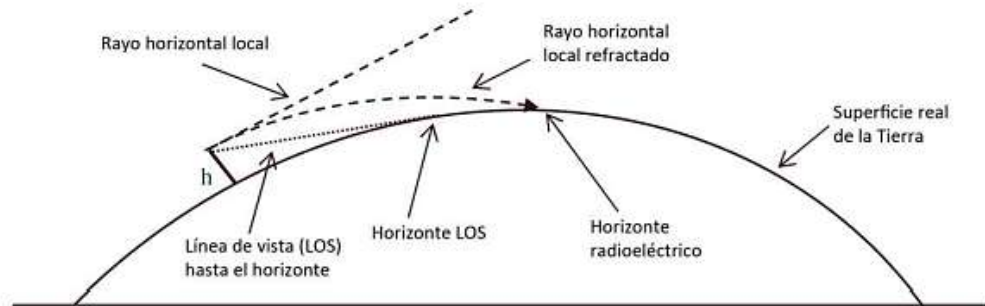


Figura 5. Efecto de la troposfera sobre las ondas radioeléctricas y el horizonte de radio

Fuente: (Moreno)

La forma de corregir esta curvatura es usar una aproximación en la cual se multiplica el radio real por un factor $k = \frac{4}{3}$. En la Figura 6, se muestra cómo el modelo representa la Tierra efectiva con un radio $4/3$ veces su radio real, lo que permite que el horizonte radioeléctrico se extienda más allá del horizonte visual (LOS) debido a la refracción.

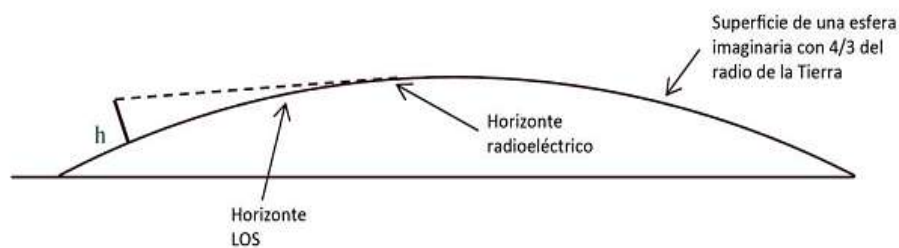


Figura 6. Modelo de $k = \frac{4}{3}$ del radio terrestre

Fuente: (Moreno)

Este método es utilizado por el modelo de propagación Longley-Rice, por tanto, al reemplazar los parámetros conocidos en la ecuación (6), se simplifica la expresión hasta obtener el resultado mostrado en la ecuación (7) que define la distancia hacia el horizonte radioeléctrico:

$$r = 8504 \text{ km}$$

$$d \approx \sqrt{2rh} = \sqrt{\frac{4}{3} \times 6378 \text{ km} \times \frac{h \times 1 \text{ km}}{1000 \text{ m}}} \quad (6)$$

Con d en (km) y h en (m).

$$d \approx 4.12\sqrt{h} \quad (7)$$

Donde, d corresponde a la distancia hasta el horizonte radioeléctrico. Esta aproximación nos proporciona un método rápido para estimar el horizonte radioeléctrico de cada antena. La suma de las dos distancias da el enlace *LOS* máximo teórico entre dos antenas.

- Propagación por no línea de vista:

En el modo de propagación *Non Line Of Sight (NLOS)* o “fuera de línea de vista”, el enlace entre el transmisor y el receptor no es directo debido a que existen obstáculos en el entorno que bloquean parcial o totalmente la visión entre las antenas (Moreno). Por esta razón, la señal no llega únicamente por un solo camino recto, sino que depende de fenómenos como la refracción, la difracción y la reflexión para propagarse alrededor o a través de los obstáculos (edificios, árboles, terreno irregular, etc.) (Moreno).

➤ Refracción

Es la desviación aparente de un rayo cuando pasa de un medio a otro con diferente índice de refracción. La velocidad a la cual una onda electromagnética se propaga es inversamente proporcional a la densidad del medio en el cual se está propagando (Jiménez & Paucar, 2008), es decir, la señal cambia ligeramente de dirección al pasar por medios con diferente densidad (como cambios en las capas atmosféricas), permitiendo que parte de la señal se “desvíe” hacia zonas que no tienen vista directa.

El ángulo de refracción depende del índice de refracción de los dos materiales, definido como la relación de la velocidad de propagación de un rayo de luz en el espacio libre respecto a la velocidad de propagación en un material dado (Jiménez & Paucar, 2008). Por tal razón, el índice de refracción define la relación de la velocidad de la luz en el espacio libre y en un material dado, de acuerdo con la ecuación (8).

$$n = \frac{c}{v} \quad (8)$$

Donde:

n = Es el índice de refracción

c = Es la velocidad de la luz en el espacio libre (3×10^8 m/s)

v = Es la velocidad de la luz en un material dado (m/s)

La ley de Snell, también conocida como la ley de refracción, de acuerdo con la ecuación (9), describe cómo la luz cambia de dirección al pasar de un medio a otro con diferentes índices de refracción (Ruiz, 2024).

$$n_1 * \sin \theta_1 = n_2 * \sin \theta_2 \quad (9)$$

Donde:

n_1 es el índice de refracción del primer medio.

θ_1 es el ángulo de incidencia (el ángulo entre el rayo incidente y la normal a la superficie).

n_2 es el índice de refracción del segundo medio.

θ_2 es el ángulo de refracción (el ángulo entre el rayo refractado y la normal a la superficie).

➤ Reflexión

Se da cuando una señal incide sobre un objeto que presenta dimensiones más grandes en comparación con la longitud de onda (λ) (Jiménez & Paucar, 2008).

La reflexión electromagnética sucede cuando una onda incide sobre una barrera entre dos medios y parte de su energía es devuelta al primer medio. Como la onda reflejada permanece en el mismo material que la incidente, su ángulo es igual al de incidencia y su velocidad no cambia. Sin embargo, su amplitud es menor y la razón entre las intensidades del voltaje reflejado e

incidente se conoce como coeficiente de reflexión (Γ), representada por la ecuación (10) (Jiménez & Paucar, 2008).

$$\Gamma = \frac{E_r e^{j\varphi_r}}{E_i e^{j\varphi_i}} = \frac{E_r}{E_i} e^{j(\varphi_r - \varphi_i)} \quad (10)$$

Donde:

E_r = intensidad del campo eléctrico reflejado [V/m]

E_i = intensidad del campo eléctrico incidente [V/m]

φ_r = ángulo reflejado [grados]

φ_i = ángulo incidente [grados]

➤ Difracción

La difracción es un fenómeno por el cual las ondas electromagnéticas, al encontrarse con los bordes de un obstáculo, se desvían y se propagan en múltiples direcciones. Este efecto es una consecuencia directa del principio de Huygens y depende de la longitud de onda, ya que, a mayor longitud, más notoria es la difracción. Gracias a este fenómeno, las ondas pueden rodear obstáculos y propagarse más allá de los bordes (Jiménez & Paucar, 2008).

Por otro lado, como se aprecia en la Figura 7, el frente de onda se define como el lugar geométrico de los puntos que oscilan en fase en un mismo instante. La dirección de propagación

es perpendicular a estos frentes, y a la línea que representa dicha dirección se le conoce como rayo (Jiménez & Paucar, 2008).

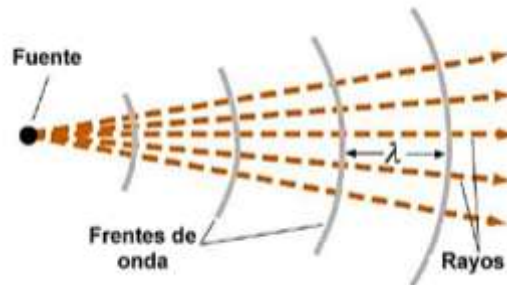


Figura 7. Frente de onda y rayos

Fuente: (Jiménez & Paucar, 2008)

Los casos más importantes de difracción en el estudio de los fenómenos de propagación se ilustran en la Figura 8, y son la difracción por filo de cuchillo (Figura 8a), la cual orienta la onda de radio a la zona de sombra detrás de una montaña aguda y ocurre cuando existe una obstrucción en la trayectoria de un enlace de comunicaciones y la difracción causada por la curvatura de la superficie terrestre (Figura 8b), la cual dirige las ondas de radio a la zona de sombra debajo de la línea visual.

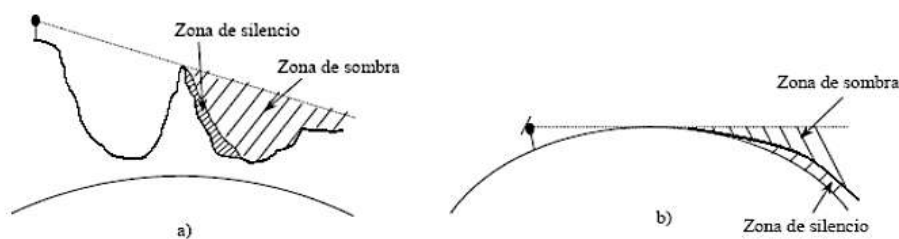


Figura 8. Tipos de difracción a) por filo de cuchillo b) por la curvatura de la superficie terrestre

Fuente: (Jiménez & Paucar, 2008)

➤ Absorción

La absorción de ondas electromagnéticas ocurre porque el aire no es un vacío, sino una mezcla de gases (como oxígeno, nitrógeno y vapor de agua). Al propagarse por la atmósfera, parte de la energía de la onda se transfiere a las moléculas del aire, lo que provoca pérdidas (Jiménez & Paucar, 2008). La cantidad de absorción depende de:

- La frecuencia de la onda: algunas frecuencias son absorbidas más que otras.
- El tipo de medio: diferentes gases absorben en distinta medida.
- La distancia recorrida: a mayor distancia, mayor pérdida.
- Las condiciones del clima: lluvia intensa o neblina aumentan la absorción.

En medios homogéneos, la absorción es constante a lo largo del trayecto. En la Figura 9 se muestra la absorción (en dB/km) de ondas al propagarse en presencia de oxígeno y vapor de agua (Quistial, 2016).

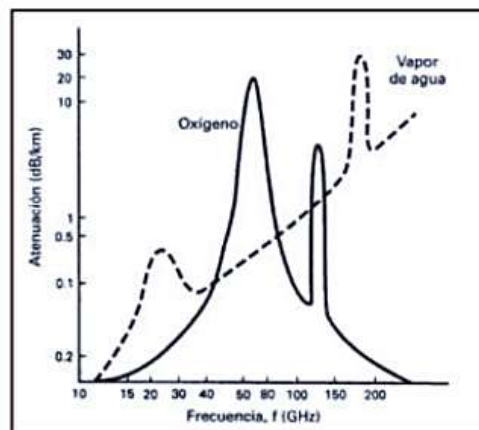


Figura 9. Absorción atmosférica de las ondas electromagnéticas

Fuente: (Quistial, 2016)

Las ondas de radio, de cualquier clase, se atenúan o debilitan por la transferencia de energía al medio a través del cual viajan cuando este no es el vacío. La potencia de la onda decrece exponencialmente, correspondiendo a un decrecimiento lineal en dB.

2.2.4. Zonas de Fresnel y obstrucciones

La zona de Fresnel es un concepto fundamental en el análisis de propagación de ondas electromagnéticas, ya que permite determinar si existe o no una obstrucción efectiva entre dos antenas en un enlace de radio. Aunque pueda haber línea de vista (*LOS*) entre el transmisor y el receptor, la presencia de obstáculos dentro de la primera zona de Fresnel puede causar difracción, atenuación y pérdida de potencia (Quistial, 2016). Este parámetro se calcula de la siguiente manera, según sus distancias:

Para calcular la zona donde hay igualdad en las distancias, se utiliza la ecuación (11):

$$R_n = 8.657 \sqrt{\frac{d_1 + d_2}{f}} \quad (11)$$

Para calcular la zona donde las distancias son distintas, se utiliza la ecuación (12):

$$R_n = 17.32 \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2}{f(d_1 + d_2)}} \quad (12)$$

Donde:

R_n : Es el radio de la n-ésima zona de Fresnel en metros (m).

d_1 y d_2 : Son las distancias desde el obstáculo al transmisor y al receptor, respectivamente, en kilómetros (km) (Jiménez & Paucar, 2008).

- Primera zona de Fresnel

Es útil considerar la primera zona de Fresnel, ya que el margen de pérdidas en una trayectoria con obstáculos se calcula con relación al radio de la primera zona, es decir, que la superficie donde se tiene la primera zona de Fresnel debe ser libre de obstáculos. En la Figura 10 se muestra cómo esta zona se encuentra en estrecha relación con la curvatura de la Tierra (K), que generalmente puede tomar valores de $K = 2/3$ en el peor de los casos, o de $K = 4/3$ siendo este un valor adecuado (Quistial, 2016).

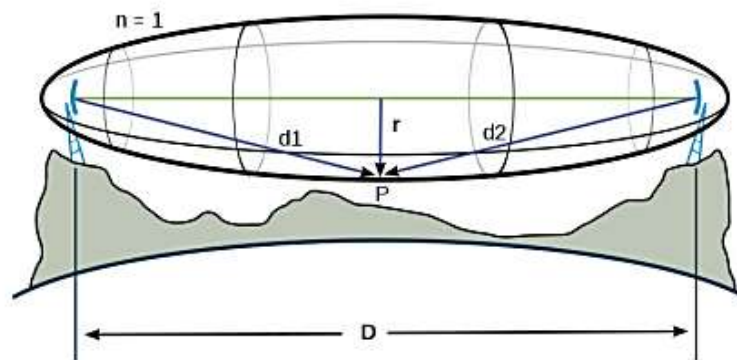


Figura 10. Representación de la primera zona de Fresnel

Fuente: (Quistial, 2016)

La Figura 11 muestra el elipsoide de Fresnel para un enlace de radio. Para asegurar una propagación efectiva de la señal, se recomienda que un mínimo del 60 % de la primera zona de Fresnel esté despejada. Es común que la señal se degrade en zonas rurales donde el terreno es irregular y la vegetación dificulta la limpieza del área. Esta condición justifica el uso de

amplificadores LTE alimentados por energía fotovoltaica como una forma de compensar las pérdidas causadas por obstrucciones parciales en la zona de Fresnel.

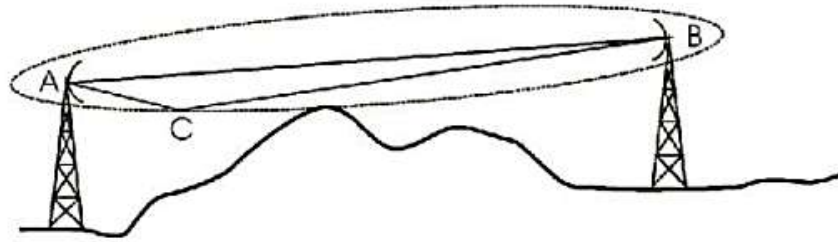


Figura 11. Elipsoide de Fresnel para un radioenlace

Fuente: (Jiménez & Paucar, 2008).

2.3. Factores limitantes de la señal

La propagación de ondas electromagnéticas en sistemas LTE enfrenta varios desafíos. En espacio libre, las ondas pierden potencia por dispersión al expandirse, fenómeno conocido como pérdida por trayectoria (Cumanda, 2010). En la atmósfera, estas pérdidas aumentan debido a la absorción por partículas como oxígeno y vapor de agua. Así mismo, los movimientos del transmisor o receptor causan variabilidad en la señal, generando desvanecimiento e interferencias (Jiménez & Paucar, 2008).

Estos factores representan obstáculos significativos para lograr una cobertura estable y de calidad en redes LTE. Por ello, se han implementado tecnologías complementarias, como los amplificadores de señal, para mejorar la cobertura en zonas alejadas donde las infraestructuras tradicionales no son viables.

2.3.1. Pérdida por trayectoria

La pérdida por trayectoria (Path loss) es la atenuación que sufre una señal electromagnética cuando se desplaza desde el transmisor hasta el receptor a través del espacio. Dicha atenuación representa una reducción de la potencia de la señal debido a factores como la distancia, la frecuencia de operación y las características del medio de propagación.

En condiciones ideales de espacio libre, la atenuación de trayectoria depende principalmente de la distancia entre el transmisor y el receptor y de la frecuencia de la señal. A medida que la señal se aleja de la fuente transmisora, su energía se dispersa en el espacio, lo que produce una disminución progresiva de su intensidad. De este modo, la ecuación (13) establece cómo calcular la pérdida por trayectoria.

$$PL = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 32.44 \quad (13)$$

Donde:

PL = es la pérdida por trayectoria (dB)

d = es la distancia entre transmisor y receptor (km)

f = es la frecuencia de operación (MHz)

Esta expresión, conocida como modelo de espacio libre, permite estimar la atenuación de la señal en condiciones ideales, sin considerar obstáculos ni efectos adicionales del entorno. En escenarios reales, la pérdida por trayectoria se ve afectada por factores como la presencia de

edificaciones, vegetación, relieve del terreno y condiciones atmosféricas, lo que incrementa la atenuación de la señal respecto al modelo ideal.

En el caso de frecuencias dentro del espectro UHF, como la banda de 700 MHz (banda 28), la pérdida por trayectoria es menor en comparación con frecuencias más altas, lo que favorece una mayor cobertura. Esta característica es especialmente relevante en entornos rurales o de difícil acceso, donde se requiere maximizar el alcance de la señal con una infraestructura limitada.

2.3.2. Interferencia: CCI y ACI

Se define como interferencia electromagnética a la superposición simultánea de dos o más ondas electromagnéticas coincidentes en espacio, tiempo y frecuencia que provocan una degradación de la calidad de la señal recibida. Este fenómeno está basado en el principio de superposición lineal, donde el campo resultante es la suma fasorial de las señales individuales, con su amplitud y fase (Cumanda, 2010).

En los canales de propagación, la interferencia se produce principalmente por las diferencias de fase que provocan las múltiples trayectorias (rayo directo, rayos reflejados, refractados, etc.). Esto puede producir una interferencia constructiva o destructiva que afecta significativamente la potencia de la señal (Cumanda, 2010).

En sistemas inalámbricos, la interferencia es un factor crítico que afecta el rendimiento del enlace, elevando la tasa de error de bit (BER) y disminuyendo la calidad de servicio (QoS) (Vinicio & Delfin, 2008). En este marco, se diferencian dos tipos de interferencia: co-canal (CCI) y canal adyacente (ACI).

- Interferencia co-canal (Co-Channel Interference, CCI)

La interferencia co-canal se presenta cuando múltiples transmisores operan sobre la misma frecuencia o recurso espectral, situación inherente a los esquemas de reutilización de frecuencia implementados en redes celulares para maximizar la eficiencia del espectro (Cumanda, 2010). Desde un punto de vista técnico, la CCI se manifiesta como un incremento en la potencia de interferencia dentro del canal útil, afectando directamente la relación señal a interferencia más ruido (SINR).

En redes LTE, donde se emplea acceso múltiple por división ortogonal de frecuencia (OFDMA) en el enlace descendente, la ortogonalidad entre subportadoras reduce la interferencia intracelda; sin embargo, la interferencia intercelda (ICI), equivalente a CCI, sigue siendo un factor crítico, especialmente en escenarios de alta densidad de usuarios o en los bordes de celda.

En entornos con múltiples dispositivos transmitiendo simultáneamente, la CCI introduce ruido adicional y fluctuaciones en la señal, reduciendo el rendimiento del sistema e incluso volviéndolo inestable desde la perspectiva del usuario final (Álvarez, 2023).

En el contexto de amplificadores de señal, la CCI adquiere especial relevancia, ya que estos dispositivos amplifican indiscriminadamente tanto la señal útil como las componentes interferentes presentes en el mismo canal, lo que puede degradar aún más la SINR (Cumanda, 2010).

- Interferencia por canal adyacente (Adjacent Channel Interference, ACI)

La interferencia por canal adyacente se origina cuando existe acoplamiento espectral entre señales transmitidas en bandas de frecuencia contiguas, debido a limitaciones en la selectividad de los filtros RF y a efectos no lineales en los amplificadores (Cumanda, 2010). Desde el punto de vista espectral, la ACI ocurre cuando el espectro de una señal invade parcialmente el canal adyacente, introduciendo componentes interferentes que degradan la señal útil.

Cuando la señal deseada presenta baja potencia, la interferencia proveniente de canales adyacentes puede degradar significativamente la calidad de la comunicación, generando errores en la transmisión de datos y distorsión (Álvarez, 2023).

En sistemas LTE, donde la asignación de recursos se realiza en bloques de frecuencia estrechos, la ACI puede afectar la demodulación correcta de subportadoras, incrementando la tasa de error de bit (BER) y reduciendo la eficiencia del sistema (Jiménez & Paucar, 2008). Por ello, es fundamental que los amplificadores utilizados presenten alta linealidad y adecuados filtros de entrada/salida que minimicen la amplificación de señales no deseadas en canales cercanos (Cumanda, 2010).

2.3.3. Interferencia causada por objetos físicos

La interferencia generada por objetos es uno de los aspectos más difíciles del diseño de una red inalámbrica. Al planificar una red inalámbrica optimizada, es importante determinar las barreras físicas e incorporarlas al diseño de la red (Álvarez, 2023).

Tabla 3. Materiales y su nivel de interferencia en las señales

Material	Interferencia	Uso
Madera	Baja	Muros o puertas huecas
Tabla	Baja	Dentro de muros
Yeso	Baja	Sin malla de alambre
Muebles	Baja	Sillones de oficina
Vidrio transparente	Baja	Ventanas
Cristal ahumado	Media	Ventanas
Personas	Media	Gran cantidad de vehículos y peatones
Baldosa de cerámica	Media	Muros
Bloques de hormigón	Media/alta	Construcción de muros
Ladrillo	Media	Muros
Mármol	Media	Encimeras
Espejos	Alta	Espejos o superficies reflectantes
Metales	Alta	Separaciones de las oficinas
Agua	Alta	Acuario y piletas

2.3.4. Tabla comparativa entre canales

A partir de los datos expuestos en la Tabla 4, se observa que existe una diferencia entre ambos fenómenos: la interferencia co-canal resulta más gestionable, ya que los equipos reconocen la señal, pero esperan su turno para transmitir. En cambio, la interferencia adyacente provoca

solapamiento entre las frecuencias que se transmiten causando ruido, cortes en las conexiones e incluso pérdidas de rendimiento del canal.

Tabla 4. Comparativa de interferencia co-canal y adyacente

Característica	Interferencia Co-canal (CCI)	Interferencia Canal Adyacente (ACI)
Definición	Interferencia en la misma frecuencia	Interferencia en frecuencias cercanas
Causa	Reutilización de canal	Filtrado imperfecto o señales no lineales
Frecuencia	Mismo canal	Canales adyacentes
Efecto	Reduce la calidad por ruido e interferencia	Contamina la señal con ruido de canales vecinos
Mitigación	Planificación y control de potencia	Filtros y amplificadores lineales

Fuente: Autores

2.3.5. Desvanecimiento y dispersión.

- Desvanecimiento

El desvanecimiento es la atenuación que sufre una señal durante su propagación debido a pérdidas en el espacio, obstáculos físicos y resistencias en el medio. Se manifiesta como una disminución en la potencia recibida en el terminal receptor. Este fenómeno tiene un carácter probabilístico, ya que la intensidad de la señal puede variar de forma impredecible en el tiempo y espacio, afectando la calidad y estabilidad de la comunicación (Cumanda, 2010). Los parámetros se basan en:

Profundidad de desvanecimiento: establece la diferencia entre el valor nominal y el nivel recibido en condiciones de desvanecimiento. Se expresa en decibelios, según la ecuación (14).

$$F_1(dB) = P_1 - P_0 \quad (14)$$

Donde:

P_n = Valor medio de la potencia durante el desvanecimiento

La ecuación (15) representa la duración de desvanecimiento que define el intervalo de tiempo que transcurre entre la disminución y la recuperación del nivel nominal.

$$T = t_2 - t_1 \quad (15)$$

Se debe tener en cuenta que los desvanecimientos se producen por:

➤ Desvanecimiento por reflexión:

Las reflexiones en el terreno y estructuras cercanas generan interferencias que pueden causar fluctuaciones rápidas en la potencia recibida. Esto afecta la estabilidad de la señal amplificada y puede exigir que los amplificadores tengan un diseño robusto para mantener una ganancia constante y evitar pérdidas temporales.

➤ Desvanecimiento multitrayecto:

La llegada de señales por diferentes trayectorias con fases distintas provoca desvanecimientos profundos y variabilidad en la señal recibida. En la banda UHF, esto puede

causar errores en la decodificación de datos. Por eso, el amplificador y el sistema deben incorporar técnicas para mitigar estos efectos, como diversidad de antenas o filtros especializados.

➤ Desvanecimiento por hidrometeoros:

Las condiciones atmosféricas adversas como lluvia o niebla pueden aumentar significativamente la atenuación de la señal. Aunque este efecto es menor en UHF comparado con frecuencias más altas, sigue siendo relevante en zonas rurales con clima variable, por lo que los amplificadores deben ser capaces de compensar estas pérdidas para mantener la calidad del enlace.

- Dispersión

La dispersión describe cómo disminuye la densidad de potencia de una onda electromagnética al alejarse de su fuente. Este fenómeno sigue la ley del cuadrado inverso, que indica que la potencia disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia.

A medida que el frente de onda se expande, la energía se distribuye sobre un área mayor, lo que reduce la cantidad de energía por unidad de superficie. Aunque no se pierde energía total, sí se percibe una atenuación debido a esta expansión. La atenuación del campo eléctrico se puede calcular usando el logaritmo de la relación entre densidades de potencia medidas en dos puntos distintos, mediante la ecuación (16):

$$\gamma = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (16)$$

Donde:

$P1$ = Densidad de potencia en el punto 1 (W)

$P2$ = Densidad de potencia en el punto 2 (W)

2.3.6. Absorción atmosférica y efectos climáticos

La absorción atmosférica y los efectos climáticos constituyen factores relevantes en la propagación de ondas electromagnéticas, ya que durante su trayecto la señal interactúa con componentes del medio como vapor de agua, oxígeno y partículas suspendidas en el aire, produciendo pérdidas de energía que se transforman parcialmente en calor. Este fenómeno depende principalmente de la frecuencia de operación y de las condiciones ambientales: en bandas altas como SHF y EHF la atenuación es considerable, mientras que en frecuencias UHF cercanas a 700 MHz (banda 28) la absorción es relativamente baja, favoreciendo mayores distancias de cobertura. No obstante, condiciones climáticas como lluvia, niebla y humedad generan atenuación adicional por absorción y dispersión, especialmente en frecuencias superiores a 2 GHz, pudiendo afectar la estabilidad del enlace en entornos reales.

Aparte de los efectos atmosféricos directos, los factores ambientales influyen significativamente en la propagación de las señales de radiofrecuencia. Las estructuras urbanas como edificios y viviendas pueden bloquear o reflejar las señales, reduciendo su intensidad; materiales como hormigón armado, acero y vidrio de baja emisividad presentan altos niveles de atenuación. En frecuencias milimétricas, por ejemplo, el vidrio puede alcanzar valores de hasta 19 dB/cm en la banda de 28 GHz, mientras que materiales como yeso o ladrillo generan pérdidas

menores (Nozhan Hosseini, 2020). De igual forma, la vegetación densa produce absorción y dispersión de las ondas electromagnéticas, incrementando la atenuación especialmente por encima de 11 GHz, donde fenómenos como el desvanecimiento por lluvia intensifican este efecto; adicionalmente, la presencia de cuerpos de agua puede provocar reflexiones y refracciones que alteran la calidad de la señal recibida.

2.4. Métricas de calidad de señal LTE

Para evaluar el rendimiento de la señal 4G en el escenario de estudio, se identificaron indicadores clave de rendimiento, los cuales son recolectados mediante software especializado de redes. Estos elementos permiten transformar los fenómenos físicos de la onda electromagnética en datos estadísticos legibles.

2.4.1. RSSI, RSRP, RSRQ y SNR

- Indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI)

El RSSI mide la potencia que un dispositivo recibe de una señal. Es un indicador general de la intensidad de la señal y se utiliza en diversos estándares de comunicación inalámbrica, como Wi-Fi y redes celulares. Los valores del RSSI se miden típicamente en *dBm* (decibelios respecto a un milivatio) y varían de -100 dBm (señal débil) a 0 dBm (señal fuerte). El RSSI es útil para determinar la proximidad de un dispositivo a una fuente de señal, pero no proporciona información detallada sobre la calidad de la señal (Henriksson, 2024).

- Potencia recibida de la señal de referencia (RSRP)

El RSRP se refiere a la potencia recibida de la señal de referencia y constituye un método específico dentro del concepto global de RSSI (Indicador de intensidad de la señal recibida). En contraposición al RSSI, que es una evaluación global de la potencia de la señal que incluye interferencias y ruido, el RSRP se centra en medir únicamente la potencia de las señales de referencia en redes LTE y 5G, proporcionando así una interpretación más exacta y práctica de la calidad verdadera de la cobertura móvil (Teltonika, 2024). En términos teóricos, el RSRP se determina mediante la ecuación (17):

$$RSRP = RSSI - 10\log_{10}(12 - N) \quad (17)$$

Hay que tener en cuenta que esta ecuación es útil en teoría o para análisis aproximado, pero en la práctica el RSRP se mide directamente, ya que la cantidad exacta de señales de referencia varía según la configuración de la red LTE (Arismas, 2017).

Con este parámetro es posible realizar mediciones tanto en el ancho de banda total como en una banda estrecha. Al analizar todo el ancho de banda, ofrece una perspectiva global de la cobertura y la capacidad de la red a través de todas las frecuencias activas empleadas por el sistema, lo que resulta beneficioso para evaluar el desempeño global de una infraestructura de red móvil. Por otro lado, una medición en banda estrecha posibilita examinar el comportamiento de la señal en intervalos de frecuencia determinados, lo que es crucial para detectar interferencias puntuales, mejorar áreas críticas o solucionar problemas específicos que podrían no ser identificados en un análisis global (Teltonika, 2024).

La evaluación del RSRP es esencial para determinar con más precisión la calidad de conexión celular que recibe un dispositivo de red. Ofrece información esencial para la toma de decisiones técnicas vinculadas a mejoras en la infraestructura, modificaciones en el diseño de red, elección de ubicaciones, evaluación de la calidad de servicio (QoS) o diagnósticos en zonas con cobertura inestable.

Similar al RSSI, el RSRP se manifiesta en valores negativos y puede presentar leves fluctuaciones dependiendo del fabricante del equipo o del chipset empleado. No obstante, normalmente se percibe una señal RSRP superior a -80 dBm como buena, entre -80 dBm y -100 dBm como aceptable, y si disminuye a -100 dBm , se categoriza como débil. Por su exactitud y enfoque, el RSRP se destaca como una herramienta más confiable que las barras de señal del móvil o incluso que el RSSI, especialmente en contextos donde se necesita un diagnóstico y optimización técnica minuciosa (AntenasTelco).

- Calidad de la señal de referencia recibida (RSRQ)

El RSRQ es otra medida utilizada en redes LTE que combina la intensidad de la señal y la calidad de la señal de referencia. Se calcula dividiendo el RSRP entre el RSSI, lo que proporciona una relación que indica la calidad de la señal en relación con el ruido y la interferencia. Los valores de RSRQ oscilan entre $-19,5\text{ dB}$ (mala calidad) y -3 dB (calidad excelente) (Henriksson, 2024). El RSRQ es particularmente útil para evaluar la calidad general de la conexión y a menudo se utiliza junto con RSRP para tomar decisiones informadas sobre el rendimiento y la optimización de la red.

Tabla 5. Medida, rango y rendimiento de los parámetros de una señal

Medida	Rango de valores	Rendimiento de la conectividad
RSSI	-100 dBm a 0 dBm	Intensidad de la señal general; valores más altos indican señales más fuertes.
RSRP	-140 dBm a -44 dBm	Específico de LTE; valores más altos indican una potencia de señal de referencia más fuerte.
RSRQ	-19,5 dB a -3 dB	Específico de LTE; valores más altos indican una mejor calidad de señal en relación con el ruido y la interferencia.

Fuente: (Brio, 2022)

- Parámetro relación señal-ruido (SNR)

El SNR hace referencia a la relación entre la intensidad de la señal y la intensidad del ruido en un sistema, normalmente representada en decibelios *dB*. El decibelio es una unidad que representa la variación relativa de potencia o intensidad, usualmente entre dos señales eléctricas o acústicas, equivalente a diez veces el logaritmo común de la relación entre ambos niveles. Una señal es una magnitud electrónica que procede del exterior de un aparato y que este debe procesar (CISCO, 2025).

El ruido hace referencia a señales adicionales irregulares que no se encuentran en las señales iniciales producidas por un aparato. Las señales de ruido están vinculadas con el ambiente y no se alteran conforme se modifican las señales iniciales. La distorsión también representa una señal adicional que no se encuentra en las señales iniciales producidas por un aparato. Cabe señalar que existe una relación real entre la distorsión y el ruido. La distinción entre la distorsión y el ruido radica en que la distorsión es constante, en cambio, el ruido es irregular (Minghui, 2025).

La relación señal-ruido (SNR) se calcula utilizando la ecuación (18):

$$SNR = 10 \lg \frac{P_S}{P_N} \quad (18)$$

Donde:

SNR: relación señal-ruido, en dB

P_S : potencia efectiva de la señal

P_N : potencia efectiva de las señales de ruido

2.4.2. Modelos de propagación

- Modelo de propagación de Hata

El análisis de propagación de ondas electromagnéticas en zonas urbanas y rurales es fundamental para la implementación de cualquier red inalámbrica. Considerando que las señales experimentan atenuaciones y pérdidas al trasladarse desde el emisor hasta el receptor, se han creado varios modelos empíricos para calcular la pérdida de trayectoria (path loss) en diversos contextos. El modelo de Hata, su ampliación Okumura-Hata y la adaptación para frecuencias más amplias denominada COST-231, son algunos de los más empleados (Quistial, 2016).

El modelo de Hata se creó en 1980 como una simplificación matemática del modelo empírico de Okumura, que se puede aplicar a frecuencias comprendidas entre 150 y 1500 MHz.

Es frecuentemente empleado en contextos urbanos por su exactitud y sencillez de aplicación. Para áreas suburbanas y rurales, se aplican factores de corrección adicionales. El modelo es limitado para frecuencias mayores a 1500 MHz.

Este modelo se basa en datos obtenidos experimentalmente y proporciona una estimación de la pérdida media de propagación a partir de la pérdida en espacio libre como se mencionó, incorporando factores de corrección que dependen de la altura de las antenas, y el tipo de entorno y la topografía del terreno. El modelo se expresa en la ecuación (19) (Quistial, 2016):

$$L_{50} \text{ (dB)} = L_F + A_{mu}(f, d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G_{AREA} \quad (19)$$

Donde:

L_{50} (dB): Valor medio de la pérdida de trayectoria de propagación.

L_F : Pérdidas de propagación en el espacio libre.

$A_{mu}(f, d)$: Atenuación media relativa del espacio libre

$G(h_{te})$: Factor de ganancia de la altura de la antena de transmisión.

$G(h_{re})$: Factor de ganancia de la altura de la antena móvil

G_{AREA} : Ganancia debida al tipo de entorno (factor de corrección).

La principal desventaja del modelo es su lenta respuesta a los cambios rápidos en el terreno, por lo tanto, el modelo presenta un desempeño adecuado en áreas urbanas y suburbanas, mientras que su precisión disminuye en áreas rurales.

- Modelo Okumura-Hata

El modelo Okumura-Hata es un amplio desarrollo del modelo anterior, fundamentado en las mediciones de Okumura llevadas a cabo en Tokio, que se extendieron desde 100 MHz hasta 1920 MHz. Okumura presentó uno de los modelos más empleados para la predicción de la pérdida de propagación en zonas urbanas (Quistial, 2016). El principal hallazgo de la investigación de Okumura fue un conjunto de curvas que indican el nivel medio de atenuación en relación con el espacio libre, basándose en la frecuencia, la distancia entre el emisor y el receptor, la altura de las antenas en la estación base y la estación móvil, así como varios factores de corrección específicos para distintos tipos de terreno (Xirio, 2025). Este modelo empírico se deriva de las curvas obtenidas por Okumura.

Para facilitar la aplicación de este método, Hata definió una serie de relaciones numéricas que detallan el método gráfico sugerido por Okumura. Estas expresiones de naturaleza empírica se conocen como modelo de Okumura-Hata, también conocido como modelo de Hata. La diferencia principal reside en la capacidad de adaptación a áreas concretas, modificando el parámetro $a(h_r)$ y utilizando diversos factores dependiendo de la densidad de construcciones o la topografía geográfica (Okumura, Ohmori, Kawano, & Fukuda). Es uno de los modelos más utilizados en la planificación de redes móviles analógicas y celulares (Quistial, 2016).

Es válido para:

- Frecuencias entre 150 MHz y 1500 MHz
- Altura de la antena transmisora (estación base) entre 30 m y 200 m
- Altura de la antena receptora (móvil) entre 1 m y 10 m

- Distancias entre 1 km y 20 km

La fórmula estándar para el cálculo de las pérdidas medias de trayectoria del modelo Okumura-Hata se expresa a través de la ecuación (20):

$$L_p(dB) = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + [44.9 - 6.55 \log(h_{te})] \log(d) \quad (20)$$

Donde:

$a(h_{re})$ = Es el factor de corrección para la altura de la antena móvil o receptora la cual está en función del tamaño de la zona de cobertura (Quistial, 2016).

Para una ciudad de pequeño a medio tamaño, el factor de corrección de la antena móvil $a(h_{re})$ está dado por medio de la ecuación (21):

$$a(h_{re}) = [1.1 \log(f_c) - 0.7] h_{re} - [1.56 \log(f_c) - 0.8] \quad (21)$$

Y para una ciudad grande el factor de corrección $a(h_{re})$ está dado por (Quistial, 2016):

Para $f_c \leq 300 \text{ MHz}$:

$$a(h_{re}) = 8.29[\log(1.54 \cdot h_{re})]^2 - 1.1$$

Para $f_c \geq 300 \text{ MHz}$:

$$a(h_{re}) = 3.2[\log(11.75 \cdot h_{re})]^2 - 4.97$$

2.4.3. Herramientas de medición

- G-NetTrack

Es una aplicación de monitorización de red y prueba de cobertura para redes 4G/3G/2G. Permite monitorizar y registrar información sobre las celdas vecinas y las que sirven a la red móvil sin necesidad de equipos especializados. Es una herramienta versátil, utilizada para comprender mejor la red o para aprender más sobre redes inalámbricas (Solutions Gyokov, 2025).



Figura 12. Aplicación G-NetTrack Lite

En la Figura 12 se pueden observar los datos que esta aplicación entrega en el dispositivo y se aprecia que presenta datos de la red, señal, antenas y distancias, por ejemplo: MCC (Mobile Country Code), MNC (Mobile Network Code), CID (Identificador de Celda), Tipo de red, RSRP (Reference Signal Received Power), RSRQ (Reference Signal Received Quality), SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) (Curipallo, 2022), entre otros que se enumeran a continuación:

- **Timestamp:** Tiempo en que se realizó la muestra.
- **Longitud y Latitud:** Coordenadas GPS del dispositivo móvil.
- **Velocidad:** Velocidad del dispositivo móvil expresada en km/h.

- **Operador:** Nombre de la operadora celular.
- **Cell ID:** Celda que da servicio al dispositivo móvil.
- **Type:** Estándar de comunicación móvil (2G/3G/4G).
- **RSSI:** Representa la potencia recibida, que incluye la señal de la celda de servicio, la interferencia y el ruido de otras fuentes.
- **RSRP:** Representa una potencia promedio sobre los símbolos de referencia específicos.
- **RSRQ:** Representa una relación entre RSRP y el indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI).
- **SNR:** Valor de la relación señal/ruido (dB).
- **DL_bitrate:** tasa de descarga medida en el dispositivo, expresada en kbps.
- **UL_bitrate:** tasa de enlace ascendente medida en el dispositivo, expresada en kbps.

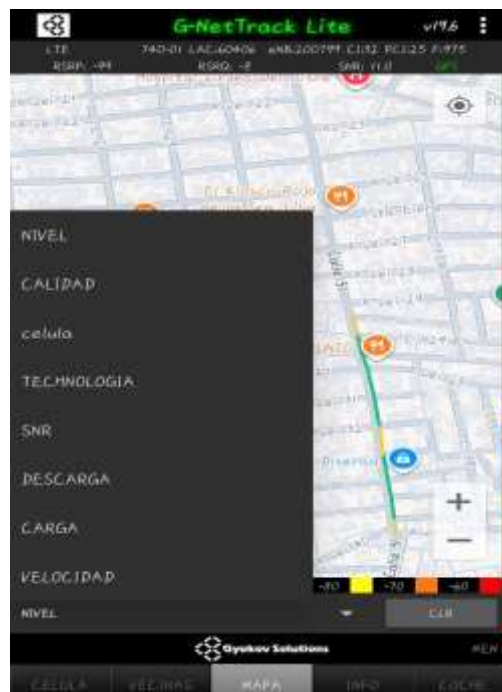


Figura 13. Menú de visualización cartográfica para métricas de calidad de señal (RSRP, RSRQ y SNR)

Una de las ventanas más importantes de la aplicación es el apartado “MAPA”, tal y como se ilustra en la Figura 13, ya que permite capturar datos en pruebas de campo. En esta sección se visualizan, mediante una escala de colores, los diferentes niveles de la señal; en ese mismo sentido, presenta la opción de seleccionar qué parámetro se desea observar durante la medición (Curipallo, 2022).

2.5.Componentes para mitigar los problemas de propagación

Como se mencionó en los apartados anteriores, la propagación de las señales en redes LTE puede tener problemas por varios factores, como obstáculos físicos, ambientales o la distancia de la antena o torre. Esta problemática puede ocasionar interferencia, pérdida de potencia y reducción de la calidad del servicio (Q o S). Para mitigar estos efectos, existen técnicas físicas y eléctricas, las cuales contrarrestan y mejoran los niveles de la señal, la cobertura y su ancho de banda, considerando su frecuencia de operación, polarización y función deseada.

2.5.1. Antenas direccionales tipo Yagi

Este tipo de antenas son elementos pasivos y, comúnmente, direccionales, es decir, presentan alta directividad, concentrando la energía en una dirección específica, este componente direcciona, recepta y transmite la señal, son conocidas por trabajar en un rango específico de frecuencia, en el contexto de su polarización este puede ser tanto vertical como horizontal dependiendo del entorno y del trabajo que se quiera lograr, otros beneficios que ofrece la antena son la alta ganancia direccional y un ancho de banda amplio (Hernández, 2026). Estas antenas no requieren de energía eléctrica para su funcionamiento.

Tabla 6. Características de antenas Yagi

Frecuencia:	700 MHz
Polarización	Puede ser vertical u horizontal, dependiendo el entorno
Ubicación:	Antena externa ubicada en el exterior de una casa, edificio o lugar de donde se quiera receptar la señal (Morin, 2012)
Ganancia:	Entre 8 a 13 dBi

Fuente: (Tavtechsolutions, 2024)



Figura 14. Antena direccional Yagi

2.5.2. Antenas panel LTE con soporte MIMO

Este tipo de antenas están diseñadas para trabajar en sistemas móviles como LTE y 5G, ajustadas para el uso de la tecnología *MIMO* (*Multiple Input Multiple Output*), permitiendo mejorar problemáticas al momento de la recepción o transmisión de señal, la eficiencia espectral y su desempeño en diferentes canales (multitrayecto), mejorando la velocidad, cobertura y manejo de datos, amplificando la señal débil.

Tabla 7. Características del panel LTE con soporte MIMO

Frecuencia	698-960 MHz y 1710-2700 MHz; 2100 MHz, 2600 MHz, 7 GHz, 8 GHz, 9 GHz, 18 GHz
Polarización	Doble polarización $\pm 45^\circ$
Ubicación	Antena exterior con vista despejada, sobre mástil o soporte orientable
Ganancia	Entre 6 y 10 dBi

2.5.3. Amplificadores de señal LTE

Los equipos como el amplificador LTE son activos, es decir, requieren energía eléctrica para su funcionamiento, también requieren de una supervisión por parte de Arcotel. Estos componentes eléctricos usan circuitos que trabajan con energía eléctrica y se encargan de aumentar la amplitud de una señal de entrada débil receptada, aumentando su salida y retransmitiendo la señal de forma idéntica, asegurando una buena calidad (Smith, 2023). El uso de estas técnicas permite mitigar las problemáticas que limitan la cobertura LTE, especialmente en áreas rurales.

Tabla 8. Características de amplificadores LTE

Frecuencia	2,4 GHz y 5 GHz
Polarización	Va a depender de su antena externa
Ganancia	45 a 70 dB

2.5.4. Amplificador de bajo ruido (LNA)

El amplificador de bajo ruido (LNA) es un dispositivo electrónico utilizado en sistemas de radiofrecuencia para amplificar señales débiles en la etapa de recepción, minimizando la

degradación de la relación señal a ruido (SNR). Generalmente se ubica en la entrada del receptor, con el objetivo de preservar la calidad de la señal antes de su procesamiento.

Tabla 9. Características del amplificador de bajo ruido

Parámetro	Valor típico
Frecuencia de operación	700 MHz – 2.6 GHz
Ganancia	10 – 30 dB
Figura de ruido	0.5 – 2 dB
Tipo de dispositivo	Activo
Ubicación	Etapas de recepción (front-end RF)
Impedancia	50 Ω

2.5.5. Amplificador monobanda

El amplificador monobanda es un dispositivo activo diseñado para operar en una única banda de frecuencia específica, amplificando señales de radiofrecuencia (RF) dentro de un rango determinado. Se emplea en entornos donde la frecuencia de operación es conocida, permitiendo una amplificación más selectiva y con menor interferencia fuera de banda.

Tabla 10. Características del amplificador monobanda

Parámetro	Valor típico
Frecuencia de operación	Banda específica (ej. 700 MHz o 850 MHz)
Ganancia	60 – 70 dB

Tipo de dispositivo	Activo
Modo de operación	Bidireccional (uplink / downlink)
Cobertura	100 – 300 m ²
Selectividad	Alta (filtrado en una sola banda)
Impedancia	50 50 Ω

2.5.6. Amplificador triple banda

El amplificador opera como un sistema de repetición bidireccional, compuesto por una antena externa, una unidad amplificadora y una antena interna. La antena externa capta la señal proveniente de la estación base, la cual es amplificada y retransmitida en el área de cobertura mediante la antena interna. De forma simultánea, el sistema amplifica la señal en sentido inverso (uplink), permitiendo la comunicación entre los dispositivos del usuario y la red celular.

Tabla 11. Características del amplificador triple banda

Parámetro	Especificación
Ganancia máxima	70 dB
Ganancia uplink	65 dB
Bandas de operación (uplink)	698–716 / 824–849 / 1850–1910 MHz
Bandas de operación (downlink)	728–746 / 869–894 / 1930–1990 MHz
Tecnologías soportadas	LTE, HSPA+, CDMA, WCDMA, GSM, EDGE
Modo de operación	Full-Duplex

Impedancia	50 Ω
Tipo de conector	N-hembra
Figura de ruido	Bajo ruido (LNA integrado)
Compatibilidad	Operadores móviles (según bandas disponibles)

Tabla 12. Comparativa de tipos de amplificadores

Parámetro	LNA	Amplificador monobanda	Amplificador multibanda
Función principal	Amplificación en la recepción (etapa interna)	Amplificación en una sola banda	Amplificación completa de cobertura
Tipo de sistema	Componente RF	Repetidor RF	Repetidor RF multibanda
Bandas de operación	Amplio rango (no selectivo de sistema)	Una sola banda	Múltiples bandas (700/850/1900 MHz)
Ganancia	10 – 30 dB	60 – 70 dB	65 – 70 dB
Aplicación	Etapas internas del receptor	Entornos controlados	Entornos reales con múltiples operadores
Cobertura	No aplica	Media	Alta
Implementación	No funciona como sistema independiente	Limitada a una banda	Flexible y adaptable

A partir de la comparación realizada en la Tabla 12, se determina que el amplificador multibanda representa la solución más adecuada para el presente proyecto, debido a su capacidad de operar en múltiples bandas de frecuencia y mejorar la cobertura de manera integral. A diferencia del amplificador de bajo ruido (LNA), que constituye una etapa interna de recepción, y del amplificador monobanda, que se limita a una única frecuencia, el booster ofrece mayor flexibilidad y adaptabilidad en entornos rurales donde la disponibilidad de la señal puede variar según el operador y la banda de operación.

2.6. Sistemas fotovoltaicos para telecomunicaciones

En el ámbito de las telecomunicaciones, particularmente en áreas rurales o de acceso complicado, es crucial seleccionar una fuente de energía confiable y sostenible. Las tres alternativas más relevantes consideradas para este objetivo son la energía solar fotovoltaica, la energía eólica y la energía térmica a través de generadores diésel. Cada una de estas tecnologías tiene beneficios y restricciones dependiendo de varios elementos técnicos, financieros y medioambientales (Alonso, 2025).

2.6.1. Evaluación técnica de tecnologías renovables

- Energía fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica consiste en transformar directamente la radiación solar en energía eléctrica a través de la utilización de semiconductores. Esta tecnología ha llegado a una madurez significativa y se ha establecido como una opción factible debido a su naturaleza modular, su mantenimiento reducido y su capacidad para funcionar de forma autónoma en zonas aisladas o en reemplazo de tecnologías convencionales fundamentadas en combustibles fósiles (Enelx).

- Energía eólica

La energía eólica transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica a través de aerogeneradores, y representa una alternativa limpia y renovable que no genera emisiones perjudiciales, ya que se nutre de una fuente de energía ecológica. Los componentes requeridos para la construcción de los aerogeneradores son sencillos y contemporáneos (GrupoNap, 2007).

Aunque es una buena opción, hay que tener en cuenta que tiene una dependencia esencial de las condiciones geográficas y climáticas. La producción eólica es extremadamente fluctuante y su máximo rendimiento solo se logra en áreas con vientos estables y de velocidad apropiada, ya que depende de la naturaleza y sus variaciones (Institute Aprende, 2019).

- **Energía térmica**

La energía térmica es la energía interna de un cuerpo debido al movimiento de sus partículas. Cuando existe una diferencia de temperatura entre dos sistemas, ocurre un fenómeno llamado transferencia de calor, donde la energía fluye del cuerpo con mayor temperatura al de menor temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico. Este flujo de energía puede ocurrir a través de tres mecanismos fundamentales: la conducción, por contacto directo entre partículas; la convección, mediante el movimiento de fluidos como líquidos o gases; y la radiación, que permite el transporte de energía a través de ondas electromagnéticas, siendo esta la forma en que se aprovecha el calor proveniente del Sol incluso a través del vacío (Endesa, 2025).

A continuación, se presenta una tabla comparativa que muestra las principales características de cada una de las tecnologías renovables analizadas:

Tabla 13. Comparativa de la energía fotovoltaica frente a otras energías renovables

Criterio	Solar fotovoltaica	Solar térmica	Eólica
Fuente	Luz solar	Calor del sol	Viento
Conversión	Luz: electricidad (directa)	Calor: calor de agua o electricidad (indirecta)	Movimiento: electricidad

Eficiencia real	15–22 %, suficiente para aplicaciones pequeñas	Alta para calor; requiere conversión adicional para electricidad	Mayor, pero variable por velocidad del viento
Dependencia del clima	Afectada por nubosidad	Requiere alta radiación directa	Requiere viento constante
Aplicación ideal	Zonas remotas, sistemas aislados, bajo consumo	Calefacción, agua caliente, plantas grandes	Grandes parques eólicos, zonas con viento fuerte
Instalación	Sencilla, modular, adaptable a techos o torres	Más compleja (tuberías, sistemas de fluido)	Requiere torres altas y estudios de viento
Consideración clave	Genera electricidad directamente, ideal para electrónica	Solo calor o conversión compleja a electricidad	Inviabile si no hay viento constante

Después del análisis, la investigación y la comparación de las energías renovables, se concluye que la energía solar permite dimensionar sistemas de distinta capacidad según la demanda energética, lo que la convierte en una alternativa favorable, tal como destaca el Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación “la energía solar se ha consolidado como una solución efectiva para alimentar repetidores de telecomunicación en ubicaciones elevadas como cerros y colinas, donde resulta inviable implementar otras fuentes de energía por razones logísticas y económicas”, en conclusión, es la energía más factible para usarla en el prototipo.

2.6.2. Dimensionamiento energético: cálculo de consumo y autonomía

El dimensionamiento energético constituye la fase analítica donde se equilibra la demanda eléctrica del equipo de telecomunicaciones con la capacidad de generación fotovoltaica. Para un

amplificador LTE, el cálculo de consumo debe basarse en un régimen de operación continua, considerando tanto la potencia nominal del dispositivo como las pérdidas por transporte de energía.

- Consumo energético

El consumo energético de un amplificador LTE se determina en función de su potencia de operación y del tiempo que permanece activo. Para obtener el consumo en vatios-hora (Wh) se usa la fórmula (22):

$$Energía (Wh) = Potencia (W) \times Tiempo (h) \quad (22)$$

En sistemas de telecomunicaciones, la potencia de un amplificador puede variar, pero típicamente se encuentra entre 5 W y 50 W, dependiendo del modelo y el nivel de ganancia. Por ejemplo, si un amplificador LTE consume 12 W en operación continua y funciona durante 24 horas al día, su consumo diario será de:

$$12 W \times 24 h = 288 Wh/día$$

Este valor es esencial para dimensionar la cantidad de energía necesaria que debe suministrar el sistema fotovoltaico. También se debe considerar una eficiencia promedio, por ejemplo, un 85 % debido a pérdidas térmicas o conversión.

- Disponibilidad solar

La Hora Solar Pico (HSP) es una unidad que mide la irradiación solar (energía) en condiciones ideales. Técnicamente, se define como el tiempo (en horas) durante el cual una irradiación constante de 1000 W/m² incide sobre una superficie. En otras palabras, la HSP es la

cantidad de energía solar que equivaldría a tener el sol brillando con intensidad “pico” durante ese período (Insoelec Solar, 2025). Este parámetro es un factor crítico en el dimensionamiento del sistema fotovoltaico para el amplificador, ya que actúa como el puente de conversión entre un lugar específico y la capacidad de generación nominal de los módulos fotovoltaicos. Al utilizar las HSP, es posible determinar con precisión la potencia pico necesaria para satisfacer la demanda energética del sistema, garantizando su operatividad bajo los niveles de radiación específicos de la zona de implementación.

- Autonomía energética

La autonomía energética se define como la capacidad de un sistema para operar de manera ininterrumpida sin depender de la red eléctrica convencional. En un sistema de amplificación LTE alimentado por energía fotovoltaica, esta condición se garantiza mediante la gestión equilibrada de tres pilares fundamentales:

- Volumen del banco de baterías.
- Paneles solares eficientes.
- Uso de energía del sistema (amplificador, enrutador, cámara y punto de acceso).

Para alcanzar la autonomía, primero se determina la demanda de energía del sistema en vatios-hora (Wh) diarios. Después se eligen paneles solares que puedan generar esa cantidad de energía, considerando las pérdidas por eficiencia (que varían entre un 10 % y un 30 %, dependiendo del diseño). Finalmente, se proyecta un banco de baterías capaz de sostener la operación durante días de respaldo (típicamente de 1 día), garantizando el servicio en condiciones de nubosidad o baja irradiación.

En el marco del proyecto en la UPSE, donde se presenta irradiación continua y el uso de energía del sistema amplificador LTE es relativamente reducido (entre 5W y 15W continuos), una configuración habitual para la autonomía podría abarcar:

- Panel solar de 50 a 100 Wp.
- Batería de gel o litio de 12 V / 55 Ah.
- Regulador de carga solar PWM.
- Sistema de respaldo para vigilancia.

Cabe mencionar que, para determinar la capacidad requerida del banco de baterías, se aplica matemáticamente la ecuación (23):

$$Capacidad\ requerida\ bateria(Wh) = \frac{consumo\left(\frac{Wh}{día}\right) \times días\ de\ respaldo}{Profundidad\ de\ descarga(DoD)} \quad (23)$$

Donde:

Wh/día (Consumo): Es el total de energía que consumen los equipos.

Días de Respaldo (Autonomía): Cuántos días se requiere que el sistema funcione sin sol.

Profundidad de Descarga (DoD - Depth of Discharge): Es el porcentaje de energía de la batería que se puede utilizar de forma segura.

- Se expresa en decimales (ej. 50% = 0.5, 80% = 0.8).
- Plomo-Ácido/GEL: Generalmente 50% (dividir entre 0.5).
- Litio (LiFePO4): Generalmente 80% o más (dividir entre 0.8).

Este método asegura que el sistema permanezca en funcionamiento 8 horas laborables, incluso en periodos de ausencia de radiación, asegurando estabilidad y confiabilidad en la cobertura LTE ampliada.

2.6.3. Selección de paneles solares

Los paneles solares fotovoltaicos son fundamentales para los sistemas de producción de energía solar y se clasifican principalmente en tres categorías según el tipo de material utilizado: monocristalina, policristalina y de capa delgada. Esta categorización tiene un impacto directo en la eficiencia, el costo, la durabilidad y la aptitud para diversas aplicaciones, incluyendo la provisión de energía para infraestructuras de telecomunicaciones.

Todos los modelos de paneles solares tienen los mismos principios de operación fundamentados en el efecto fotovoltaico, lo que significa que las fórmulas esenciales para evaluar su eficiencia eléctrica son idénticas. Hay que tener en cuenta que los resultados van a variar dependiendo del tipo de panel que se vaya a usar, lo que influye en la eficiencia, la generación neta de energía y la sensibilidad a factores externos como la temperatura.

$$P = V \cdot I \quad (24)$$

Una de las principales expresiones es la de la potencia, que se presenta en la ecuación (24) y permite determinar la potencia eléctrica generada por un módulo, esta relación directa permite calcular la energía que entrega el panel bajo condiciones específicas (Luque López & Hegedus, 2003).

$$\eta = \frac{V \times I}{G \times A} \quad (25)$$

De igual modo, para poder representar el rendimiento de diversos tipos de paneles se tiene la ecuación (25), la cual representa la eficiencia de conversión de los paneles, donde η representa la eficiencia del módulo, G es la irradiancia solar (W/m^2) y A el área del panel (m^2). Por ejemplo, los módulos policristalinos alcanzan eficiencias del 15 %, mientras que los de capa delgada presentan valores cercanos al 12 % (Cano, 2010).

Estas fórmulas son fundamentales para valorar el rendimiento de diversos tipos de paneles dependiendo del ambiente y su uso, y ofrecen un fundamento cuantitativo para la correcta elección tecnológica. A continuación, en la Tabla 14 se muestra una comparativa de energía renovable y energía tradicional:

Tabla 14. Comparativa de la energía renovable frente a la energía tradicional

Aspecto	Energía renovable	Energía tradicional
Fuente	Natural e inagotable	Fósil y limitada
Impacto ambiental	Bajo o nulo	Alto (emisiones y contaminación)
Disponibilidad	Constante (depende del entorno)	Sujeta a agotamiento
Costos futuros	Disminuyen con el tiempo	Altos y variables
Sostenibilidad	Alta	Baja

- **Justificación técnica y tipos de paneles**

- Panel monocristalino

El panel solar monocristalino posee excelentes propiedades técnicas para climas que suelen tener nubes, tormentas y temperaturas máximas no muy elevadas. Un panel solar se elabora con silicio y consta de diversas celdas fotovoltaicas que se vinculan eléctricamente en serie y paralelo. Como señala el nombre de esta tecnología, los paneles solares monocristalinos se componen de celdas de un único cristal (Méndez & López, 2012).

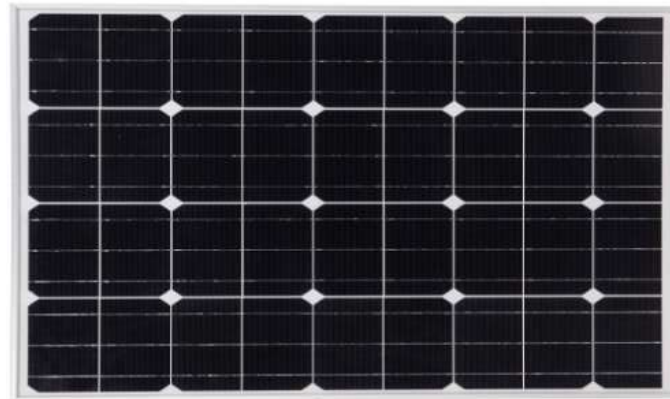


Figura 15. Panel monocristalino

Fuente: (Méndez & López, 2012)

Tabla 15. Características técnicas de las placas fotovoltaicas monocristalinas

PARÁMETRO	Valor típico	DESCRIPCIÓN
Potencia nominal (Pmax)	400 W	Potencia máxima que puede generar bajo condiciones estándar
Eficiencia del módulo	20 %	Relación entre energía solar captada y energía eléctrica generada
Tensión en operación (Vmp)	30 – 40 V	Voltaje en condiciones de funcionamiento óptimo

Corriente en operación (Imp)	10 – 12 A	Corriente típica de salida en operación
Dimensiones	1.75 m × 1.05 m	Tamaño estándar de un panel de 400 W
Peso	20 – 23 kg	Peso promedio del panel
Número de celdas	144 (half-cell)	Número de celdas partidas para reducir pérdidas
Material del marco	Aluminio anodizado	Proporciona resistencia y rigidez
Material de la cubierta frontal	Vidrio templado	Protege las celdas contra golpes y condiciones climáticas
Vida útil	25 – 30 años	Periodo en el que mantiene al menos el 80 % de su capacidad inicial
Tolerancia de potencia	0 a +5 W	Puede generar hasta un 5 % adicional respecto al valor nominal, sin presentar valores inferiores
Aplicación común	Viviendas, sistemas aislados, techos	Recomendado en instalaciones con espacio reducido que requieren alta eficiencia

➤ Panel policristalino

Los módulos policristalinos se componen de fragmentos de silicio unidos, generando así varios cristales en la misma célula. A pesar de que su eficiencia es ligeramente inferior a la de los monocristalinos (entre el 15 % y el 18 %), su método de producción es más sencillo y económico. Esto los hace una alternativa competitiva en cuanto a costo-beneficio, particularmente en aplicaciones donde el espacio no representa una limitación esencial.

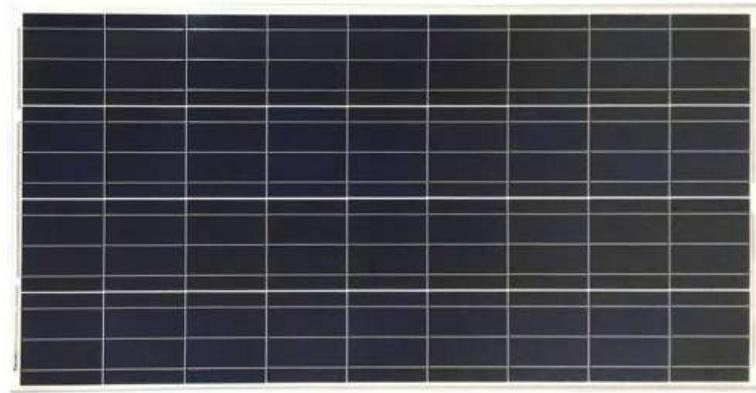


Figura 16. Panel policristalino

Fuente: (Méndez & López, 2012)

Tabla 16. Características técnicas de las placas fotovoltaicas policristalinas

PARÁMETRO	VALOR TÍPICO	DESCRIPCIÓN
Potencia nominal (Pmax)	330 – 350 W	Potencia máxima en condiciones estándar
Eficiencia del módulo	15 % – 17 %	Menor que el monocristalino, pero suficiente para muchas aplicaciones
Tensión en operación (Vmp)	36 – 38 V	Voltaje nominal del módulo
Corriente en operación (Imp)	8 – 9 A	Corriente típica de salida
Dimensiones	1.95 m × 1.00 m	Ligeramente más grande que uno monocristalino de similar potencia
Peso	19 – 22 kg	Peso promedio del panel
Número de celdas	72 celdas	Generalmente en formato rectangular
Material del marco	Aluminio anodizado	Estructura estándar
Cubierta frontal	Vidrio templado	Protege contra intemperie
Vida útil	20 – 25 años	Ligeramente menor que la del monocristalino
Tolerancia de potencia	0 a +5 W	No genera menos de lo indicado
Aplicación común	Viviendas rurales, techos amplios	Útil donde hay espacio y se busca bajo costo

➤ Panel de capa fina

Los módulos de capa fina (thin film) emplean materiales como el telururo de cadmio (CdTe), el silicio amorfo (a-Si) o el diseleniuro de cobre, indio y galio (CIGS). Estos paneles tienen el beneficio de ser flexibles, livianos y de costo de producción reducido, aunque su eficiencia es notablemente inferior (entre el 10 % y el 13 %). Son apropiados para instalaciones de gran tamaño y donde la estética, el peso o la integración arquitectónica son elementos de mayor importancia. Por otro lado, su desempeño bajo condiciones de luz escasa y altas temperaturas es más estable que el de los paneles de silicio cristalino.



Figura 17. Panel de capa fina

Fuente: (Méndez & López, 2012)

Tabla 17. Características técnicas de las placas fotovoltaicas de capa fina

Parámetro	Valor típico	Descripción
Potencia nominal (Pmax)	70 – 150 W	Potencia baja, se compensa instalando más área
Eficiencia del módulo	7 % – 10 %	Mucho menor que los paneles de silicio cristalino

Tensión en operación (V _{mp})	18 – 22 V	Voltaje nominal por módulo
Corriente en operación (I _{mp})	3 – 6 A	Corriente más baja
Dimensiones	Varían (flexibles o rígidos)	Se adaptan según el uso (pueden ser flexibles, enrollables, etc.)
Peso	12 – 18 kg	Livianos en comparación a los cristalinos
Número de celdas	No aplica (estructura continua)	No tienen celdas visibles, el material es uniforme
Material base	Silicio amorfo, CdTe, CIGS	Materiales semiconductores con propiedades fotovoltaicas
Cubierta frontal	Vidrio delgado o plástico flexible	Puede ser muy delgado y liviano
Vida útil	10 – 20 años	Menor durabilidad
Tolerancia de potencia	-3 % a +5 %	Puede tener margen negativo
Aplicación común	Superficies grandes, industria, techos curvos	Útiles donde hay espacio o necesidad de ligereza/flexibilidad

➤ **Comparación con otros tipos de paneles**

Tabla 18. Placas fotovoltaicas frente a placas térmicas

Aspecto	Placas solares fotovoltaicas	Placas solares térmicas
Tipo de energía generada	Energía eléctrica	Energía térmica (calor)

Funcionamiento	Convierte la luz solar directamente en electricidad mediante células de silicio	Calienta un fluido que transfiere el calor al sistema de calefacción o agua caliente
Eficiencia típica	15 % – 22 % (según tecnología)	Hasta 80 % para calentar agua
Componentes principales	Módulos fotovoltaicos, inversor, regulador, baterías (opcional)	Colector solar, circuito hidráulico, intercambiador de calor, acumulador
Tipos comunes	Monocristalinos, policristalinos, amorfos	Colectores de baja, media y alta temperatura
Aplicación principal	Generación eléctrica para consumo, iluminación, equipos electrónicos	Calentamiento de agua sanitaria, calefacción, generación de vapor en plantas industriales
Uso en climas cálidos	Buena respuesta, aunque puede reducir rendimiento por exceso de temperatura	Muy útil, especialmente en zonas con alta radiación y necesidad de agua caliente
Costo inicial	Medio a alto, dependiendo del tipo y la potencia instalada	Medio, dependiendo del tipo de colector y sistema
Mantenimiento	Bajo a medio	Medio, requiere revisar fluido, aislamiento y posibles fugas
Vida útil estimada	25 – 30 años	15 – 25 años, dependiendo del sistema

- **Panel seleccionado**

Para la creación del sistema fotovoltaico sugerido, se optó por emplear paneles solares policristalinos, por su adecuada relación costo-beneficio en la transformación de la radiación solar en energía eléctrica. Este tipo de tecnología se distingue por ser producida a partir de múltiples

fragmentos de silicio fundido y recristalizado, lo que le confiere una estructura cristalina múltiple y le permite alcanzar eficiencias de conversión que oscilan entre el 15 % y el 17 % en condiciones estándar de prueba (STC).

La selección de esta tecnología es particularmente apropiada para el contexto de Ecuador, dado que la nación está situada en la región ecuatorial, asegurando así una elevada disponibilidad de radiación solar a lo largo de todo el año. Esta condición favorece un desempeño óptimo/favorable de los módulos policristalinos, que ofrecen un rendimiento estable en situaciones de alta irradiancia directa, sumando a un costo de fabricación más bajo en comparación con los otros paneles, lo que los convierte en una excelente opción cuando se busca optimizar la relación entre inversión inicial y generación de energía.

Además, aunque los módulos policristalinos presentan una densidad energética ligeramente menor que los monocristalinos, su menor costo por vatio instalado los hace especialmente convenientes para proyectos donde el espacio disponible no representa una limitante. Por lo tanto, se sostiene que la utilización de paneles policristalinos optimiza el uso del sol y asegura un rendimiento energético y económico superior a largo plazo en la región de Ecuador.

2.7. Integración técnica: Presupuesto de enlace y estabilidad de señal

2.7.1. Presupuesto de enlace

El presupuesto de enlace (link Budget), es un cálculo esencial en los sistemas de comunicación inalámbrica que facilita la estimación de cuánta potencia de señal se transmitirá al receptor tras completar el camino desde el emisor, teniendo en cuenta todas las ganancias y pérdidas que se produzcan en el enlace. Este estudio es esencial en la planificación de redes

móviles, pues garantiza que las señales alcancen el nivel suficiente para ser correctamente decodificadas, previniendo interrupciones o pérdidas de calidad en la conexión (Kukushkin, 2018).

Dentro del marco de redes móviles 4G LTE que funcionan en el espectro UHF, usualmente entre 700 MHz y 900 MHz, el cálculo del presupuesto de enlace facilita la determinación de si la cobertura de una celda es apropiada, particularmente en áreas rurales o con condiciones de propagación complicadas. La banda UHF, debido a su superior capacidad de penetración en estructuras y su excelente propagación a grandes distancias, se convierte en estratégica en situaciones donde la señal requiere superar barreras físicas o extensas áreas geográficas. No obstante, esta banda no está libre de pérdidas, por lo que el equilibrio preciso entre el beneficio y la atenuación es crucial para el desempeño de un sistema LTE. En la **ecuación (1)** se presenta la fórmula utilizada para su cálculo.

El resultado de este presupuesto permite validar la viabilidad del enlace y establecer si es necesario mejorar la ganancia del sistema, aumentar la potencia de transmisión o reducir pérdidas.

2.7.2. Ganancia de antenas dBi

La ganancia de una antena se refiere a su capacidad para concentrar la energía radiada en una dirección particular, en contraste con una antena isotrópica ideal. Se manifiesta en decibelios isotrópicos (dBi) y es un indicador crucial en los sistemas de comunicación inalámbricos, dado que impacta directamente en la fuerza de la señal que se envía o se recibe (Delta).

En sistemas LTE que funcionan en la banda UHF, es crucial elegir antenas con la ganancia correcta para asegurar un alcance eficaz. Por ejemplo, una antena de alta ganancia posibilita dirigir

la señal hacia el área deseada, lo que resulta particularmente beneficioso en aplicaciones donde se incrementa la cobertura LTE a través de repetidores o amplificadores de señal. En redes rurales alimentadas por energía solar, incrementar esta ganancia permite reducir la potencia del transmisor, optimizando de esta manera el uso de energía (Balanis, 2016). La ganancia isotrópica se calcula mediante la ecuación (26):

$$G(dBi) = 10\log(G) \quad (26)$$

También puede utilizarse la ganancia lineal que se representa en la ecuación (27), cuya finalidad es la relación entre dBd y dBi:

$$GdBi = GdBd + 2.15 \quad (27)$$

Una mayor ganancia resulta en una eficiencia superior en la dirección de propagación deseada, aunque también puede disminuir la cobertura en otras direcciones si no se orienta correctamente. Por esta razón, en amplificadores de señal LTE, es habitual emplear antenas direccionales de alto rendimiento en la entrada y antenas omnidireccionales o paneles de ganancia moderada en la salida.

2.7.3. Potencia de transmisión y recepción

La potencia de transmisión se refiere al volumen de energía eléctrica que un emisor suministra a la antena con el fin de transformarla en energía electromagnética que se propaga al espacio. Por su parte, la potencia de recepción representa el nivel de señal que la antena receptora recoge del ambiente para su posterior procesamiento. Ambos valores resultan fundamentales para

valorar el desempeño de un enlace de comunicación, dado que impactan directamente en la cobertura, la calidad del servicio y la eficiencia del sistema.

Estas potencias varían en función del tipo de dispositivo, la infraestructura existente y el ambiente de propagación. Por ejemplo, las estaciones base macro tienen la capacidad de transmitir a potencias que alcanzan los 40 W, mientras que repetidores o amplificadores de señal diseñados para áreas rurales operan con niveles de potencia sustancialmente más reducidos, entre 0,5 W y 2 W, con el objetivo de conservar energía y minimizar interferencias. No obstante, se puede conservar la eficiencia en la recepción si se realiza un diseño adecuado del sistema de antenas y se ajusta el presupuesto del enlace.

La potencia en dBm se calcula con la ecuación (28):

$$P_{tx} = 10 * \log_{10}(P / 1mW) \quad (28)$$

Para calcular la potencia efectivamente recibida, se recurre a la ecuación del presupuesto de enlace (ecuación (1)), pues es la potencia transmitida ajustada por las ganancias y pérdidas del canal. Esta valoración es especialmente significativa en situaciones donde se emplean amplificadores LTE para ampliar la cobertura en áreas de acceso complicado.

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN

El presente proyecto se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la medición y análisis de parámetros técnicos de la señal inalámbrica, tales como la potencia y calidad de la señal en una red LTE. Asimismo, se trata de una investigación de tipo aplicado, debido a que busca proponer una solución práctica a la problemática de baja cobertura en zonas específicas mediante la implementación de un sistema de amplificación de señal alimentado por energía solar.

3.1. Caracterización del sitio de prueba

La implementación del proyecto se desarrolla en la Universidad Estatal Península de Santa Elena, ubicada en el cantón La Libertad, provincia de Santa Elena. Las pruebas experimentales del sistema se realizaron en los alrededores del laboratorio de la carrera de Telecomunicaciones, mientras que como punto de referencia para la toma de señal LTE se estableció la ubicación geográfica **2°14'01.8"S, 80°52'50.4"W**, situada frente al laboratorio. Desde esta ubicación se reciben señales provenientes de las estaciones base de los operadores Claro, Movistar y CNT, localizadas aproximadamente a 590 m, 771 m y 503 m, respectivamente. El análisis de estas señales permitió identificar las zonas de cobertura débil o nula, sobre las cuales se realizaron las pruebas del sistema propuesto.

El entorno donde se realizó la implementación corresponde a un espacio semiabierto, caracterizado por la presencia moderada de edificaciones académicas, áreas verdes y zonas de circulación peatonal. Estas condiciones representan un escenario real de operación para la evaluación del desempeño del sistema, considerando factores propios de la propagación

radioeléctrica como atenuación por obstáculos, multitrayectoria y variaciones en la intensidad de señal.



Figura 18. Lugar de estudio dentro del campus UPSE

Adicionalmente, la ubicación seleccionada presenta condiciones favorables para la instalación del módulo energético fotovoltaico que alimenta el sistema. El área destinada a la instalación dispone de exposición solar directa durante gran parte del día y no presenta obstáculos significativos que generen sombreado permanente sobre el panel solar, lo que permite garantizar un adecuado aprovechamiento de la radiación solar disponible en la zona.

Con respecto a las condiciones climáticas, la provincia de Santa Elena se caracteriza por poseer alta disponibilidad de radiación solar a lo largo del año, lo que permite utilizar energía fotovoltaica como fuente principal de alimentación del sistema amplificador LTE y del nodo de conectividad inalámbrica implementado. Esta característica favorece la operación autónoma del

sistema en entornos donde el acceso a la red eléctrica convencional puede ser limitado o no estar disponible de forma permanente.

La selección del laboratorio de la carrera de Telecomunicaciones como punto de implementación permite realizar procesos de monitoreo, configuración y evaluación del desempeño del sistema bajo condiciones reales de operación dentro del entorno universitario, facilitando la medición de parámetros asociados a la calidad de señal LTE y a la cobertura Wi-Fi generada para los usuarios del campus.

Como parte del análisis de las condiciones energéticas del sitio de implementación, en la Tabla 19 se presenta el comportamiento promedio anual de disponibilidad de radiación solar en la provincia de Santa Elena, que es de $4,71 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$, siendo una información relevante para justificar la utilización de energía fotovoltaica como fuente de alimentación del sistema.

Tabla 19. Irradiación solar promedio diaria para cada mes (2020-2025)

Mes	Irradiación (kWh/m²/día)
Enero	5,02
Febrero	5,04
Marzo	5,38
Abril	5,45
Mayo	4,62
Junio	4,05
Julio	3,94
Agosto	3,96

Septiembre	4,63
Octubre	4,63
Noviembre	4,73
Diciembre	5,13
Promedio	4,71

Fuente: (NASA POWER, 2026)

Esto demuestra que incluso en el peor escenario anual hay disponibilidad suficiente para operación fotovoltaica. En este contexto, se plantea la implementación de una plataforma energética autónoma que permita garantizar el funcionamiento continuo del sistema en zonas sin acceso a la red eléctrica convencional.

3.1.1. Operadoras móviles

Es necesario contextualizar los proveedores de servicios que operan en el territorio nacional. En el mercado ecuatoriano, el espectro radioeléctrico se distribuye principalmente entre tres concesionarias: CONECEL S.A. (Claro), OTECEL S.A. (Movistar/Tuenti) y la empresa pública CNT EP. Cada una emplea distintas bandas para equilibrar la capacidad y la cobertura, siendo la Banda 28 (700 MHz) la más relevante para entornos rurales y de difícil penetración debido a sus características de propagación en la banda UHF.

- **Descripción de las operadoras**

CLARO: Es la operadora con mayor presencia de estaciones base (eNodeB) en la provincia de Santa Elena. Técnicamente, utiliza una combinación de bandas (B2, B4, B5 y B28) para ofrecer

servicios LTE. Sin embargo, su despliegue suele verse afectado por la alta saturación de usuarios, lo que impacta directamente en la relación señal a ruido (SINR).

CNT EP: Al ser la operadora estatal, tiene el mandato de cubrir zonas remotas. Aunque cuenta con asignación en bandas más bajas ideales para la ruralidad, la estación base que ilumina el eje universitario no emite señales en frecuencias de 700 MHz. Por este motivo, para evaluar el rendimiento del amplificador frente a CNT de manera real y sin simulaciones, el equipo de pruebas registrará únicamente los parámetros de la Banda 2 y 4.

TUENTI (Red OTECEL): Opera bajo la infraestructura de Movistar. En la práctica, su despliegue en la banda 2 es selectivo y está orientado a la estabilidad del canal de datos. Se prevé que los resultados de ganancia de señal sean equivalentes si el sistema se replica en una zona remota, operando sobre la banda de 700 MHz asignada a la operadora.

Cada una de las bandas de frecuencia asignadas se refleja en la Tabla 20 y en la Tabla 21, según el operador móvil; adicionalmente, se detalla en qué zonas es factible el uso de cada banda:

Tabla 20. Distribución de bandas de frecuencia por operador móvil

Operador	2G (GSM)	3G (UMTS)	4G (LTE)
Claro	B5 (850 MHz)	B2 (1900 MHz), B5 (850 MHz)	B4 (1700/2100 MHz)
CNT	B2 (1900MHz)	B2 (1900MHz)	B4 (1700/2100MHz), B28 (700MHz)

TUENTI	B5 (850MHz)	B2 (1900 MHz), B5 (850 MHz)	B2 (1900MHz)
--------	-------------	-----------------------------	--------------

Tabla 21. Comparativa de las operadoras en zonas donde la cobertura es inestable

Parámetro	CONECEL (Claro)	CNT EP	OTECCEL (Tuenti)
Banda Objetivo	B2 (1900 MHz), B4 (1700/2100 MHz)	B2 (1900 MHz), B4 (1700/2100 MHz)	B2 (1900 MHz), B4 (1700/2100 MHz)
Tecnología de Acceso	LTE / LTE-A	LTE	LTE
Arquitectura eNodeB	Alta Densidad / Macrocelas	Dispersa / Rural	Selectiva / Urbana-Rural
Nivel de Potencia (RSRP)	-95 dBm a -110 dBm	-100 dBm a -115 dBm o menos	-90 dBm a -105 dBm
Calidad de Enlace (RSRQ)	-13 dB a -16 dB	-11 dB a -15 dB	-12 dB a -18 dB
Condición de Propagación	NLOS (Bloqueo Físico)	Marginal (Gran Distancia)	Desvanecimiento

3.1.2. Mediciones de señal base

Para el estudio del lugar se utilizó la herramienta G-NetTrack Lite para realizar un barrido de radiofrecuencia (RF) en los laboratorios. Los resultados contrastan con la cobertura teórica: a pesar de su infraestructura nacional, Claro presenta niveles predominantemente débiles en el punto de interés, mientras que CNT y Tuenti registran una cobertura irregular con tramos críticos. Los siguientes datos muestran el parámetro RSRP.

- Mediciones de la operadora Claro



Figura 19. Mapa de cobertura y niveles de potencia de la señal LTE (Claro)

Los resultados muestran que en la trayectoria predominan niveles de señal entre -100 dBm y -110 dBm, que son niveles de señal débiles. Hay algunas áreas donde la señal es aceptable (-90 a -100 dBm) y otras donde la señal es crítica (-110 dBm).

Tabla 22. Clasificación de niveles de cobertura móvil Claro

Color observado	Rango RSRP (dBm)	Nivel de cobertura	Interpretación técnica
Verde	-80 a -90	Buena	Potencia adecuada para comunicaciones estables
Azul claro	-90 a -100	Aceptable	Cobertura funcional con posible reducción de velocidad
Azul oscuro	-100 a -110	Débil	Cercano al límite operativo de la celda
Gris	-110 a -120	Crítica	Alta probabilidad de degradación del servicio

Esta distribución espacial de RSRP indica una cobertura desigual dentro del área evaluada, lo que sugiere condiciones de borde de celda y posibles efectos de atenuación relacionados con obstáculos físicos en el entorno, como edificios cercanos y variaciones en la línea de visión hacia

la estación base. Además, la presencia de valores bajos de SNR observados durante la medición refuerza la evidencia de interferencia radioeléctrica, afectando la calidad efectiva del enlace aun cuando existe potencia de señal detectable.

- Mediciones de la operadora Tuenti

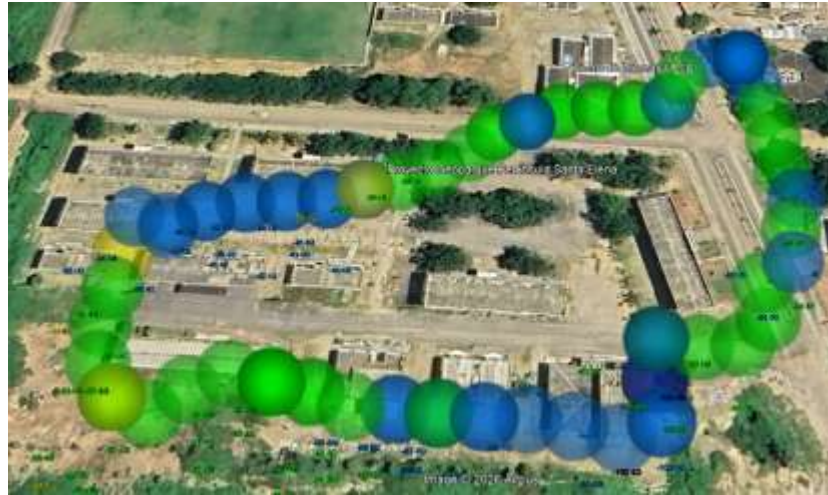


Figura 20. Mapa de cobertura y niveles de potencia de la señal LTE (Tuenti)

Los resultados obtenidos del registro de mediciones de la operadora Tuenti muestran que el nivel de señal varía aproximadamente entre -78 dBm y -116 dBm, predominando el rango -85 dBm a -100 dBm, lo que indica una cobertura mayormente aceptable con sectores puntuales de señal débil.

Tabla 23. Clasificación de niveles de cobertura móvil Tuenti

Color observado	Rango RSRP (dBm)	Nivel de cobertura	Interpretación técnica en la trayectoria
Verde	-78 a -85	Buena	Sectores con adecuada potencia de señal y condiciones favorables de conexión
Azul claro	-86 a -95	Aceptable	Rango predominante del recorrido, permite navegación estable

Azul oscuro	–96 a –104	Débil	Zonas cercanas al borde de celda o con presencia de obstáculos
Gris	–105 a –116	Crítica	Sectores aislados con probabilidad de degradación del servicio

Estos resultados indican una cobertura relativamente más uniforme que en escenarios con predominio de niveles críticos, aunque con presencia localizada de zonas marginales que pueden afectar la estabilidad del enlace radioeléctrico.

Este diagnóstico confirma la existencia de una zona de sombra provocada por el apantallamiento de la estructura, lo que valida la implementación de una antena externa y el amplificador para restablecer la conectividad LTE.

- Mediciones de la operadora CNT

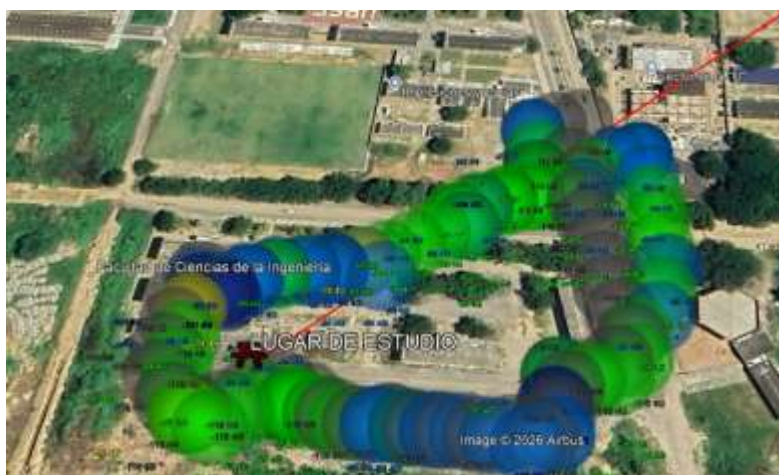


Figura 21. Mapa de cobertura y niveles de potencia de la señal LTE (CNT)

La trayectoria evaluada para el operador CNT muestra valores de RSRP entre –89 dBm y –110 dBm, lo que significa que existen niveles de cobertura mayoritariamente aceptables (–90 a –

100 dBm) con algunas áreas de buena cobertura (−80 a −90 dBm). Sin embargo, también se han encontrado tramos con niveles débiles y críticos inferiores a −100 dBm. Esto indica que la señal varía en el espacio, probablemente debido a obstrucciones físicas en el entorno y a la distancia a la estación base. En consecuencia, la cobertura en el área analizada no es uniforme.

Tabla 24. Clasificación de niveles de cobertura móvil CNT

Color	Rango RSRP (dBm)	Nivel de cobertura	Interpretación en la trayectoria
Verde	−80 a −90	Buena	Sectores puntuales con adecuada potencia de señal, principalmente en zonas cercanas al Centro de Idiomas UPSE
Azul claro	−90 a −100	Aceptable	Nivel predominante en la trayectoria, permite comunicación estable
Azul oscuro	−100 a −110	Débil	Tramos con reducción de potencia asociados a distancia respecto a la estación base y presencia de edificaciones
Gris	−110 a −120	Crítica	Sectores con alta probabilidad de degradación del servicio, principalmente en el tramo sur del recorrido

3.2. Selección final de componentes

Para la implementación de este proyecto se utilizaron múltiples equipos, como el amplificador AN-CPL70APLUS, que trabaja en diferentes bandas, así como el panel solar, batería e inversor; asimismo, se adopta una arquitectura modular basada en la reutilización de la unidad de potencia y transporte desarrollada en la investigación “Implementación de un prototipo de red inalámbrica en la banda de 2.4 GHz en zonas de baja cobertura alimentada por energía solar”.

3.2.1. Infraestructura existente del sistema autónomo

El proyecto se basa en una estructura autónoma de telecomunicaciones ya implementada; la infraestructura existente incluye un sistema fotovoltaico compuesto por un panel solar policristalino, una batería de almacenamiento, un inversor de potencia y una estructura portátil que facilita su despliegue en distintos entornos de cobertura.

Por su parte, el sistema cuenta con un dispositivo inalámbrico Wavlink AC600 que ofrece conectividad Wi-Fi en la banda de 2.4 GHz, lo que permite ampliar el acceso a internet en zonas con cobertura limitada (Lascano, 2025). Esta infraestructura representa la base física y energética sobre la cual se desarrolla la solución propuesta en esta investigación.



3.2.2. Especificaciones del sistema fotovoltaico

A continuación, se desglosan los equipos que integran la infraestructura utilizada, especificando sus características técnicas principales.

- Panel solar

Para la captación de energía se utiliza un panel policristalino. A diferencia de los otros tipos de paneles, este módulo está compuesto por múltiples cristales de silicio, lo que ofrece una relación costo-beneficio favorable y un desempeño adecuado frente al coeficiente de temperatura (Anern, 2025).

Tabla 25. Variables técnicas del panel

Variable Técnica	Valor Nominal	Descripción Funcional
Potencia Máxima	100 W	Capacidad total de generación bajo sol pleno.
Voltaje	18.0 V	Voltaje óptimo para la carga de la batería.
Corriente	2.7 A	Corriente máxima entregada al controlador.
Voltaje de Circuito Abierto	22.5 V	Voltaje presente cuando no hay consumo.
Corriente de Cortocircuito	5.81 A	Límite de corriente en condiciones de falla.



Figura 22. Panel solar

Fuente: (Anern, 2025)

- Inversor

El inversor es el componente crítico que permite la interfaz entre el sistema de almacenamiento en corriente continua (DC) y el equipo de telecomunicaciones que opera en corriente alterna (AC). Para este proyecto, se ha integrado un inversor de 1000 W, dimensionado para ofrecer alta estabilidad y capacidad de expansión.

Tabla 26. Variables técnicas del inversor

Variable Técnica	Especificación	Descripción Funcional
Potencia Nominal	1000 W	Capacidad de carga constante sin degradación térmica.
Potencia de Pico (Surge)	2000 W	Capacidad máxima para absorber transitorios de arranque.
Voltaje de Entrada (V_{in})	10.5 V – 15.0 V DC	Rango de tolerancia proveniente de la batería.
Voltaje de Salida (V_{out})	110 V – 120 V AC	Voltaje nominal entregado al amplificador LTE.

El inversor opera mediante un proceso de Modulación por Ancho de Pulso (PWM) o conmutación de alta frecuencia. Su funcionamiento se divide en:

- **Elevación:** transforma los 12 V de la batería a un nivel de voltaje alto en DC.
- **Inversión:** convierte ese voltaje alto DC en una onda de corriente alterna (AC).

- Batería

La batería es el corazón de la autonomía del sistema. Su función es acumular la energía generada por el panel para alimentar al inversor, la cámara, el repetidor Wavlink AC600 y al amplificador ANNTLENT AN-CPL70APLUS de forma ininterrumpida, incluso durante la noche o en días nublados.

Tabla 27. Variables técnicas de la batería

Variable Técnica	Especificación	Detalle
Tipo de Batería	Gel / Ciclo Profundo	Diseñada para descargas lentas y constantes.
Voltaje Nominal	12 V	Tensión de operación del sistema DC.
Capacidad Nominal	55 Ah	Cantidad de carga total almacenada.
Energía Total Almacenada	660 Wh	Capacidad en vatios-hora ($12\text{ V} \times 55\text{ Ah}$).
Voltaje de Corte (Seguridad)	10.5 V	Límite para evitar daños permanentes.
Ciclos de Vida	500 – 1000	Durabilidad estimada del componente.



Figura 23. Batería 12 V 55 Ah

Fuente: (Mercado Libre, 2025)

- Protector de voltaje

Este dispositivo protege contra variaciones de voltaje, interrupciones momentáneas y sobretensiones que pudieran afectar a los equipos de telecomunicaciones conectados en la salida AC del sistema.

Tabla 28. Variables técnicas del protector de voltaje

Variable Técnica	Especificación
Voltaje nominal	120 VAC
Voltaje mínimo permitido	90 VAC
Voltaje máximo permitido	140 VAC
Rango de operación	$\pm 40\%$
Frecuencia de operación	60 Hz
Temporizado de desconexión ante una falla	1 s
Temporizado de conexión de la carga	3 – 4 min
Capacidad de carga	12 000 BTU; 1800 W
Corriente máxima	15 A
Supresión de picos	140 joules
Temperatura de operación	-5 a 55 °C



Figura 24. Protector de voltaje

Fuente: (Kywi, 2026)

- Wavlink AC600

La antena Wavlink AC600 es un dispositivo de red inalámbrica que sirve para ampliar o distribuir la señal de internet wifi a mayor distancia, especialmente en exteriores, funcionando como repetidor, punto de acceso o router. Trabaja en la banda de 2.4 GHz y ofrece una velocidad de 600 Mbps, lo que permite obtener una buena cobertura de la señal Wi-Fi.



Figura 25. Antena Wavlink AC600

3.2.3. Criterios técnicos para la incorporación del amplificador LTE

Con el objetivo de mejorar la cobertura celular disponible en la zona de estudio, se incorpora al sistema autónomo existente un amplificador LTE multibanda.

- Anntlent AN-CPL70APLUS

La elección de este equipo surge por su compatibilidad con las bandas LTE que fueron identificadas en la zona de estudio (1900 MHz y 1700/2100 MHz), las cuales son utilizadas por

los operadores móviles en el Ecuador. Estas bandas tienen características apropiadas de propagación en entornos semiurbanos, lo que permite mejorar la penetración en interiores y la estabilidad de la señal dentro del área de implementación.



Figura 26. Amplificador ANNTLENT AN-CPL70APLUS

El equipo ofrece una ganancia máxima de hasta 70 dB en enlace descendente y 65 dB en enlace ascendente, valores que son suficientes para compensar las pérdidas por propagación asociadas a la distancia de entre 500 y 800 m respecto a las estaciones base más cercanas y a la atenuación generada por estructuras del entorno universitario.

Adicionalmente, el sistema incorpora una antena exterior direccional tipo Yagi de 8 dBi para optimizar la captación de señal en el enlace descendente y una antena panel interior de 8 dBi para redistribuir la señal amplificada en el área de cobertura. El amplificador opera en configuración full-duplex con impedancia característica de 50 Ω , garantizando la compatibilidad

con el sistema radiante y la operación simultánea en los enlaces ascendente y descendente bajo condiciones estables de funcionamiento.

3.2.4. Diagrama de bloques del sistema integrado

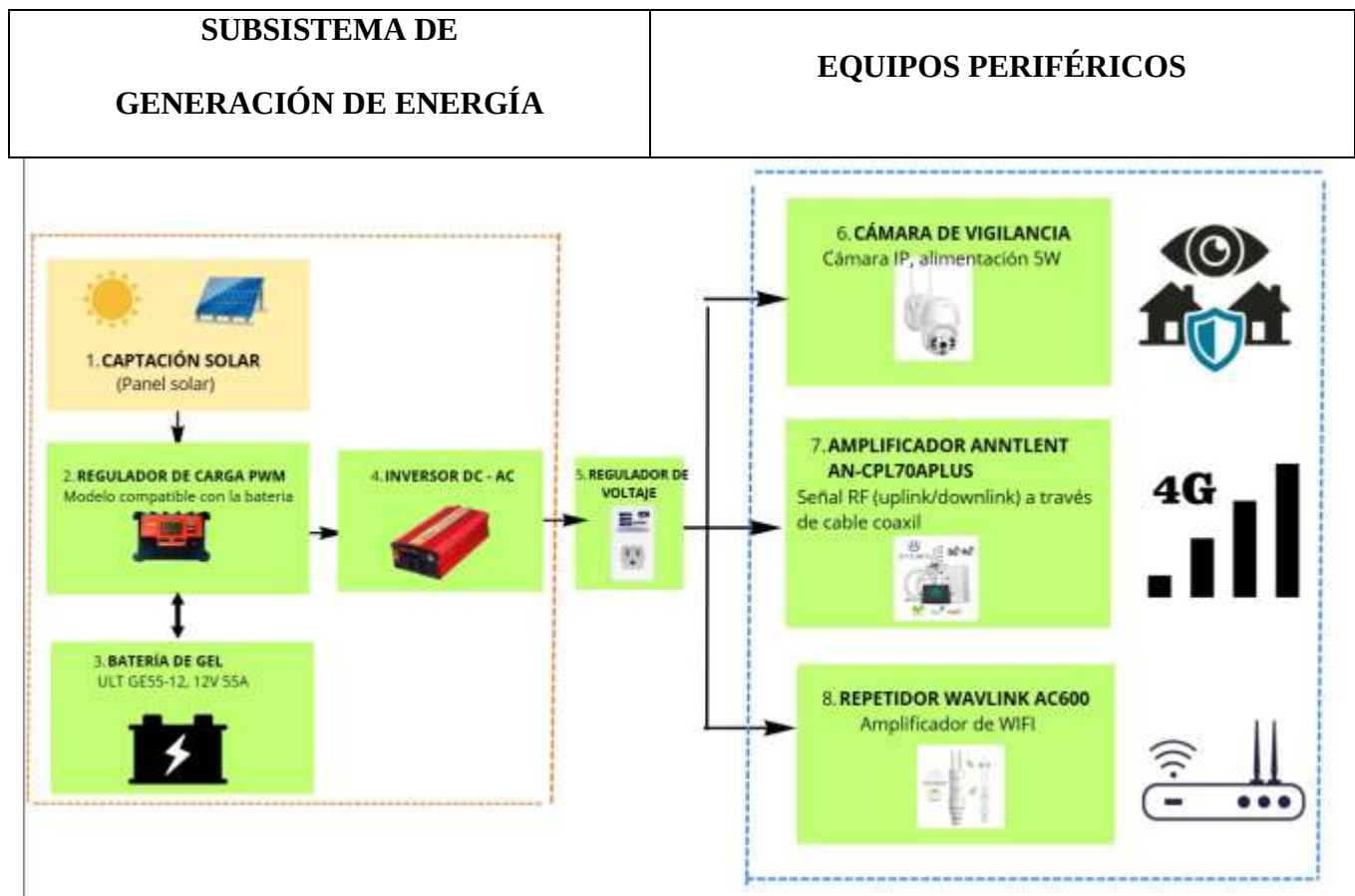


Figura 27. Diagrama de bloques del prototipo

La arquitectura que se muestra presenta un diseño híbrido que integra una alimentación fotovoltaica con servicios de telecomunicaciones y vigilancia. Está constituido por tres bloques principales:

1. **Subsistema de generación de energía:** Para la captación de energía se usa un panel solar que entrega corriente directa DC, esta energía es administrada por un regulador de carga con algoritmo PWM, este equipo supervisa el estado de la carga de la batería de gel. El regulador de carga actúa como núcleo de control protegiendo la batería de sobrecargas y descargas profundas. Asimismo, para la transformación de la energía se utiliza un inversor DC-AC, cuya función principal es elevar el voltaje de la batería a un valor comercial de 110 V AC.
2. **Protector de voltaje:** Ubicado entre la salida del inversor y la etapa de distribución, con el fin de proteger los equipos periféricos conectados frente a variaciones de voltaje y sobretensión.
3. **Equipos periféricos:** Dentro de este bloque se incluyen los equipos alimentados, entre ellos la cámara, el repetidor wifi y el amplificador ANNTLENT, que es la carga principal del sistema, encargada de amplificar la señal RF captada por la antena Yagi.

3.3. Análisis de comportamiento energético

En esta sección se realiza una evaluación del rendimiento del sistema fotovoltaico implementado, contrastando los resultados experimentales obtenidos con los antecedentes teóricos de la tesis de referencia: "Implementación de un prototipo de red inalámbrica en la banda de 2.4 GHz en zonas de baja cobertura alimentada por energía solar" (Lascano, 2025).

Antes de la implementación de la propuesta de estructura se hizo un estudio del comportamiento del sistema existente (panel solar, repetidor Wi-Fi, cámara). Se detectó una falla

crítica en la continuidad del servicio: el sistema presenta un apagón diario aproximadamente entre las 19:00 y 20:00 horas, y recién vuelve a funcionar entre las 07:00 y 08:00 horas del día siguiente.

Estas inestabilidades se atribuyen a los siguientes factores:

- **Déficit de captación fotovoltaica:** Se determinó que la potencia nominal del panel solar original era insuficiente para la demanda del sitio. Esto generaba un balance energético negativo, donde la energía captada durante el día apenas cubría el consumo instantáneo de los equipos, no dejando excedente para el proceso de carga.
- **Carga incompleta:** Debido a la baja corriente de carga entregada por el panel, el banco de baterías de 55 Ah nunca llegaba a su voltaje de flotación o carga completa. La batería, técnicamente, entraba en su ciclo nocturno con un estado de carga (SoC) inferior al 40 %.
- **Interrupción del servicio: como consecuencia de los puntos anteriores, el sistema presentaba un apagón sistemático cada día entre las 19:00 y 20:00 horas.** Para evitar daños permanentes en la batería, el regulador de carga activaba la protección por bajo voltaje y dejaba la zona sin vigilancia ni conectividad por un aproximado de 12 horas.

3.4. Diseño del sistema de alimentación

La implementación del sistema constituye el pilar de soporte que garantiza la sostenibilidad y autonomía de la estación de amplificación de cobertura LTE en zonas del campus con cobertura deficiente. Este apartado detalla el análisis de las cargas energéticas del amplificador y sus dispositivos periféricos, estableciendo las bases para un dimensionamiento fotovoltaico preciso

que equilibre la eficiencia de captación del panel solar con la capacidad de reserva del banco de baterías. Bajo este esquema, el equipo ANNTLENT AN-CPL70APLUS es el encargado de captar y potenciar las señales débiles provenientes de las estaciones base de la operadora Claro para su posterior retransmisión en el área objetivo, asegurando así la estabilidad del enlace. Esta solución se complementa con el uso de un repetidor WiFi para la distribución de datos inalámbricos y una cámara de seguridad para el monitoreo constante, consolidando así una infraestructura de conectividad y vigilancia robusta, técnicamente eficiente y energéticamente autosuficiente.

3.4.1. Cálculo de consumo diario del amplificador y periféricos

Para sustentar el diseño del sistema fotovoltaico, es necesario realizar un análisis detallado de la demanda energética del prototipo. El consumo total diario se determina mediante la sumatoria de las potencias nominales de los equipos activos por su tiempo de operación estimado.

Con respecto a la demanda energética total, se analizan las especificaciones técnicas del amplificador ANNTLENT AN-CPL70APLUS, que opera bajo una tensión nominal de $5V$ con un consumo de corriente de $2 A$, donde la potencia de diseño P_{AMP} para este equipo se obtiene mediante la relación fundamental de la potencia eléctrica, descrita en la ecuación (29):

$$P_{AMP} = V * I = 5 V * 2 A = 10 W \quad (29)$$

A este valor se le debe adicionar la potencia del repetidor WAVLINK AC600. A partir de su fuente de alimentación PoE (Power over Ethernet) se obtiene una tensión nominal de $54 V$ y una corriente de $0,3 A$. Siguiendo la misma metodología de cálculo para la potencia eléctrica, se determina el consumo del punto de acceso P_{AP} en la ecuación (30):

$$P_{AP} = V * I = 54 V * 0,3 A = 16,2 W \quad (30)$$

En relación con la cámara de seguridad, se considera un valor estándar de diseño de $P_{camara} = 5 W$, correspondiente a un modelo de resolución 1080p que integra un sistema de iluminación infrarroja para visión nocturna. Por lo tanto, considerando la potencia de cada equipo periférico, la ecuación (31) determina que la potencia total de los equipos periféricos P_{tot} es:

$$P_{tot} = P_{AMP} + P_{AP} + P_{camara} = 10 W + 16,2 W + 5 W = 31,2 W \quad (31)$$

Es fundamental garantizar para el diseño del sistema de alimentación un régimen de operación continuo de TH (total de horas de uso al día) $= 8h$. La jornada operativa de 8 horas se planificó de manera estratégica para cubrir el periodo de mayor tráfico de datos y conectividad dentro del campus. De este modo, el sistema concentra su disponibilidad energética en los horarios de máxima actividad académica y laboral, optimizando el uso del recurso solar evitando el sobredimensionamiento o el consumo innecesario en horas de nula actividad.

Cabe agregar que se selecciona un factor de eficiencia de $\eta_{inv} = 0,9$ (90%) asumiendo el uso de un inversor de onda senoidal pura de alta eficiencia. Este coeficiente compensa la energía perdida durante la conversión de DC a AC. Bajo este criterio de alta disponibilidad, se determina el consumo energético diario estimado C , el mismo que se detalla en la ecuación (32):

$$C = \frac{P_{tot} * TH}{\eta_{inv}} = \frac{31,2 W * 8 h}{0,9} = 277,33 Wh/dia \quad (32)$$

Una vez determinado el consumo energético base ajustado por la eficiencia del inversor, es imperativo aplicar un factor de seguridad F_S del 20 % (1,2); este margen técnico permite

compensar las ineficiencias propias del controlador de carga, las caídas de tensión en el cableado y las variaciones en la irradiancia solar causadas por la nubosidad o la acumulación de suciedad en los módulos. La energía requerida E_r para el diseño queda definida en la ecuación (33):

$$E_r = C * 1,2 = 277,33 \text{ Wh/dia} * 1,2 = 332,8 \text{ Wh/dia} \quad (33)$$

Una vez establecida la demanda energética del prototipo, se procede a determinar la energía generada teórica ($E_{gen_teórica}$) que el sistema fotovoltaico de 100 W será capaz de transferir al banco de almacenamiento de 12 V. Para garantizar un dimensionamiento técnicamente conservador y realista, el cálculo integra la corriente nominal conjunta de los módulos en paralelo ($I_{nominal} = 5,4 \text{ A}$), la ventana de tiempo de prueba en campo 8 h y un factor de rendimiento global del sistema ($\eta_{sis} = 0,7(70\%)$). Este coeficiente descuenta de forma preventiva un 30 % de la producción ideal para contemplar las pérdidas inevitables por estrés térmico en los paneles debido al clima de la zona, la eficiencia de regulación del controlador PWM y las caídas de tensión en el cableado. Este cálculo se representa en la ecuación (34):

$$E_{gen_teórica} = 12 \text{ V} \times 5,4 \text{ A} \times 8 \text{ h} \times 0,7 = 362,88 \text{ Wh} \quad (34)$$

3.4.2. Dimensionamiento del panel solar y banco de baterías

Una vez determinada la energía de diseño final como se muestra en la ecuación (33), se procede al dimensionamiento de los componentes principales del sistema: el cálculo fotovoltaico y el banco de baterías. El objetivo es garantizar que la captación de energía solar sea suficiente

para cubrir el consumo diario y las pérdidas, mientras que el sistema de almacenamiento debe asegurar la autonomía de la estación durante periodos de baja irradiación o ausencia de luz solar.

- Cálculo del sistema fotovoltaico

Para determinar la potencia del panel solar, se debe considerar el recurso solar disponible en la zona de estudio (UPSE). Se utiliza el concepto de Horas Solares Pico (HSP), que representa el número de horas equivalentes con una irradiancia constante de 1000 W/m^2 necesarias para igualar la irradiación total recibida en un día. Para la provincia de Santa Elena la irradiación solar diaria promedio oscila entre 4,5 y 5,5 $\text{kWh/m}^2/\text{día}$, bajo ese criterio de diseño conservador que garantice la operatividad del sistema en meses de menor recurso solar, se establece un valor de 5HSP. A este se incluye el factor de rendimiento (f_r), que considera pérdidas en cables, inversor, suciedad, etc. (normalmente estimado en 0,85). La potencia requerida para el panel solar P_s se muestra en la ecuación (35):

$$P_s = \frac{E_r}{HSP \times f_r} = \frac{332,8}{5H \times 0.85} = 78,30 \text{ W} \quad (35)$$

- Cálculo banco de baterías

Para el subsistema de almacenamiento, se ha optado por una batería con una capacidad nominal de 55 Ah a 12 V con una restricción de profundidad de descarga operativa del $DoD = 0.5$ (50%). Este parámetro es crucial para calcular la capacidad mínima teórica; así, vinculando la demanda energética total con los factores de seguridad establecidos, se utiliza la ecuación (36),

capacidad requerida para la batería B_r , para verificar la viabilidad técnica del almacenamiento propuesto.

$$B_r = \frac{E_r}{V_{bat} \times DoD} \approx \frac{332,8 \text{ Wh/dia}}{12V \times 0.5} \approx 55,4 \text{ Ah} \quad (36)$$

De este modo, considerando los datos de la batería (55 Ah a 12 V) se obtiene la energía nominal de la batería seleccionada E_{bat_nom} en la ecuación (37):

$$E_{bat_nom} = 12 \text{ V} \times 55 \text{ Ah} \approx 660 \text{ Wh} \quad (37)$$

En consecuencia, y dado que la profundidad de descarga operativa $DoD = 0.5$ (50%) se obtiene la energía útil disponible $E_{bat_útil}$ mediante la ecuación (38):

$$E_{bat_útil} = E_{bat_nom} \times 0,5 = 660 \text{ Wh} \times 0,5 \approx 330 \text{ Wh} \quad (38)$$

A través del cálculo de la energía DoD real con los 55 Ah de la batería, se obtiene, mediante la ecuación (39), que el DoD_{real} necesario para entregar es de:

$$DoD_{real} = \frac{E_r}{E_{bat_nom}} \frac{332,8}{660} = 0.504 \approx 50,4 \quad (39)$$

Al contrastar los resultados, se evidencia un acoplamiento energético óptimo. La demanda de la energía requerida, ecuación (33), equivale a una descarga real del 50,4 % sobre la capacidad total de la batería seleccionada de 55 Ah, ecuación (38). Este comportamiento técnico asegura que el acumulador opere estrictamente dentro de los límites de seguridad recomendados para tecnología de ciclo profundo, maximizando su expectativa de vida útil y manteniendo la

estabilidad del voltaje nominal sin requerir un banco de almacenamiento sobredimensionado que afecte la portabilidad del prototipo.

- Análisis comparativo de escenarios de diseño

Para determinar el régimen de operación más eficiente para el prototipo, se evaluaron tres escenarios técnicos basados en diferentes jornadas de uso diario.

Siguiendo la metodología de cálculo establecida en las ecuaciones (32) a (36), se procedió a recalcular los requerimientos energéticos ajustando la variable de tiempo de operación (TH). Los resultados para las jornadas de 24, 12 y 8 horas se resumen a continuación:

Tabla 29. Comparativa de escenarios de diseño

Parámetro	Escenario A (24h)	Escenario B (12h)	Escenario C (8h - Selección)
Energía Requerida	998,4 Wh	499,2 Wh	332,8 Wh
Panel Necesario	235 W	117 W	78,3 W
Batería Necesaria	166 Ah	83 Ah	55 Ah
Viabilidad Móvil	Nula (Muy Pesado)	Limitada	Óptima (Portátil)

Considerando el cálculo, el régimen de 24 horas requiere una infraestructura sobredimensionada (235 W de captación y 166 Ah de almacenamiento) que anula el principio de portabilidad y movilidad del prototipo. Por su parte, la jornada de 12 horas demanda 83 Ah; al contrastarla con la batería real disponible de 55 Ah, este escenario provocaría de manera

sistemática descargas profundas superiores al límite seguro del 50 % de *DoD*, acelerando la degradación química del acumulador y comprometiendo la estabilidad del voltaje.

Desde una perspectiva técnica, el consumo de 332,8 Wh característico de este escenario es el único que se ajusta estrictamente a la energía útil de la batería de 55 Ah (bajo un límite de descarga del 50 %). Esta alineación energética es fundamental para evitar descargas profundas en el acumulador, preservando así su vida útil y garantizando la estabilidad del voltaje necesaria para el correcto funcionamiento de los equipos de comunicación.

- Cálculo de la corriente máxima del sistema

Debido a que el prototipo incorporó finalmente dos paneles solares fotovoltaicos de 50 W conectados al sistema, la potencia total instalada fue de 100 W. Considerando una tensión de operación de 18 V, la corriente máxima generada por el arreglo se estima mediante la ecuación (40):

$$I_{FV} = \frac{P_{ps}}{V_s} = \frac{100}{18} = 5,5 \text{ A} \quad (40)$$

Este valor representa la corriente máxima que debe gestionar el controlador de carga. Dado que el sistema utiliza un controlador de 20 A, se dispone de un margen de operación suficiente para garantizar un funcionamiento seguro.

3.4.3. Modelado 3D de estructura modificada

Mediante el software SketchUp se elaboró el modelado 3D del prototipo, considerando la distribución de los componentes físicos. La Figura 28 ilustra la modificación estructural realizada

para la integración del sistema amplificador ANNTLENT AN-CPL70APLUS. En el diseño, se integró un soporte tubular central para fijar la antena exterior; asimismo, en la sección inferior se dispuso la antena interior, mientras que el amplificador quedó resguardado dentro del gabinete.

Adicionalmente, debido a la integración de un segundo panel fotovoltaico para el suministro eléctrico de los equipos, se implementó un diseño estructural en forma de V invertida. Esta disposición geométrica se seleccionó con el objetivo de maximizar la captación de la radiación solar disponible durante el día.

Cabe destacar que los demás componentes del sistema se conservaron en sus ubicaciones preestablecidas. La estructuración previa en este entorno virtual se ejecutó con el fin de anticipar la configuración real del sistema, facilitando la comprensión del diseño y optimizando los procesos de implementación física.



Figura 28. Modelado 3D

3.4.4. Esquema de conexiones

Complementando la arquitectura lógica del diagrama, la Figura 29 presenta el esquema físico donde se describe la implementación del cableado y la distribución de los puertos en el prototipo. Esta estructura se realizó bajo los siguientes criterios de conexión:

1. **Regulador de carga:** Se emplea un equipo de 8 contactos. El par de entrada (1-2) recibe el cable proveniente del panel solar. El par central (5-6) se conecta a los bornes de la batería de gel directamente utilizando cable calibre 8 AWG para minimizar las caídas de tensión. Finalmente, el par de salida (7-8) alimenta la entrada DC del inversor, lo cual permite al regulador apagar y encender las cargas en función del nivel de voltaje acumulado.
2. **Protección de voltaje: en la salida del inversor AC se incorporó un protector de voltaje**, con una corriente nominal de 15 A y un rango de operación de 120 V - 140 V. Este dispositivo se ubica entre la salida del inversor y la regleta de distribución eléctrica, protegiendo así a los equipos conectados frente a variaciones de voltaje, interrupciones momentáneas o eventos externos.
 - **Detección de voltaje bajo:** Si el voltaje es < 90 VAC, el indicador de voltaje bajo se encenderá y los equipos a proteger permanecerán apagados.
 - **Detección de voltaje alto:** Si el voltaje es > 140 VAC, el indicador de voltaje alto se encenderá y los equipos a proteger permanecerán apagados.
 - **Detección de voltaje normal:** Si el voltaje se encuentra entre el rango de 90 VAC y 140 VAC, desaparecerá cualquier indicación de falla.

Al conectar el equipo de protección, el indicador de ciclo de espera se activará durante 3 minutos. Transcurrido este tiempo, dicho indicador se apagará y el equipo a proteger se encenderá, siempre que el voltaje se encuentre dentro del rango de operación.

3. **Distribución de cargas: el protector de voltaje se conecta a una regleta multienchufe.**

Esta configuración permite la conexión simultánea de la fuente de alimentación de la cámara de vigilancia, el repetidor Wi-Fi y el adaptador de corriente de 5 V/2 A del amplificador ANNTLENT. Esta medida asegura que cada equipo obtenga un voltaje de 110 V AC estabilizado, tal como lo estipulan sus especificaciones de fábrica.

4. **Amplificador:** El amplificador está conectado con la antena exterior tipo Yagi mediante un cable coaxial de baja pérdida, de forma que la señal captada sea procesada y luego radiada hacia la antena interior para crear la zona de cobertura mejorada.

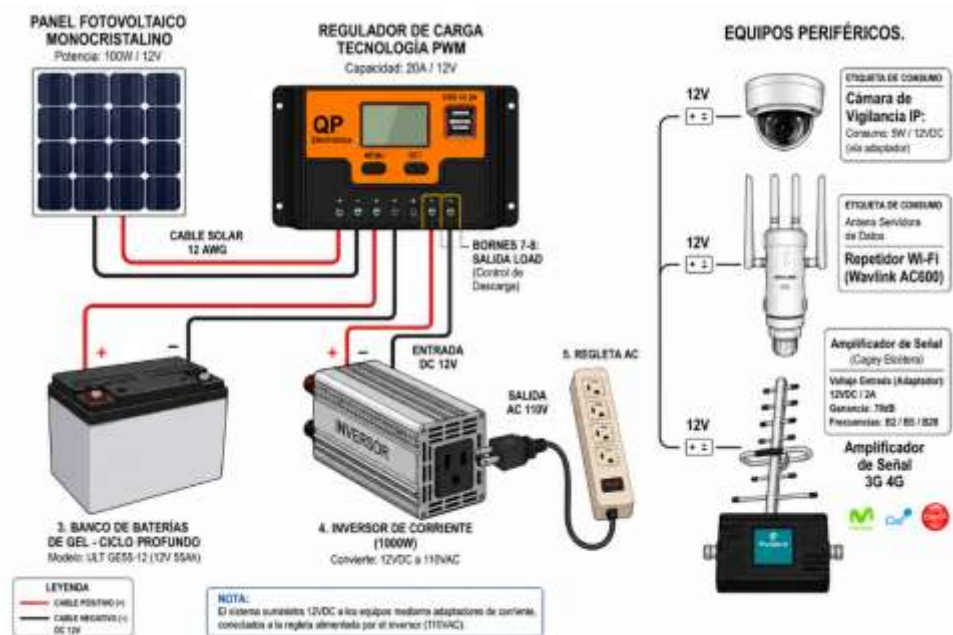


Figura 29. Esquema de conexiones requerido para el prototipo

De igual manera, en la Figura 30 se muestra el esquema de conexiones multifilar del sistema fotovoltaico, donde se muestra el flujo de energía desde los paneles solares, pasando por el regulador de carga, batería, inversor, protector de voltaje y la regleta hasta llegar a las cargas conectadas.

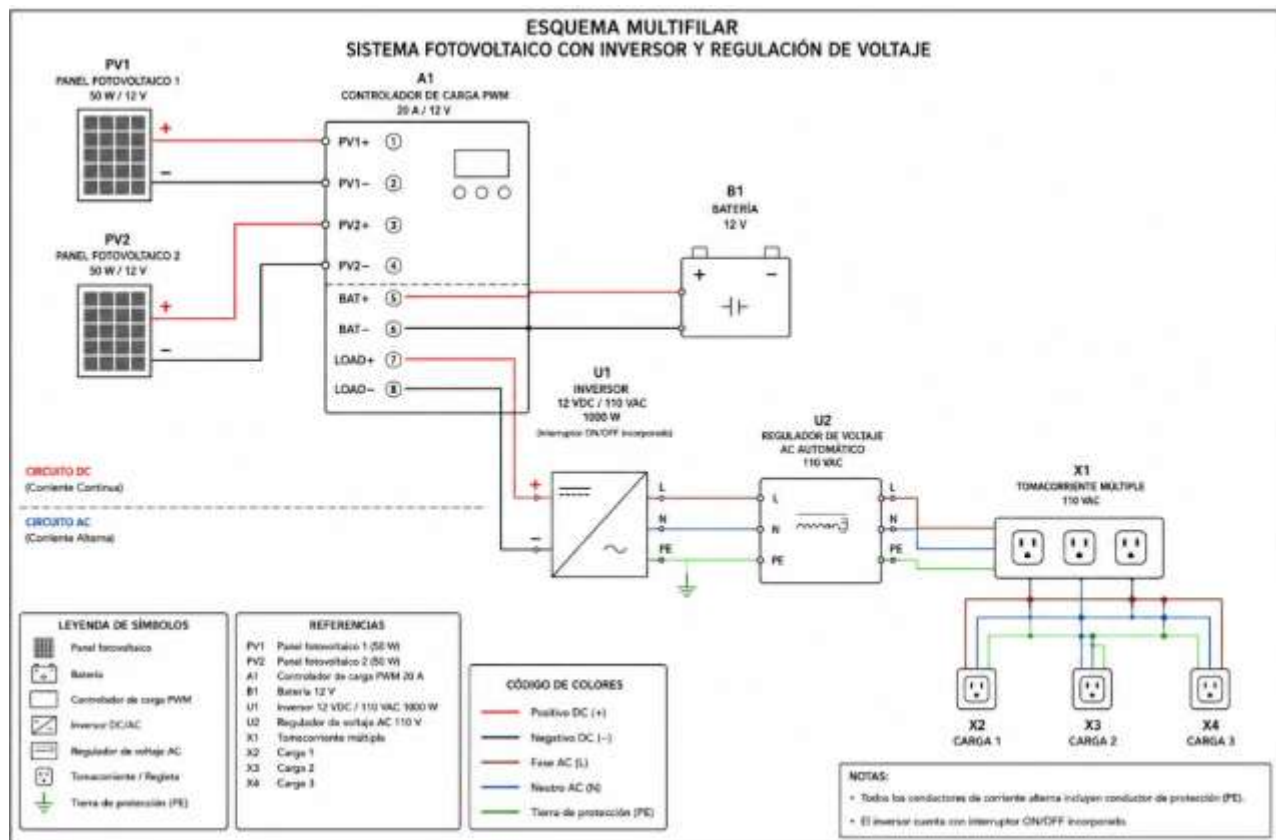


Figura 30. Esquema multifilar del sistema fotovoltaico

3.4.5. Implementación de la estructura modificada

Tras analizar la estructura móvil y el panel solar de la tesis precedente, se identificaron oportunidades de mejora. Debido a eso, en la Figura 31 se muestra el prototipo correspondiente a un sistema autónomo de amplificación de cobertura, diseñado para mejorar la señal móvil en espacios donde la señal es deficiente.

La estructura integra dos paneles solares, el sistema de energía integrado y los equipos de telecomunicaciones. En la sección superior se encuentran los paneles en forma de “V” invertida, los cuales recolectan la mayor cantidad de energía, y en la parte más alta se observa un tubo de 5 metros de altura, el cual sirve de soporte a la antena exterior, en tanto que en la sección interior del gabinete se encuentra la batería, el inversor, el controlador de carga, el amplificador o booster y las conexiones que salen del inversor para distribuir energía a la cámara, el repetidor wifi y al amplificador.



Figura 31. Estructura modificada para el uso del amplificador de cobertura celular alimentado por energía solar

Dentro del compartimiento, se encuentran los elementos clave para alimentar de forma continua el sistema de alimentación, en donde, su distribución interna se organiza de la siguiente forma: el controlador de carga se encarga de monitorear el flujo de energía hacia la batería para así optimizar la duración y la vida útil de la batería; por otro lado, la batería se encarga de almacenar la energía excedente para mantener la antena encendida durante las horas de trabajo y

el inversor es el componente encargado de transformar la corriente continua a corriente alterna para abastecer los equipos.

Cabe mencionar que el equipo de amplificación de la señal consta de cuatro perillas con sus respectivos identificadores, que permiten elegir una ganancia adecuada para así evitar ruidos excesivos, asegurando que la señal tenga la intensidad suficiente antes de ser transmitida por la antena interior.



Figura 32. Conexiones del sistema y equipos periféricos

Como se mencionó, en la sección posterior, de la forma en que se muestra en la Figura 32, se encuentran instaladas la antena interior, la cámara y el repetidor, los tres equipos alimentados del mismo sistema fotovoltaico. La antena interior se encarga de radiar la señal que ya previamente ha sido amplificada por el booster, dicha señal es captada por la antena exterior, la cual, al asegurar una línea de vista (LOS) con la estación base de Claro (torre celular) de la tecnología 4G, se logra una optimización en la recepción de la señal. Por otro lado, el repetidor proporciona un punto de

acceso inalámbrico con el fin de mejorar la conectividad Wi-Fi, y la cámara de videovigilancia permite monitorear el entorno en donde se desplazará la estructura.

3.5. Metodología de medición

Para evaluar la efectividad del amplificador de señal LTE en la banda UHF, se han determinado cuatro puntos estratégicos dentro del campus de la UPSE. Estos puntos se seleccionaron bajo criterios de obstrucción física, distancia a la celda servidora y niveles críticos de potencia detectados en el estudio previo.



Figura 33. Puntos estratégicos de medición

En cada punto se realizó una medición en dos estados: **OFF** (amplificador apagado) para obtener la señal base, y **ON** (amplificador encendido) para cuantificar la ganancia real en dBm y la mejora en la calidad de la experiencia del usuario.

3.6. Análisis experimental del sistema

Antes de la implementación se analizaron los parámetros relacionados con la cobertura, la intensidad de la señal, la estabilidad del enlace y su distribución, tomando como referencia tanto la simulación desarrollada en Atoll como las condiciones experimentales de campo.

3.6.1. Simulación (Atoll)

Para el análisis del comportamiento de la señal LTE en el área de implementación del proyecto, se utilizó el software Atoll como herramienta de planificación y simulación de redes de telecomunicaciones empleada para el diseño y evaluación de sistemas inalámbricos.

Mediante este software se realizaron simulaciones de propagación radioeléctrica para estimar la intensidad de la señal, la cobertura LTE y el comportamiento del enlace inalámbrico dentro del entorno de implementación. Para ello, se configuraron parámetros de las antenas, la ubicación de la infraestructura celular y las características físicas y radioeléctricas del entorno. El mapa resultante permite visualizar gráficamente los niveles de recepción y las variaciones de cobertura obtenidas.

- **Diseño de red LTE para las operadoras**

Para la modelación y análisis de propagación, se estructuró una arquitectura de la red de acceso de LTE correspondiente a las tres operadoras de telefonía móvil; para ello se detallan los pasos seguidos en el desarrollo del proyecto:

- Recopilación de datos, consiste en investigar y obtener coordenadas de las radiobases actuales y cercanas del campus universitario.
- Creación de proyecto de tecnología 4G en el software Atoll.
- Configuración de la red: se establecen parámetros de alineación de cartografía y geolocalización de sitios asegurando que, al importar la base de datos mediante las coordenadas, estos se ubiquen en el cantón correcto del Ecuador en este caso Santa Elena.
- Creación de radiobases: coordenadas, altura, ganancia, potencia radiada de la antena, orientación de parámetros como el azimut, tilt eléctrico entre otros.
- Predicciones de cobertura que presenta el software.

Con base en la zona geográfica de la provincia de Santa Elena, se define la zona de estudio tal y como se muestra en la Figura 18. En la simulación se detalló la configuración de los emisores y el entorno electromagnético. La ubicación de los transmisores se definió mediante coordenadas geográficas bajo el sistema de referencia WGS84 - UTM Zona 17S.

Las antenas se configuraron a una altura de 30 metros sobre el nivel del suelo, con una ganancia de 18 dBi, una potencia de transmisión de 43 dBm operando bajo tecnología LTE en la Banda 2 y arreglos sectoriales en azimut con un tilt mecánico/eléctrico ajustado a las características de la zona. Estos parámetros de configuración se pueden visualizar en la Figura 34 y en la Figura 35.

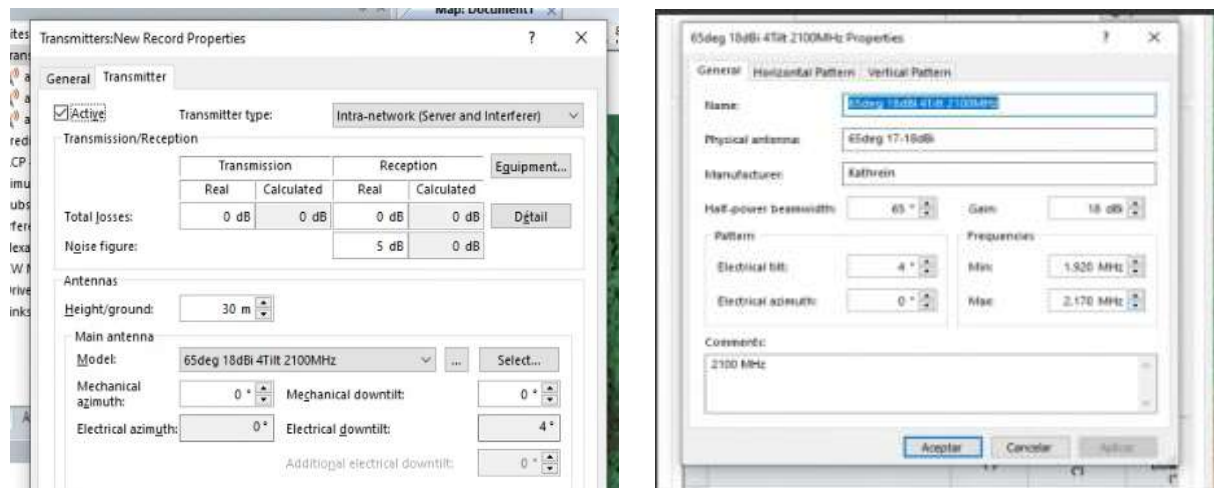


Figura 34. Parámetros de configuración de las radiobases

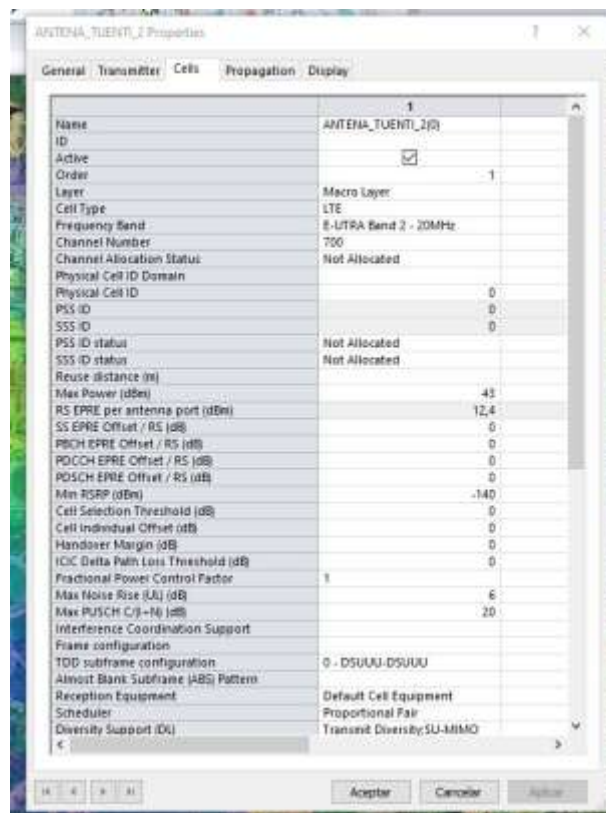


Figura 35. Configuración de celdas para cada operadora móvil

Hay que tener en cuenta que, al ser torres de telefonía móvil, apuntan en diferentes direcciones; por ello, cada antena contiene tres sectores:

- Sector 1: azimut de 0° .
- Sector 2: azimut de 120° .
- Sector 3: azimut de 240° .

Se dejó activo un sector de cada operador que estuviera orientado hacia la UPSE. Para las antenas de las operadoras, en la Figura 36 se muestra que se utilizó el modelo de propagación estándar de la industria para entornos urbanos/suburbanos Okumura-Hata. Este modelo permite calcular con precisión las pérdidas de trayectoria a grandes distancias considerando la frecuencia de operación.

A pesar de haber seleccionado el modelo adecuado, no se tomaron en consideración obstáculos ni mapas de clutter (suelo, edificios, entre otros). El software calculó la propagación asumiendo una línea de vista directa y un entorno despejado, permitiendo aislar el comportamiento de la radiación pura de las antenas sectoriales. Cabe destacar que en escenarios reales se debe tomar en cuenta cada uno de estos factores, puesto que la presencia de obstáculos en el entorno puede generar atenuación o pérdidas no contempladas.

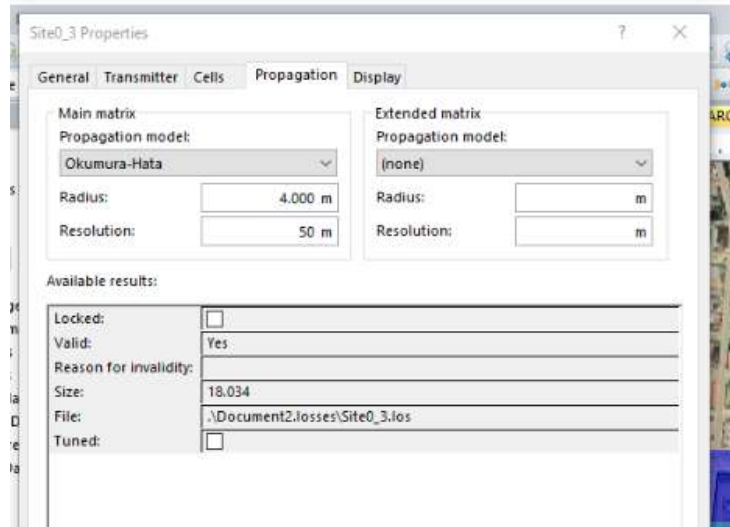


Figura 36. Modelo de propagación en el software Atoll

Una vez validada la calibración de los parámetros para las antenas de CNT, Claro y Tuenti, se procedió con la generación de las predicciones de señal (mapas de cobertura de niveles de potencia recibida/RSRP). Dichas predicciones permitieron graficar visualmente el alcance, las zonas de sombra y la calidad del enlace radioeléctrico sobre toda la extensión del campus universitario y sus áreas de influencia.

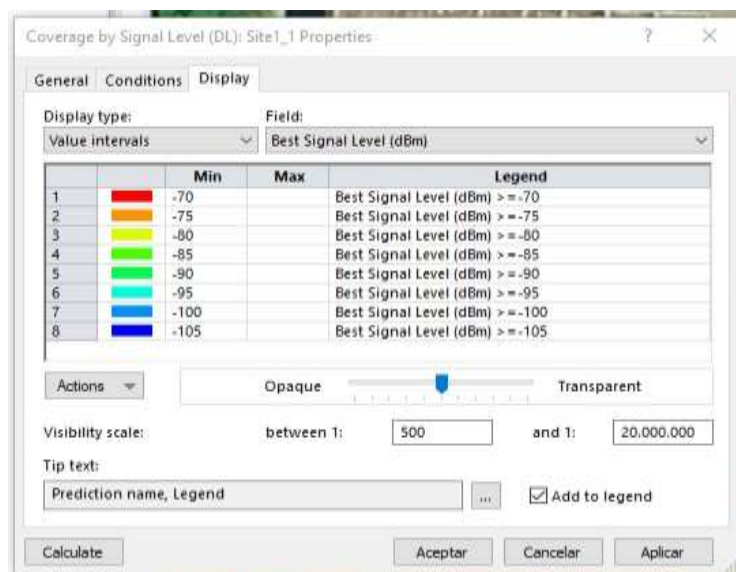


Figura 37. Cobertura por nivel de señal (Coverage by Signal Level)

La Figura 38 presenta la comparación de cobertura LTE simulada para las operadoras disponibles en el lugar de implementación del proyecto. A partir de los resultados obtenidos se identifican variaciones en la intensidad y distribución de señal dentro del área cercana al laboratorio de telecomunicaciones.

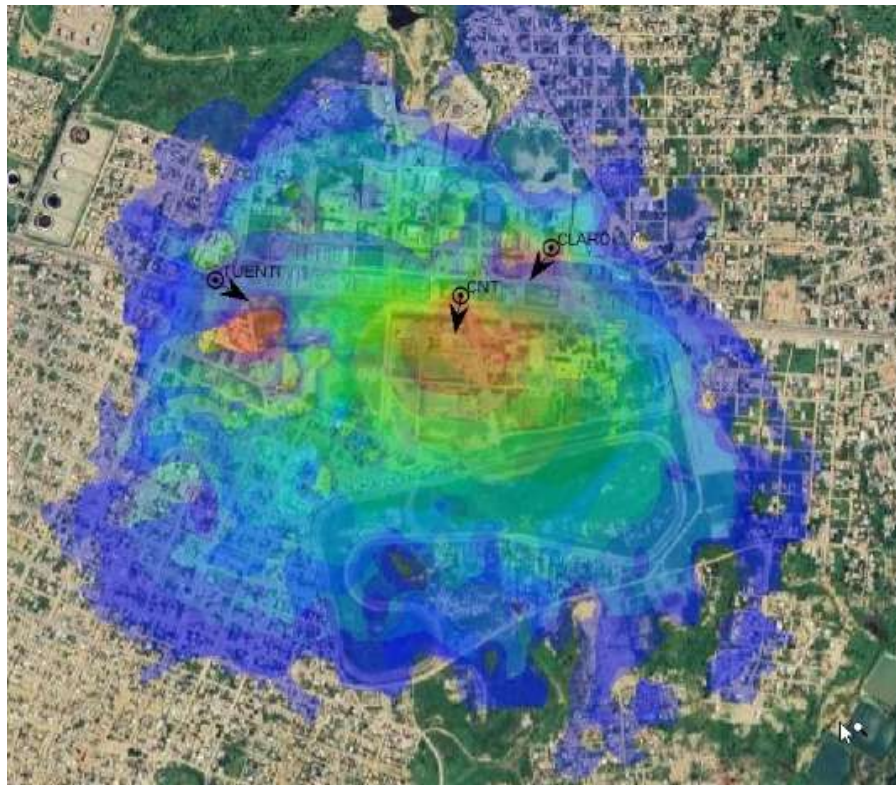


Figura 38. Cobertura móvil de las operadoras LTE

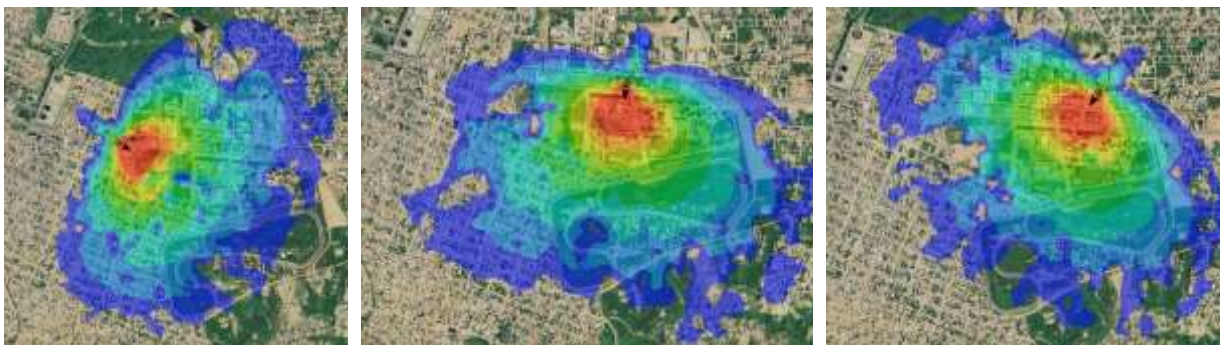


Figura 39. Cobertura Tuenti, CNT y Claro

El análisis realizado permitió determinar las condiciones de recepción LTE disponibles en el punto de implementación, considerando aspectos relacionados con estabilidad de señal, cobertura y viabilidad de conexión para el funcionamiento del amplificador 4G LTE propuesto en el sistema.

Tabla 30. Condición de cobertura de las operadoras móviles

Operadora	Nivel de señal	Condición de cobertura
CNT	Alta	Estable
Claro	Media	Moderada
Tuenti	Media	Variable

- **Configuración para el amplificador**

Es importante puntualizar que la simulación realizada para el amplificador tuvo como objetivo analizar y validar visualmente el comportamiento geométrico y la radiación estimada de la antena interior en un entorno ideal de espacio libre.

El modelado del nodo del amplificador se ejecutó siguiendo la misma secuencia de etapas de configuración utilizada para las estaciones base de las operadoras (Claro, CNT y Tuenti). Sin embargo, cada parámetro técnico fue ajustado de manera rigurosa a las especificaciones obtenidas del equipo físico disponible. A continuación, se detallan los parámetros que se utilizaron para la configuración de la antena interior que irradia la señal amplificada:

- Ubicación exacta de la antena indoor mediante coordenadas geográficas
- Ganancia de 8 dBi

- Altura de 2 m, medida desde el nivel del suelo hasta el extremo del soporte donde se ubica la antena interior.
- Resolución de 1 metro

Al omitir los obstáculos en el software, el criterio de calibración consistió en ajustar la potencia en Atoll hasta lograr que el contorno del degradado en espacio libre coincidiera con los puntos de control ideales medidos en campo (4 y 8 metros).

3.6.2. Equipo de conectividad implementado

Como parte de la implementación del sistema se utiliza el equipo amplificador LTE encargado de captar la señal celular disponible en el área de estudio y redistribuir conectividad inalámbrica dentro de la zona de implementación. El dispositivo opera en bandas LTE utilizadas por las operadoras móviles presentes en el sector y permite mejorar la disponibilidad de acceso a internet en áreas con limitada cobertura.



Figura 40. Área de cobertura del amplificador (antena interior)

En la Figura 40 se muestra que dentro de la simulación se configuró la antena interior del sistema, debido a que corresponde al elemento encargado de radiar la señal en el área de cobertura. Mediante el ajuste de la banda de operación y de los parámetros de propagación, se generó el mapa de calor, estimando un alcance aproximado de hasta 8 metros bajo condiciones adecuadas de funcionamiento, en donde la zona de color verde más cercana a la antena abarca 4 metros de distancia, lo que permite visualizar su alcance.

Para la interpretación del mapa del área de cobertura, se delimitaron los niveles de intensidad de señal de acuerdo con los rangos de potencia de referencia recibida. El alcance con señal de buena calidad es de 4 metros, dentro de los 8 metros de alcance total estimado, considerando que el área verde presenta una potencia entre -60 dBm y -87 dBm , siendo una señal buena para la zona de estudio.

3.6.3. Descripción técnica del equipo y bandas de trabajo

El amplificador de señal que se puede visualizar en la Figura 41 está diseñado para interceptar, amplificar y retransmitir las señales de telefonía móvil en cuatro bandas electromagnéticas diferenciadas, permitiendo la gestión independiente de la ganancia mediante perillas de control de ganancia en dB .



Figura 41. Amplificador de señal (booster)

El equipo cuenta con cuatro perillas, una por cada identificador, que permiten ajustar de forma independiente la ganancia de forma ascendente y descendente por banda, lo cual resulta útil para evitar saturación, ruido o pérdida de la calidad de la señal.

Tabla 31. Especificaciones de bandas y rangos de ajuste del amplificador

Identificador en panel	Banda	Frecuencia nominal	Aplicación en red celular	Rango máximo de ganancia
LTE	Banda 28	700 MHz	LTE de baja frecuencia (mayor penetración en interiores)	64 dB (Escala: OFF, 44, 54, 64)
CELL	Banda 5	850 MHz	Voz celular y Datos LTE de rango medio-bajo	64 dB (Escala: OFF, 44, 54, 64)

PCS	Banda 2 (L2)	1900 MHz	Datos LTE de alta capacidad y velocidad	70 dB (Escala: OFF, 50, 60, 70)
AWS	Banda 4 (B66)	1700 / 2100 MHz	Datos LTE de alta velocidad (Compatible con Ext. B66)	70 dB (Escala: OFF, 50, 60, 70)

En la Tabla 31 se detalla en qué banda trabaja cada identificador: en el caso de PCS, también se la puede visualizar como L2 en la aplicación G-NetTrack, de igual manera, es indispensable aclarar que la Banda 66 funciona como una extensión de la banda AWS (B4), permitiendo que ambos operen en el mismo segmento espectral.

Por otro lado, se identificó que en condiciones sin línea de vista (NLOS) directa entre la antena exterior y la estación base del operador, el nivel de la señal recibida caía por debajo del umbral de operación del amplificador, provocando el apagado automático de la banda.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

Una vez concluida la instalación de la estructura modificada, se procedió a la etapa de pruebas y a la recolección de datos. Este capítulo detalla los resultados, utilizando herramientas de diagnóstico especializadas y realizando mediciones de la cobertura de la señal 4G de la operadora Claro en el lugar de estudio antes y después de su funcionamiento, así como el desempeño del sistema fotovoltaico para los equipos periféricos y su uso durante 8 horas diarias.

4.1. Configuración de parámetros y calibración del booster RF

4.1.1. Configuración de las bandas de operación

Con base en el análisis de cobertura realizado en el capítulo anterior y las mediciones efectuadas en el área de estudio, se seleccionó la operadora Claro para el desarrollo de las pruebas experimentales. Esta elección se fundamenta en que, si bien la operadora presenta cobertura en el sector de implementación, se identificaron zonas donde la intensidad de la señal es débil e incluso nula, justificando la utilización de un sistema de amplificación LTE para mejorar las condiciones de recepción.

De acuerdo con lo expuesto, la configuración del amplificador se realizó considerando las bandas de frecuencia utilizadas por la operadora seleccionada, correspondientes a B2 (1900 MHz) y B4 (AWS 1700/2100 MHz). Estas bandas fueron habilitadas para el proceso de amplificación, mientras que las demás permanecieron desactivadas con el propósito de evitar la amplificación de señales innecesarias y reducir la posibilidad de interferencias durante el funcionamiento del sistema.

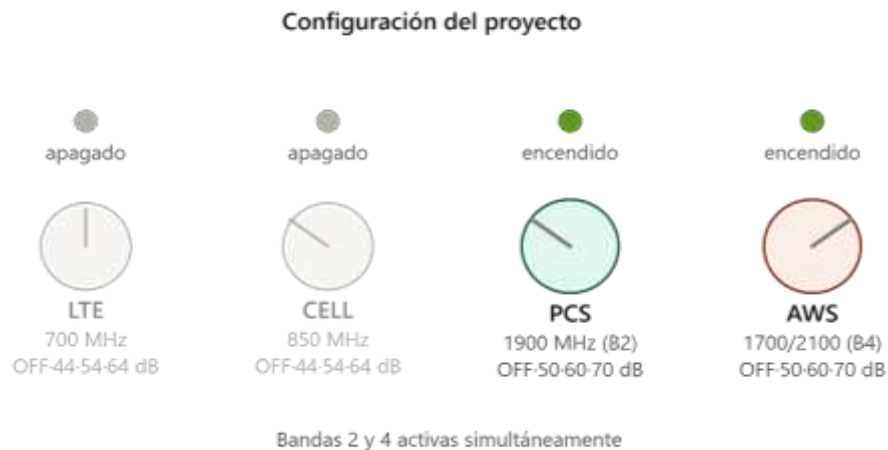


Figura 42. Configuración de perillas activas según la banda utilizada

La ganancia del amplificador se estableció inicialmente en 60 dB, valor recomendado por el fabricante para condiciones normales de operación. En aquellos casos donde fue necesario incrementar el nivel de amplificación debido a una menor intensidad de señal, la ganancia se ajustó hasta 70 dB, procurando mantener un funcionamiento estable del sistema.

4.1.2. Configuración de las antenas

Una vez establecida la configuración del amplificador, se verificó el correcto funcionamiento del sistema antes de iniciar las pruebas de cobertura. Para ello, se comprobó la alimentación del equipo, la conexión de las antenas exterior e interior y la activación de las bandas configuradas para la operadora Claro.

La antena exterior tipo Yagi fue orientada hacia la estación base seleccionada con el fin de captar la señal LTE disponible, mientras que la antena interior se ubicó estratégicamente para redistribuir la señal amplificadora dentro del área de estudio.

Tabla 32. Parámetros para la configuración de la antena

PARÁMETRO	CONFIGURACIÓN
Operadora	Claro
Bandas habilitadas	B2 (1900 MHz) y B66 (AWS 1700/2100 MHz)
Bandas deshabilitadas	700 MHz y 850 MHz
Ganancia inicial	60 dB
Ganancia máxima utilizada	70 dB
Antena exterior	Yagi direccional
Antena interior	Panel

Esta configuración permitió garantizar que las mediciones posteriores se realizaran bajo las mismas condiciones de operación.



Figura 43. Vista del amplificador integrado en la estructura modificada

4.2.Resultados de la implementación del sistema

Como se mencionó en el Capítulo 3, la metodología de medición consiste en evaluar el sistema en diferentes puntos del área de estudio, con el propósito de identificar la ubicación más adecuada para la instalación del amplificador LTE y maximizar el funcionamiento de los equipos.

Durante la implementación, la estructura fue ubicada en distintos puntos estratégicos alrededor del Laboratorio de Telecomunicaciones, considerando la potencia de la señal recibida, la orientación de la antena exterior hacia la estación base y la cobertura generada por la antena interior. En cada ubicación se realizaron mediciones mediante las aplicaciones de monitoreo LTE previamente seleccionadas, registrando parámetros como la intensidad y calidad de la señal para evaluar el desempeño del sistema. Los resultados obtenidos permitieron determinar la ubicación con buenas condiciones de amplificación y distribución de la señal, garantizando una cobertura más estable dentro del área de implementación.

Antes de la implementación del amplificador, se efectuó un recorrido por el área de estudio para registrar la intensidad de la señal LTE en los puntos seleccionados. La **Figura 33** muestra la distribución espacial de las mediciones realizadas en condiciones iniciales, evidenciando las zonas donde la cobertura presentaba niveles bajos de recepción.



Figura 44. Medición en los puntos estratégicos sin amplificar

Como se observa en la Figura 44, la mayor parte de los puntos evaluados presentan niveles de señal comprendidos entre -98 dBm y -108 dBm, valores que corresponden a una cobertura débil.

Una vez instalado y configurado el sistema de amplificación, se repitieron las mediciones en los mismos puntos de evaluación, manteniendo las mismas condiciones de prueba. La Figura 45 presenta la distribución de los niveles de señal obtenidos después de la implementación del amplificador, permitiendo realizar una comparación directa con las condiciones iniciales.



Figura 45. Medición en los puntos estratégicos con amplificación

En la Figura 45 se observa un incremento en la intensidad de la señal en el área de cobertura del amplificador. La mejora obtenida confirma que la configuración implementada permitió optimizar la recepción y distribución de la señal LTE dentro de la zona de estudio, incrementando la disponibilidad del servicio en los puntos evaluados. La Tabla 33 presenta los colores obtenidos en los resultados de cada uno de los puntos después de la implementación del amplificador, utilizando la aplicación G-NetTrack Lite para registrar los parámetros de la red móvil.

Tabla 33. Niveles de señal

Color	Nivel de señal (RSRP)	Interpretación
Naranja	Mayor a -80 dBm	Excelente
Verde	-80 a -90 dBm	Buena
Celeste	-90 a -100 dBm	Aceptable
Azul	-100 a -110 dBm	Débil
Gris	Menor a -110 dBm	Muy débil o sin cobertura

En la Tabla 34 se presentan los resultados generales obtenidos en los cuatro puntos de medición, comparando los valores registrados antes y después de la implementación.

Tabla 34. Puntos estratégicos de medición y resultados generales obtenidos

Punto de medición	Muestras analizadas	RSRP predominante sin amplificación (dBm)	% de muestras	Clasificación	RSRP predominante con amplificación (dBm)	% de muestras	Clasificación	Mejora del RSRP (dbm)
Punto 1	30	-100 a -105	85 %	Débil	-80 a -84	80 %	Buena	21

Punto 2	30	-100 a -105	80 %	Débil	-65 a -80	60 %	Excelente	30
Punto 3	30	-95 a -100	75 %	Débil	-75 a -84	70 %	Buena	20
Punto 4	32	-105 a -110	90 %	Crítica	-80 a -84	78 %	Buena	20

Los resultados obtenidos evidencian una mejora en la intensidad de la señal LTE en los cuatro puntos evaluados tras la implementación del sistema de amplificación. El parámetro RSRP presentó incrementos comprendidos entre 20 dB y 30 dB. Estos valores se determinaron mediante la diferencia entre el nivel de señal obtenido antes de la amplificación y el registrado después de la implementación del sistema. El análisis muestra que el punto 2 alcanzó la mayor mejora, con un incremento de 30 dB en el valor de RSRP.

4.3.Zona de instalación

Una vez determinado el punto óptimo, el sistema permaneció instalado en dicha ubicación para realizar pruebas complementarias de desempeño de la red. Estas pruebas tuvieron como objetivo evaluar el comportamiento de la conexión en términos de velocidad de descarga (*download*) y velocidad de carga (*upload*), utilizando la aplicación nPerf.



Figura 46. Punto estratégico elegido para el montaje definitivo por su óptimo nivel de señal

Para su análisis se usaron las aplicaciones G-NetTrack y nPerf, las cuales permitieron medir RSRP, RSRQ, la velocidad de descarga y carga de datos bajo las condiciones de operación del sistema.

Para evaluar el impacto del amplificador, las mediciones se efectuaron antes y después de su implementación, manteniendo las mismas condiciones de prueba. Los resultados obtenidos permitieron comparar el desempeño de la conexión y verificar la mejora alcanzada mediante la amplificación de la señal LTE.

Tabla 35. Análisis de los niveles de señal del sistema con y sin amplificador

Parámetro	Sin amplificador	Con amplificador	Variación
Banda LTE	B66	B66	Sin cambio
RSRP (dBm)	-93	-62	+31 dB
RSRQ (dB)	-12	-13	-1 dB
SNR (dB)	3.0	0.0	-3.0 dB
RSSI (dBm)	-57	-51	+6 dB

Los resultados presentados en la Tabla 35 tomados de la aplicación G-NetTrack evidencian una mejora en la potencia de la señal recibida tras la implementación del amplificador. El RSRP pasó de -93 dBm a -62 dBm, representando un incremento de 31 dB, mientras que el RSSI también mostró un aumento en su nivel de recepción. Por otra parte, el RSRQ y el SNR no presentaron una mejora significativa, debido a que estos parámetros dependen de factores como la interferencia, la carga de la estación base y las condiciones del canal radioeléctrico. En conjunto,

los resultados confirman que el sistema de amplificación cumplió con su objetivo principal de incrementar la cobertura LTE en el punto de evaluación.

Para evaluar el rendimiento práctico de la red en los escenarios, se utilizó la herramienta de diagnóstico nPerf. A través de este software, se realizaron pruebas en tiempo real que permitieron registrar valores clave como la velocidad de descarga y la velocidad de carga de la conexión. Los datos obtenidos mediante esta aplicación se presentan de forma detallada en la Tabla 36:

Tabla 36. Análisis del rendimiento del sistema con y sin amplificador

Parámetro	Sin amplificador	Con amplificador	Interpretación
Score (nPoints)	56 850	65 430	Se evidencia una mejora general en el rendimiento de la conexión.
Download (Mbps)	11.8	16.5	Aumento de la velocidad de descarga.
Upload (Mbps)	5.2	6.4	Incremento en la velocidad de carga.
Ping (ms)	42	34	Reducción del tiempo de respuesta de la red.
Navegación web (%)	86	75	Mayor tiempo de carga de páginas y posibles interrupciones
Streaming (%)	82	80	Se mantiene la calidad de vídeo

Los resultados obtenidos con la aplicación nPerf muestran una mejora general en el rendimiento de la conexión LTE tras implementar el sistema de amplificación. El Score aumentó de 56 850 a 65 430 puntos, con incrementos en las velocidades de descarga y carga, que pasaron

de 11.8 Mbps a 16.5 Mbps y de 5.2 Mbps a 6.4 Mbps, respectivamente. Además, el tiempo de respuesta de la red se redujo de 42 ms a 34 ms, reflejando una comunicación más eficiente entre el dispositivo y la estación base.

Aunque los indicadores de navegación web y streaming mostraron ligeras variaciones durante las pruebas, estas pueden atribuirse a factores externos como la carga de la red móvil, el número de usuarios conectados y las condiciones del entorno radioeléctrico al momento de la medición. No obstante, los resultados permiten concluir que la implementación del sistema de amplificación mejoró el rendimiento general de la conexión LTE en el área de estudio.

4.4.Comparativa entre la simulación teórica en Atoll y los datos experimentales

Con el fin de validar el modelo de propagación propuesto en Atoll, se realizó una comparativa técnica entre la predicción de cobertura generada en software y los datos de señal capturados in situ mediante mediciones de campo.

Tabla 37. Comparativa teórica vs datos reales

Parámetro	Simulación (Teórico)		Datos Reales (Final)	
Alcance efectivo	~ 4 metros	~ 8 metros	~ 4 metros	~ 8 metros
Intensidad de señal	-70 dBm a - 85 dBm	-90 dBm a - 120dBm	-70 dBm a -87 dBm	-95 dBm a -110 dBm

Para efectos de validación, la simulación contempló un radio de alcance de hasta 8 metros alrededor de cada punto de amplificación. Este margen de diseño se estableció con el objetivo de

asegurar que, dentro de los 4 metros de cobertura efectiva requerida, la señal se mantenga estable y libre de fluctuaciones críticas, tal y como se demuestra en la Figura 47.



Figura 47. Entorno de simulación de la antena interior

Es importante señalar que los equipos de amplificación seleccionados están diseñados específicamente para despliegues de baja potencia (entornos *indoor/outdoor* de corto alcance). Esto explica el radio de cobertura acotado en la simulación y confirmado en la práctica. Esta selección fue intencional para evitar la saturación del espectro y limitar la propagación de señal no deseada fuera del área específica, garantizando un entorno de red controlado y eficiente.

En consecuencia, la comparación entre la simulación en Atoll y las mediciones reales mostró una tendencia similar en la distribución de cobertura, validando el diseño planteado para el sistema de amplificación.

4.4.1. Análisis de error absoluto y grado de concordancia

Para validar la simulación, se calculó el Error Absoluto entre los valores promedio medidos con la aplicación móvil y los valores predichos por Atoll en los mismos puntos de evaluación (4 metros y 8 metros):

A. Punto 1 (distancia de 4 metros)

- **Valor simulado (promedio):** el software estima un rango de -70 dBm a -85 dBm, estableciendo una media de -77,5 dBm
- **Valor real (promedio):** las mediciones de campo estiman un rango de -70 dBm a -87 dBm, estableciendo una media de -78,5 dBm

➤ Cálculo del error absoluto

$$Error\ Absoluto = |V_{real} - V_{simulado}| \quad (41)$$

$$Error\ Absoluto = |-78,5\text{ dBm} - (-77,5\text{ dBm})|$$

$$Error\ Absoluto = |-1,0\text{ dBm}| = 1,0\text{ dB}$$

B. Punto 2 (distancia de 8 metros)

- **Valor simulado (promedio):** el software estima un rango de -90 dBm a -120 dBm, estableciendo una media de -105 dBm
- **Valor real (promedio):** las mediciones de campo estiman un rango de -95 dBm a -110 dBm, estableciendo una media de -102,5 dBm

➤ **Cálculo del error absoluto**

$$Error\ Absoluto = |V_{real} - V_{simulado}| \quad (42)$$

$$Error\ Absoluto = |-102,5\ dBm - (-105\ dBm)|$$

$$Error\ Absoluto = |2,5\ dBm| = 2,5\ dB$$

Los errores absolutos obtenidos a 4 metros y a 8 metros, como se demuestra en las ecuaciones (41) y (42), cumplen de forma estricta con los objetivos de calidad fijados por el fabricante Forsk para sitios de verificación, los cuales exigen un margen de desviación global no superior a los 2,5 dB para validar la confiabilidad de la simulación (Atoll, 2016).

Estos resultados demuestran que, a pesar de que la simulación analizó la radiación pura de la antena en espacio libre (sin considerar los obstáculos), la calibración de la potencia en -28 dBm y la resolución a 1 metro lograron modelar el comportamiento real del amplificador con un margen de error mínimo.

4.5.Evaluación del desempeño energético del sistema

En esta etapa se verificó el funcionamiento del sistema fotovoltaico implementado para garantizar el suministro de energía al sistema de telecomunicaciones. El sistema está conformado por los paneles solares, el controlador de carga, el banco de baterías y el inversor, elementos que permiten almacenar y suministrar la energía necesaria para el funcionamiento del amplificador LTE durante las pruebas experimentales.

Una vez instalado el sistema, se comprobó el correcto acoplamiento entre la fuente de alimentación y los equipos periféricos (cámara, repetidor wifi, amplificador), verificando la estabilidad del voltaje de salida y el adecuado funcionamiento de todos los componentes durante las ocho horas propuestas.

4.5.1. Comportamiento diario del sistema

Con la finalidad de evaluar el desempeño real del sistema fotovoltaico, se realizaron mediciones de campo durante un periodo de 8 horas (09:00 a 17:00), registrando el voltaje de la batería y la corriente generada por los paneles. Las mediciones se obtuvieron mediante pinza amperimétrica en modo de corriente continua (DC), tomadas en los conductores correspondientes a la salida de los paneles hacia el controlador de carga, y a la salida del controlador hacia el inversor. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 38:

Tabla 38. Comportamiento diario del sistema fotovoltaico

Hora	V_batería (V) (panel≈batería)	I_paneles→ controlador (A)	P_generada (W)	I_carga bat. (A)	Energía acumulada (Wh)
9:00 - 10:00	13,2	2,52	33,264	2,8	33,264
10:00 - 11:00	13,8	4,22	58,236	2,9	91,5
11:00 - 12:00	13,9	5,3	73,67	3,3	165,17
12:00- 13:00	14,2	5,4	76,68	3,5	241,85
13:00 - 14:00	14,1	5,21	73,461	3,6	315,311
14:00 - 15:00	14,0	4	56	3,5	371,311
15:00 - 16:00	13,5	2,52	34,02	3,2	405,331
16:00 - 17:00	13,3	1,4	18,62	2,9	423,951
PROMEDIO			52,9 W		
ENERGÍA TOTAL GENERADA (Wh)			423,951 Wh		

Los resultados obtenidos en la jornada de evaluación demostraron que el sistema fotovoltaico entregó la energía necesaria para mantener operativo el amplificador LTE y los equipos periféricos en el horario de pruebas entre las 09:00 y 17:00 horas. Se realizó este análisis con el objetivo de validar el rendimiento del sistema en un entorno controlado y observar su funcionamiento en condiciones reales de radiación solar.

Aunque el sistema funcionó de forma estable durante todo el día, no fue dimensionado para poder operar de forma continua las 24 horas del día. La capacidad de almacenamiento del banco de baterías y la potencia instalada de los paneles fotovoltaicos se seleccionaron para satisfacer la demanda energética del período de evaluación. Por lo tanto, para conseguir una autonomía de funcionamiento permanente se necesitaría aumentar tanto la capacidad de generación fotovoltaica como la capacidad de almacenamiento de energía del sistema.

4.5.2. Consumo energético de equipos conectados

Para determinar la demanda energética real del sistema, se midieron de forma individual el voltaje y la corriente de consumo de cada uno de los tres equipos instalados: cámara IP, repetidor y amplificador. Esta medición permitió cuantificar la potencia consumida por cada dispositivo y establecer el consumo energético diario total del sistema, expresado en vatios-hora (Wh). Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 39. Consumo de los equipos conectados al sistema

Equipo	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Horas de uso/día (h)
Cámara IP	10 V	0,5 A	5 W	8 h
Repetidor	54 V	0,3 A	16,2 W	8 h
Amplificador	5 V	2 A	10 W	8 h
TOTAL		2,8 A	31,2 W	
Energía total consumida por día (Wh):		249,6 Wh		

Una vez analizados los resultados, el sistema fotovoltaico proporcionó la energía necesaria para el funcionamiento del amplificador y los equipos asociados durante el periodo de pruebas, demostrando la viabilidad de la alimentación autónoma propuesta

4.6. Validación del diseño mediante comparación con resultados de campo

Con el objetivo de validar el dimensionamiento del sistema fotovoltaico realizado en el Capítulo 3, se compararon los valores teóricos calculados durante la fase del diseño con los valores obtenidos a través de las mediciones de campo. Esta comparación permite identificar en qué medida varía lo proyectado respecto de lo medido, y establecer si dichas diferencias corresponden a condiciones ambientales, pérdidas del sistema u otros factores propios de la instalación.

Tabla 40. Comparación de diseño teórico vs resultados

Parámetro	Valor calculado (Cap. 3)	Valor medido en campo
Potencia panel (W)	100 W	100 W
Corriente del panel (A)	5,4 A	3,82 A
Energía generada por día (Wh)	362,88 Wh	423,951 Wh

Consumo total de equipos (W)	31,2 W	31,2 W
Energía consumida por día (Wh)	277,33 Wh	249,6 Wh
Autonomía de batería (h)	8 h	8 h

A partir de la Tabla 40, se evidencia la validez técnica del dimensionamiento teórico frente a la respuesta operativa del prototipo en condiciones reales de campo. La corriente generada por los paneles fotovoltaicos en campo fue de 3,82 A, valor inferior al nominal de la ficha técnica (5,4 A), debido al calentamiento de los módulos y a las condiciones de irradiación instantánea en el campus. En cambio, la energía total diaria generada (423,951 Wh) superó la estimación teórica de diseño (362,88 Wh). Asimismo, el consumo real de los equipos se mantuvo por debajo de la demanda calculada, lo que garantizó un margen positivo de autonomía y confirmó que el sistema operó con total estabilidad y autosuficiencia durante la jornada de 8 horas.

CONCLUSIONES

- El análisis del estado del arte sobre las telecomunicaciones en zonas rurales permitió identificar que la tecnología LTE es una alternativa adecuada para la expansión de la cobertura de servicios móviles en zonas con escaso acceso a la infraestructura de telecomunicaciones; asimismo, se determinó que los sistemas de amplificación de señal constituyen una solución técnicamente viable para mejorar la intensidad de la señal en aquellas zonas con cobertura deficiente, siempre que exista una buena recepción de la señal procedente de la estación base.
- La simulación realizada en el software Atoll permitió representar el comportamiento esperado de la cobertura del sistema de amplificación. Posteriormente, se realizaron mediciones en campo que mostraron un comportamiento coherente con la simulación, confirmando que la implementación del amplificador mejora la intensidad de la señal LTE dentro del área de cobertura establecida.
- La implementación del sistema de amplificación LTE en los laboratorios de Telecomunicaciones permitió mejorar la cobertura de la red móvil dentro del área de estudio. Para establecer la ubicación final de la estructura se consideraron cuatro puntos de medición escogidos previamente por presentar niveles bajos o nulos de cobertura. Los resultados obtenidos demostraron un incremento en la intensidad de la señal LTE, los valores de RSRP pasaron de un rango de entre -95 dBm y -110 dBm a valores entre -65 dBm y -84 dBm, registrándose mejoras de entre 20 dB y

30 dB. El Punto 2 tuvo el mayor incremento de RSRP, por lo que fue elegido como la ubicación definitiva para la instalación del sistema de amplificación.

- El uso de las aplicaciones G-NetTrack y nPerf permitió evaluar el rendimiento de la red LTE antes y después de implementar el sistema. Con G-NetTrack se obtuvieron parámetros de cobertura, especialmente el RSRP, mientras que nPerf se utilizó para verificar el desempeño de la red mediante pruebas de velocidad de descarga y carga en el punto de instalación, lo que confirmó una mejora en el rendimiento tras la implementación del sistema.
- El análisis comparativo de las diferentes fuentes de energía renovable permitió determinar que la energía fotovoltaica es la alternativa más adecuada para alimentar los sistemas autónomos de telecomunicaciones, debido a la disponibilidad del recurso solar en la provincia de Santa Elena, la facilidad de implementación, el bajo mantenimiento y la capacidad de proporcionar energía de forma sostenible durante la jornada laboral establecida.
- Se añadió un segundo panel fotovoltaico de 50 W conectándolo en paralelo con el primero, lo que permitió duplicar la capacidad del sistema, pasando a contar con 100 W, suficiente para alimentar simultáneamente el amplificador LTE y los equipos periféricos instalados en la estructura durante la jornada de pruebas. También se pudo comprobar que el comportamiento del sistema depende de una adecuada configuración del amplificador y de una correcta orientación de la antena exterior hacia la estación base, condiciones que permitieron obtener los mejores niveles de cobertura en el área de estudio.

- Se determinó que las bandas LTE B2 (1900 MHz) y B4 (AWS 1700/2100 MHz), de la operadora Claro, constituyen la configuración de trabajo más adecuada para implementar el sistema de amplificación en el área de estudio. La elección de estas bandas permitió optimizar la recepción de la señal, minimizar la posibilidad de interferencias provenientes de otras bandas de frecuencia y obtener los mayores incrementos en los niveles de RSRP durante las pruebas realizadas.

RECOMENDACIONES

- **Ubicación de la antena exterior:** Evaluar la instalación de un mástil de mayor altura para la antena receptora, con el objetivo de mejorar la línea de vista hacia la estación base de la operadora y optimizar la captación de la señal LTE.
- **Configuración del amplificador:** Ajustar la ganancia del amplificador de acuerdo con las condiciones de cobertura del sitio y las bandas de frecuencia de la operadora, evitando niveles excesivos que puedan provocar saturación o interferencias.
- **Protección del sistema RF:** Incorporar protectores contra descargas atmosféricas (lightning arrestor) y una adecuada puesta a tierra del mástil, la antena exterior y el gabinete del sistema, con el fin de proteger los equipos frente a sobretensiones inducidas.
- **Alineación de la antena exterior:** Es conveniente verificar que la antena exterior tenga una línea de vista adecuada hacia la antena sectorial de la operadora. Si el LED del amplificador cambia de color de verde a rojo durante la instalación, puede ser una señal de que la antena no está alineada correctamente o de que la recepción de la señal es deficiente. En esos casos, se deben realizar pequeños cambios en la

orientación de la antena exterior, aproximadamente 5° a la izquierda o a la derecha, hasta que el indicador vuelva a ser verde y obtenga una mejor recepción de la señal LTE.

- **Protección del sistema DC:** Incorporar fusibles o interruptores de corriente continua (DC) entre el panel fotovoltaico, el regulador de carga y la batería, con el fin de proteger el sistema frente a sobrecorrientes y cortocircuitos.
- **Monitoreo energético:** Implementar un sistema de monitoreo basado en Internet de las Cosas (IoT) que permita supervisar en tiempo real variables como voltaje, corriente, estado de carga de la batería, potencia generada por el panel solar y consumo del sistema.

REFERENCIAS

Albarrán, C. (2025). *Qué es el espectro electromagnético, cómo influye y aplicaciones*. REDES&TELECOM.

Alberca, B. K. (2019). *Diseño de un sistema distribuido de antenas para mejorar la red móvil interior de centros comerciales de Piura*. Piura-Peru.

Alonso, J. A. (2025). *Sistemas fotovoltaicos: que son, componentes, dimensiones, tipos e instalación*. SUNFIELDS.

Álvarez, C. (2023). *Análisis de las señales e interferencias mediante el software SITESURVEY para las redes inalámbricas. Caso de uso: Empresa Edesa*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Obtenido de <https://repositorio.puce.edu.ec/items/a9072dcf-f9b1-4a68-bb0b-a4ce6bde147d>

Anern. (2025). *Panel solar*. Obtenido de <https://es.anern.net/monocrystalline-solar-panel>

AntenasTelco. (s.f.). *4G LTE Signal Strength Reference Guide*. telcoantennas.

Arcotel. (2017). *Espectro Radioeléctrico*. arcotel.gob.ec/.

Arcotel. (2018). *Boletín estadístico radiobases*. Obtenido de https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/01/BOLETIN-ESTADISTICO-Diciembre-2018-v4_4.pdf

Arcotel. (2020). *Infraestructura y cobertura SMA*.

Arismas. (2017). *Calculadora LTE RSRP, RSRQ y RSSI*. arismas.

Atoll. (2016). *Model Calibration Guide*. Forsk.

Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design (4th ed.)*. Wiley.

Brio, J. D. (2022). *¿Qué es el nivel de potencia en dBm? Guía completa 2025 para medir la intensidad de señal móvil y WiFi*. AMPLIFICADORMOVIL.

Cabrera, A. D., & Reino, N. A. (2024). *Desarrollo de un sistema para la recolección de energía radioeléctrica en la banda UHF usando antena patch*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.

Cano, D. (2010). *Energía solar fotovoltaica: fundamentos, tecnologías y aplicaciones*. Madrid: Paraninfo.

Casallo, J. (2018). *Física - IES de Castuera*. Recuperado el 21 de 06 de 2025, de https://fyq2016.weebly.com/uploads/6/0/0/9/60092831/ondas_electromagneticas.pdf

Chiliquinga, D. J. (2023). *Sistema híbrido solar-radiofrecuencia de recolección de energía para terminales de quinta generación 5G*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

CISCO. (2025). *Relación señal-ruido (SNR) e intensidad de la señal inalámbrica*. CISCO.

Cortés, J. T. (s.f.). *Propagación de RF en las bandas: LF, MF, HF, VHF, UHF y VHF*. Puebla: Universidad de las Américas Puebla. Recuperado el 18 de 06 de 2025, de https://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/trevino_c_jt/

- Cumanda, Y. A. (2010). *Estudio de los canales con desvanecimiento sobre redes fijas y móviles en sistemas de radio comunicación*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Recuperado el 26 de 06 de 2025, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1455/1/CD-2729.pdf>
- Curipallo, M. (2022). *Análisis de la relación existente entre la velocidad de conexión y la velocidad del terminal móvil en una conexión permanente mediante mediciones de campo*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Delta. (s.f.). *Ganancia de potencia de la antena isotrópica*. Delta.
- Endesa. (04 de 03 de 2025). *Energía térmica*. Obtenido de <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/sector-energetico/energia-termica-que-es-funcionamiento>
- Enelx. (s.f.). *¿Qué es un sistema fotovoltaico y cómo funciona?* enelx.
- Galarza, R. (2022). *Implementación de una antena amplificadora de cobertura de red celular GSM mediante repetidores activos en la comunidad del recinto San José de Villao*. Manabí: Universidad Estatal del Sur de Manabí. Recuperado el 17 de 04 de 2025, de <https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/3635>
- GrupoNap. (2007). *Energía solar fotovoltaica*. ISBN: 978-84-935049-6-0. Madrid: coit.
- Henriksson, R. M. (16 de octubre de 2024). *Comprensión de la calidad de la señal: RSSI, RSRP y RSRQ*. (eseye) Recuperado el 10 de 06 de 2015, de <https://www.eseye.com/resources/iot-explained/understanding-signal-quality-rssi-rsrp-and-rsrq/>

- Hernández, M. (2026). *Optimización de antenas Yagi-Uda duales en frecuencias y polarización mediante algoritmos genéticos*. Cataluña: UOC (Universitat Oberta de Catalunya).
- Herrera, P. A., & Aguilera, J. I. (2022). *Diseño y simulación de una estación de cobertura celular a la población del recinto Cabuyal del cantón Santa Lucia perteneciente a la provincia del Guayas*. Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado el 22 de 04 de 2025, de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22855>
- Insoelec Solar. (1 de 11 de 2025). *Horas sol pico*. Obtenido de <https://insoelecsolar.com/cuantas-hsp-horas-solar-pico-tiene-tu-zona-y-por-que-es-importante/>
- Institute Aprende. (2019). *¿Qué es la energía eólica y cómo funciona? aprende*.
- Jiménez, M. V., & Paucar, F. D. (2008). *Diseño de una red digital para el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Recuperado el 23 de 06 de 2025, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/910>
- Katz, R. (09 de 05 de 2023). La cobertura de banda ancha móvil es del 70% en las ciudades; pero de apenas el 20% en las zonas rurales. *LA HORA*. Obtenido de <https://www.lahora.com.ec/archivo/La-cobertura-de-banda-ancha-movil-es-del-70-en-las-ciudades-pero-de- apenas-el-20-en-las-zonas-rurales-20230509-0051.html>
- Kukushkin, A. (2018). *Introduction to Mobile Network Engineering: GSM, 3G-WCDMA, LTE and the Road to 5G*. Wiley.

- Kywi. (2026). *Protector de voltaje*. Obtenido de <https://www.kywitiendaenlinea.com/protector-d-voltaje-1toma-3p-sencillo--120v/p>
- Lascano, A. (2025). *Implementación de un prototipo de red inalámbrica en la banda de 2.4 GHz en zonas de baja cobertura alimentada por energía solar*. La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena.
- León, L. M. (2010). *Planificación y diseño de la ampliación de cobertura de la red celular GSM y ajuste de parámetros (Initial Tuning) mediante un repetidor activo para la zona norte de la provincia de Napo para una empresa de telefonía celular*. Quito: Escuela Politécnica Nacional(FIEE). Recuperado el 22 de 04 de 2025
- Lino, C. A. (2016). *Simulación y análisis de desempeño de la red LTE para infraestructura de medición avanzada en Smart Grid*. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Recuperado el 10 de 6 de 2025, de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/141239/Simulacion-y-analisis-de-desempeno-de-la-red-LTE-para-infraestructura-de-medicion-avanzada-en-Smart-Grid.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Luque López, A., & Hegedus, S. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Reino Unido: Chichester .
- Méndez, M., & López, J. L. (2012). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Madrid (España): McGraw-Hill.

Mercado Libre. (2025). *MercadoLibre Ecuador*. Obtenido de Batería de gel 12V 55Ah:
<https://www.mercadolibre.com.ec/baterias-de-gel-12v-55ah/up/MECU3882061598>

Minghui, W. (2025). *What Is SNR?* iNFO Finder.

MINTEL. (2022). *La tecnología 4G permite avanzar más en las telecomunicaciones a nivel nacional*. Mintel. Recuperado el 21 de 06 de 2025, de
<https://www.telecomunicaciones.gob.ec/tecnologia-4g/>

Moreno, M. J. (s.f.). *Red de sensores inalámbricos para el canal del Bajo Guadalquivir: Planificación y pruebas de viabilidad*. Sevilla: Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.
Recuperado el 21 de 06 de 2025, de
https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/12046/fichero/2_Capitulo2.pdf

Morin, J. (2012). *Uso de una antena Yagi en un sistema amplificador de señal de teléfono celular*. UberSignal.

Moviles.info. (2025). *Frecuencias de bandas en Ecuador*. Obtenido de
<https://moviles.info/frecuencias/ecuador/>

NASA POWER. (2026). *POWER Data Access Viewer*. Obtenido de NASA POWER Project:
<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Nozhan Hosseini, M. K. (2020). *Atenuación de varios materiales de construcción comunes en bandas de frecuencia de ondas milimétricas: 28, 73 y 91 GHz*. Ingeniería Eléctrica y Ciencia de Sistemas > Procesamiento de Señales.

Okumura, Y., Ohmori, E., Kawano, T., & Fukuda, K. (s.f.). Field strength and its variability in the VHF and UHF land mobile radio service. *Review of the Electrical Communication Laboratory*.

Quistial, A. P. (2016). *Modelo matemático adaptado de pérdidas de trayectoria mediante el análisis de propagación en la banda de 850 MHz para una zona urbana de Quito*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Recuperado el 25 de 06 de 2025, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16924/1/CD-7505.pdf>

Ruiz, J. A. (01 de 02 de 2024). *wuolah*. Obtenido de <https://wuolah.com/blog/ley-de-snell/>

Smith, G. M. (2023). *¿Qué es un amplificador de señal y cómo funciona?* DEWESoft.

Solutions Gyokov. (2025). *G-NetTrack*. Recuperado el 24 de 05 de 2026, de <https://gyokovsolutions.com/g-nettrack/>

Tavtechsolutions. (2024). *Antena Yagi*.

Teltonika. (2024). *¿Qué significan RSSI y RSRP en la configuración de su red?* teltonika networks.

Tomasi, W. (s.f.). *Sistemas de comunicaciones electrónicas- Cuarta Edición*. Arizona.

Xirio. (2025). *OKUMURA-HATA*. Obtenido de <https://www.xirio-online.com/web/help/es/okumura-hata.htm>

ANEXOS

Anexo A



Nota: La fotografía muestra el amplificador multibanda (LTE/CELL/PCS/AWS) integrado en la sección interior del gabinete de protección con sus respectivas conexiones; del mismo modo, muestra cómo quedó configurado para las bandas 2 y 4, identificadas como PCS y AWS, las cuales quedaron activas para su uso.

Anexo B



Nota: La fotografía muestra cómo la cámara quedó activa para la vigilancia de la estructura móvil, ya que el lugar de estudio se encuentra en una zona de acceso relativamente distante.

Anexo C



Nota: En la fotografía se visualizan las redes activas configuradas en el repetidor Wi-Fi, implementadas con el fin de garantizar conectividad eficiente.

Anexo D



Operador: Claro			
MCC: 740	MNC: 01	TAC: 60408	Tipo: 4G
eNB: 200420	CID: 13	PCI: 74	TA: 3
ARFCN: 66736	BAND: L66	BW: [20/15] CA	
F DL: 6467,6 MHz		F UL:	
RSRP: -55	RSRQ: -19	SNR: 2.0	CQI: -
		RSSI: -51	
Longitud: -80.88052	Latitud: -2.234044		
Velocidad: 0 km/h	Dirección: 0° N	GPS Exactitud: 3m	
Alto: 50m	Altitud: 50m	Nivel del suelo: 0m	
CARGA: 0 kbps	DESCARGA: 0 kbps		
Datos: Claro-4G	IDLE		

Nota: Toma de la aplicación G-NetTrack con el amplificador encendido.

Anexo E



Operador: Claro			
MCC: 740	MNC: 01	TAC: 60406	Tipo: 4G
eNB: 201237	CID: 12	PCI: 404	TA: 5
ARFCN: 66736	BAND: L66	BW: [20/15] CA	
F DL: 6467,6 MHz		F UL:	
RSRP: -107	RSRQ: -17	SNR: 2.0	CQI: -
		RSSI: -69	
Longitud: -80.88049	Latitud: -2.234052		
Velocidad: 0 km/h	Dirección: 0° N	GPS Exactitud: 3m	
Alto: 56m	Altitud: 56m	Nivel del suelo: 0m	
CARGA: 0 kbps	DESCARGA: 0 kbps		
Datos: Claro-4G	IDLE		

Nota: Datos con el amplificador apagado.