



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

Diseño e implementación de un sistema híbrido de comunicaciones para proveer el servicio de internet a un cliente corporativo en el distrito de los Baños del Inca en la región Cajamarca

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Electrónica

AUTOR

Mirta ALDAZABAL PULCHA

ASESOR

Mg. Luz Antuanet ADANAQUÉ INFANTE

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Aldazabal, M. (2026). *Diseño e implementación de un sistema híbrido de comunicaciones para proveer el servicio de internet a un cliente corporativo en el distrito de los Baños del Inca en la región Cajamarca*. [Trabajo de Suficiencia Profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Mirta Aldazabal Pulcha
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70030827
URL de ORCID	No Aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Luz Antuanet Adanaqué Infante
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	44553754
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9475-3788
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Jorge Elías Moscoso Sánchez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07206008
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Daniel Díaz Ataucuri
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07139361
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Arlich Joel Portillo Allende
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10125495
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.3.5. Comunicaciones inalámbricas
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: ALS Perú S.A. País: Perú

	Departamento: Cajamarca Provincia: c Distrito: El Carmen Latitud: - 7.138111 Longitud: - 78.468056
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Enero 2019 – Junio 2019
URL de disciplinas OCDE	Telecomunicaciones https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.05



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



ACTA DE SUSTENTACIÓN
TRABAJO DE
SUFICIENCIA PROFESIONAL
ACTA N°53/FIEE-PPP/2026

Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 13 de Agosto del 2026, como Presidente de Jurado el **DR. JORGE ELÍAS MOSCOSO SÁNCHEZ**, integrado por el Miembro de Jurado el **MG. DANIEL DÍAZ ATAUCURI**, el Miembro de Jurado el **MG. ARLICH JOEL PORTILLO ALLENDE** y Miembro Asesor la **MG. LUZ ANTUANET ADANAQUÉ INFANTE**.

Después de escuchar la Sustentación Presencial del Trabajo de Suficiencia Profesional de la Bachiller **MIRTA ALDAZABAL PULCHA** con código 13190139 que para optar el Título Profesional de Ingeniera Electrónica sustentó el Trabajo de Suficiencia Profesional titulado **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE COMUNICACIONES PARA PROVEER EL SERVICIO DE INTERNET A UN CLIENTE CORPORATIVO EN EL DISTRITO DE LOS BAÑOS DEL INCA EN LA REGIÓN CAJAMARCA**.

El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de 15 (Buena).

Ciudad Universitaria, 13 de Agosto del 2026


DR. JORGE ELÍAS MOSCOSO SÁNCHEZ
Presidente Jurado


MG. ARLICH JOEL PORTILLO ALLENDE
Miembro Jurado


MG. DANIEL DÍAZ ATAUCURI
Miembro Jurado


MG. LUZ ANTUANET ADANAQUÉ INFANTE
Miembro Asesor

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **LUZ ANTUANET ADANAQUÉ INFANTE** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N°55/FIEE-PPP/2026 del Trabajo de Suficiencia Profesional titulado **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE COMUNICACIONES PARA PROVEER EL SERVICIO DE INTERNET A UN CLIENTE CORPORATIVO EN EL DISTRITO DE LOS BAÑOS DEL INCA EN LA REGIÓN CAJAMARCA**, presentado por la bachiller MIRTA ALDAZABAL PULCHA, para optar el título profesional de Ingeniera Electrónica. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 5% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título profesional de Ingeniera Electrónica.

Lima, 13 de Agosto del 2026



Firma del Asesor

DNI: 44553754

Nombres y apellidos del asesor:

LUZ ANTUANET ADANAQUÉ INFANTE

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, por ser mi mayor apoyo y motivación a lo largo de mi formación personal y profesional.

A mi madre, por su fortaleza, amor y valentía durante el proceso de recuperación que le tocó afrontar, acompañarla en esa etapa me enseñó el verdadero significado de la perseverancia, la unión familiar y la esperanza.

A mi padre, por ser un ejemplo constante de superación, esfuerzo y responsabilidad, su dedicación y forma de enfrentar la vida han sido una guía importante en mi camino.

También dedico este trabajo a Baris, mi querido gatito naranja, quien me acompañó durante ocho años con su cariño y compañía incondicional. A ellos, con todo mi amor y gratitud.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme concretar esta meta, por darme la fortaleza necesaria durante este camino y por regalarme tiempo junto a las personas que amo.

RESUMEN

La limitada disponibilidad de infraestructura de fibra óptica externa constituye una de las principales restricciones para la provisión oportuna de servicios de conectividad corporativa en determinadas zonas geográficas. En este contexto, el presente Trabajo de Suficiencia Profesional aborda el diseño e implementación de un sistema híbrido de comunicaciones para brindar el servicio de Internet corporativo a un cliente ubicado en la región Cajamarca.

El objetivo fue implementar una solución técnica que permitiera habilitar el servicio en menor tiempo mediante un enlace microondas punto a punto complementado con un tramo interno de fibra óptica hasta el equipo Customer Premises Equipment (CPE). La metodología incluyó el levantamiento de información mediante un Technical Site Survey (TSS), la evaluación de la línea de vista, el análisis de la zona de Fresnel, el cálculo del presupuesto de enlace y la validación técnica previa a la instalación, configuración y puesta en operación de los equipos.

Los resultados demostraron que la solución fue técnicamente viable, estable y eficiente, permitiendo reducir aproximadamente un 25 % el tiempo de implementación y lograr un ahorro económico estimado del 35 % respecto a una alternativa basada exclusivamente en fibra óptica.

Palabras clave: Internet, enlace microondas, sistema híbrido de comunicaciones, zona de Fresnel, fibra óptica.

ABSTRACT

The limited availability of external fiber-optic infrastructure is one of the main constraints affecting the timely deployment of corporate connectivity services in certain geographic areas. In this context, this Professional Competency Work presents the design and implementation of a hybrid communication system to provide corporate Internet service to a client located in the Cajamarca region.

The main objective was to implement a technical solution that would enable faster service deployment through a point-to-point microwave link complemented by an internal fiber-optic segment connecting to the Customer Premises Equipment (CPE). The methodology included data collection through a Technical Site Survey (TSS), line-of-sight evaluation, Fresnel zone analysis, link budget calculation, and technical feasibility validation prior to the installation, configuration, and commissioning of the communication equipment.

The results demonstrated that the implemented solution was technically feasible, stable, and efficient, reducing deployment time by approximately 25% and achieving an estimated 35% cost savings compared with an alternative based exclusively on fiber-optic infrastructure.

Keywords: Internet, microwave link, hybrid communications system, Fresnel zone, fiber optics.

INDICE GENERAL

CARATULA	i
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
INDICE GENERAL	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABLAS	ix
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO II: INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD	12
II.1 Institución – Actividad que desarrolla	12
II.2 Periodo de duración de la actividad	12
II.3 Finalidad y objetivos de la entidad	12
II.4 Razón social	13
II.5 Dirección postal	13
II.6 Nombre y correo electrónico del profesional a cargo	13
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	14
III.1 Organización de la actividad	14
III.2 Finalidad y objetivos de la Actividad	15
III.2.1 Finalidad	15
III.2.2 Objetivos	15
III.3 Problemática	16
III.3.1 Problema General	17

III.3.2	Problemas Específicos	18
III.3.3	Justificación e importancia de la investigación	18
III.4	Metodología	21
III.4.1	Bases teóricas	22
III.4.2	Marco conceptual	25
III.5	Procedimiento	48
III.6	Resultado de la actividad	75
CAPITULO IV: DISCUSION DE RESULTADOS		76
IV.1	Descripción de la implementación	76
IV.2	Evaluación Económica	78
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES		80
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES		82
CAPÍTULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		84
CAPÍTULO VIII: ANEXOS		89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Organigrama de la Jefatura de Instalación Planta Interna.	15
Figura 2 Diagrama de bloques de los objetivos específicos.	22
Figura 3 Ondas Electromagnéticas.	26
Figura 4 Espectro radioeléctrico.	28
Figura 5 Bandas de frecuencia en radiocomunicación.	29
Figura 6 Bandas de frecuencia empleadas en enlaces microondas.	31
Figura 7 Principales fenómenos que afecta la propagación de un radioenlace.	32
Figura 8 Desvanecimiento en enlaces microondas.	33
Figura 9 Zonas de Fresnel en un enlace microondas con línea de vista	37
Figura 10 Fibra óptica monomodo y multimodo.	44
Figura 11 Perfil de elevación Cliente - SITE TC5844 Baños del Inca.	48
Figura 12 Simulación de línea de vista en la plataforma nGMyD entre SITE TC5844 Baños del Inca – Cliente.	48
Figura 13 SITE TC5844 Baños del Inca.	49
Figura 14 Vista desde el SITE TC5844 BANOS DEL INCA al cliente.	50
Figura 15 Proyección del cableado y soporte monopolo en el Site.	50
Figura 16 Proyección del recorrido del cableado en el Site.	51
Figura 17 Vista del equipo SAR-A.	51
Figura 18 Vista del equipo DCDCU Y BBU.	52
Figura 19 Vista de barra a tierra.	52
Figura 20 Torre auto soportada en el local del Cliente.	53
Figura 21 Caja de paso en torre ventada. Fuente: Elaboración propia.	54
Figura 22 Proyección del cableado en el local del cliente.	54
Figura 23 Proyección del cableado en el local del cliente.	55
Figura 24 Proyección de ubicación del gabinete en el local del cliente.	55
Figura 25 Vista geográfica del enlace Site – Cliente.	56

<i>Figura 26</i> Punto crítico en el enlace microondas.	61
<i>Figura 27</i> Línea de vista entre Site y local del cliente..	63
<i>Figura 28</i> Esquema lógico de interconexión entre el site y el cliente.	64
<i>Figura 29</i> Instalación de la antena y radio en el Site.	65
<i>Figura 30</i> Direccionamiento de la antena hacia el local del Cliente.	65
<i>Figura 31</i> Recorrido del cableado (bajada).	66
<i>Figura 32</i> Etiquetado de patch cord Ethernet y cable de alimentación de la radio en gabinete de Site.	67
<i>Figura 33</i> Recorrido del cableado desde antena.	68
<i>Figura 34</i> Posición de antena en dirección a Site.	68
<i>Figura 35</i> Vista panorámica del gabinete instalado en el local del Cliente.	69
<i>Figura 36</i> Parámetros de Rx en lado Site.	70
<i>Figura 37</i> Parámetros de Rx en lado Cliente.	71
<i>Figura 38</i> Configuración de IP lado site.	72
<i>Figura 39</i> Configuración de IP lado Cliente.	72
<i>Figura 40</i> Configuración de VLAN de servicio lado site.	72
<i>Figura 41</i> Configuración de VLAN de servicio lado Cliente.	73
<i>Figura 42</i> Instalación de licencias en lado Site.	73
<i>Figura 43</i> Instalación de licencias en lado Cliente.	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Principales datos técnicos del radio Ceragon FibeAir IP-20S	58
Tabla 2 Pruebas de validación del radioenlace entre el site TC5844 Baños del Inca – Cliente	74
Tabla 3 Detalle de materiales, equipos y servicios invertidos en la instalación del servicio	79

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La conectividad a Internet se ha convertido en un recurso esencial para el desarrollo de las actividades operativas, administrativas y comerciales de las empresas, debido a que permite el acceso a plataformas digitales, servicios en la nube, sistemas de gestión, comunicación en tiempo real y procesos de atención al cliente. En el Perú, el crecimiento del Internet fijo ha estado impulsado principalmente por el despliegue de fibra óptica; sin embargo, su expansión aún presenta limitaciones asociadas al acceso a infraestructura existente y a los trámites municipales requeridos para el despliegue de redes, aspectos identificados por OSIPTEL como obstáculos para el avance de la fibra óptica en el país (Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones [OSIPTEL], 2024).

Esta problemática adquiere mayor importancia en el caso de los clientes corporativos, debido a que sus requerimientos son distintos a los de un servicio doméstico o residencial. Mientras que un punto de red particular se orienta principalmente al acceso básico a Internet, un servicio corporativo requiere mayor estabilidad, disponibilidad, capacidad de transmisión, monitoreo y cumplimiento de parámetros técnicos. En ese sentido, la calidad del servicio puede evaluarse mediante indicadores como cumplimiento de velocidad mínima, latencia, variación de latencia, tasa de pérdida de paquetes y tasa de ocupación de enlace, los cuales son considerados por OSIPTEL para la medición del servicio de acceso a Internet (OSIPTEL, 2021).

Tradicionalmente, la atención de servicios corporativos se realiza mediante fibra óptica externa, debido a su alta capacidad, estabilidad y confiabilidad para la transmisión de datos. Sin embargo, cuando no existe infraestructura cercana, esta alternativa puede requerir obras civiles, permisos municipales,

ampliación de red, tendido de cableado y mayores tiempos de implementación. En Cajamarca, la fibra óptica muestra un crecimiento progresivo, aunque su cobertura aún no es uniforme: OSIPTEL reportó que las conexiones de Internet fijo con fibra óptica en la región aumentaron de 31 538 en 2023 a 45 751 en 2024; no obstante, Cajamarca representó solo el 1.53 % del total nacional, lo que evidencia un despliegue todavía limitado frente a otras regiones (OSIPTEL, 2025), esta situación dificulta la atención oportuna de clientes corporativos que requieren activar sus servicios en plazos reducidos y bajo condiciones adecuadas de calidad.

Ante este escenario, los enlaces microondas punto a punto representan una alternativa técnica viable para brindar conectividad cuando la fibra óptica no se encuentra disponible de manera inmediata. Este tipo de solución permite establecer comunicación entre dos puntos con línea de vista, siempre que se validen criterios técnicos como el despeje de la zona de Fresnel, el presupuesto de enlace, el margen de desvanecimiento y la disponibilidad esperada. La recomendación ITU-R P.530 establece métodos de predicción para el diseño de sistemas terrestres con línea de vista, mientras que la recomendación ITU-R P.526 aborda la propagación por difracción, aspecto relacionado con el análisis de obstáculos y zonas de Fresnel (*International Telecommunication Union* [ITU], 2025a, 2025b).

El presente trabajo se organiza en siete capítulos. El Capítulo I presenta la introducción y el contexto que motivó el desarrollo del trabajo. El Capítulo II describe la institución donde se realizó la actividad. El Capítulo III detalla la descripción de la actividad, incluyendo la problemática, los objetivos, las bases teóricas, el marco conceptual y el procedimiento seguido para el diseño e implementación del sistema. El Capítulo IV expone la discusión de los resultados obtenidos. El Capítulo V presenta las conclusiones derivadas del trabajo. El Capítulo VI recoge las recomendaciones técnicas, de instalación, operativas y de mantenimiento. Finalmente, el Capítulo VII contiene las referencias bibliográficas utilizadas a lo largo del trabajo.

CAPÍTULO II: INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD

II.1 Institución – Actividad que desarrolla

Las actividades vistas en el presente trabajo se realizaron en la empresa América Móvil Perú, S.A.C. (Claro Perú), empresa líder en servicios integrados de telecomunicaciones en Latinoamérica. Claro Perú ofrece una variedad de productos y servicios que incluyen telefonía móvil, telefonía fija, internet fijo, internet móvil, televisión por suscripción y soluciones empresariales; su portafolio está pensado tanto para clientes residenciales como para el sector corporativo, con cobertura a nivel nacional y presencia en zonas urbanas y rurales.(Claro Perú, s. f.).

II.2 Periodo de duración de la actividad

La actividad del presente trabajo se ejecutó entre enero 2019 y junio 2019.

II.3 Finalidad y objetivos de la entidad

La finalidad de Claro Perú es brindar soluciones de comunicación y conectividad confiables, innovadoras y accesibles, que permitan a personas y empresas mantenerse conectadas y mejorar su calidad de vida. La empresa busca contribuir al desarrollo tecnológico del país, ampliando la cobertura y ofreciendo servicios de alta calidad en todo el territorio nacional.

II.4 Razón social

La razón social de la empresa en donde se realizó el presente trabajo es:
AMERICA MOVIL PERU S.A.C.

II.5 Dirección postal

Dirección legal: Av. Nicolás Arriola N.º 480 Urb. Santa Catalina

Distrito: La Victoria

Departamento: Lima

II.6 Nombre y correo electrónico del profesional a cargo

Katherine Gutierrez

Katherine.gutierrez@claro.com.pe

Gerente de Implementación de Servicios Empresas

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

III.1 Organización de la actividad

Para alcanzar los objetivos establecidos en el presente trabajo, se desarrollaron las siguientes actividades de manera secuencial y organizada:

- Elaboración del TSS (Technical Site Survey) para el levantamiento detallado de información técnica y de campo.
- Diseño del sistema de comunicación con base en los datos obtenidos durante el TSS, considerando las condiciones topográficas, ambientales y de infraestructura existentes.
- Ejecución de los trabajos de implementación del sistema de comunicación, que comprendieron el montaje, alineamiento y configuración de los equipos involucrados.
- Revisión y validación de los parámetros técnicos del sistema implementado, asegurando el cumplimiento de los niveles de potencia, ancho de banda y estabilidad requeridos.
- Habilitación del servicio de Internet corporativo del cliente, verificando la operatividad y calidad del enlace establecido.

Estas actividades se enmarcan dentro de la estructura organizacional del área, la cual se presenta a continuación en el siguiente organigrama, donde se identifica la jefatura responsable de su ejecución:

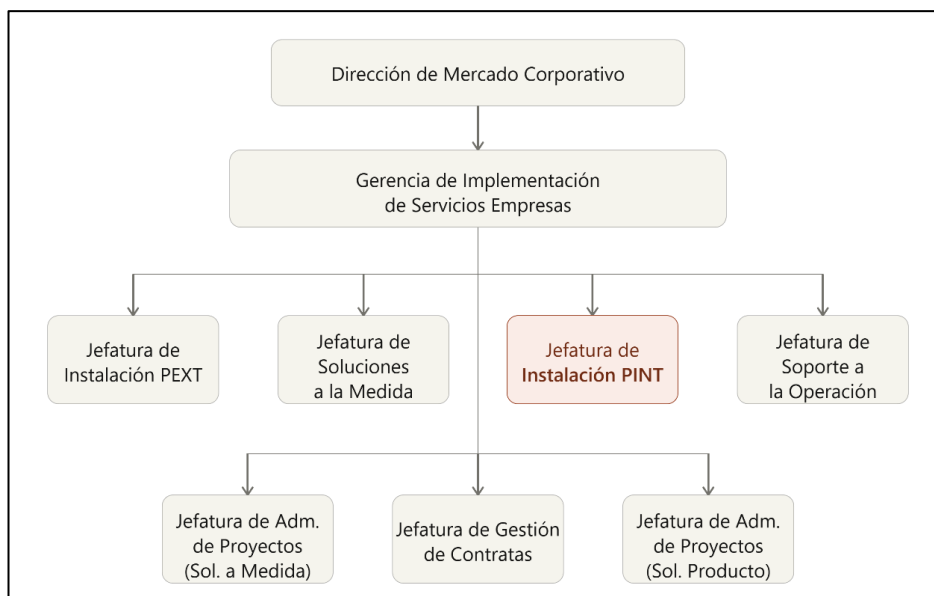


Figura 1: Organigrama de la Jefatura de Instalación Planta Interna. Fuente: Elaborado en base a organigrama de la empresa Claro Peru.

III.2 Finalidad y objetivos de la Actividad

III.2.1 Finalidad

El presente trabajo tiene como finalidad brindar el servicio de Internet corporativo a un cliente empresarial ubicado en la ciudad de Cajamarca, en una zona caracterizada por una alta densidad arbórea y limitada disponibilidad de infraestructura de fibra óptica. Para ello, se propone la implementación de un enlace microondas punto a punto, acompañado de la instalación de una torre ventada en las instalaciones del cliente y la integración de un tramo de cableado de fibra óptica, garantizando así la continuidad, estabilidad y calidad del servicio.

III.2.2 Objetivos

Objetivo general:

Diseñar e implementar un sistema híbrido de comunicaciones (enlace microondas y fibra óptica interna), que permita brindar el servicio de internet a un cliente corporativo en la región de Cajamarca

Objetivos específicos:

- Realizar un *Technical Site Survey (TSS)* con el fin de recopilar información detallada sobre la zona donde se brindará el servicio e identificar los sites cercanos disponibles.
- Analizar los resultados obtenidos del TSS para evaluar las condiciones técnicas del site desde el cual se atenderá al cliente.
- Diseñar e implementar una infraestructura híbrida de acceso, integrada por un enlace microondas punto a punto y un tramo de fibra óptica desde la estación receptora hasta el Customer Premises Equipment (CPE)
- Revisar y validar los niveles de recepción y parámetros técnicos del servicio, verificando que se encuentren dentro de los valores establecidos por los estándares de calidad.

III.3 Problemática

La región de Cajamarca presenta una economía vinculada principalmente a actividades primarias, entre las que destacan la minería y el sector agropecuario, sectores relevantes dentro de su caracterización productiva regional (Banco Central de Reserva del Perú [BCRP], 2025). Asimismo, el Ministerio de Economía y Finanzas reconoce a la minería y la agricultura como sectores estratégicos para el desarrollo de proyectos en Cajamarca (Ministerio de Economía y Finanzas [MEF], 2025).

Esta dinámica productiva genera una creciente demanda de servicios de conectividad confiables por parte de empresas que requieren comunicación continua para sus operaciones. En este contexto, un cliente corporativo dedicado a prestar servicios de ensayos y análisis técnicos a empresas del sector minero manifestó la necesidad de habilitar un servicio de Internet

corporativo de alta disponibilidad en su sede de operaciones.

Inicialmente, se evaluó la posibilidad de brindar el servicio mediante una red de fibra óptica; sin embargo, la zona carece de infraestructura habilitada, y la ampliación del tendido de fibra hacia el punto de destino implicaría un tiempo de implementación considerable, no aceptable para los plazos establecidos por el cliente. Como alternativa, se analizó la viabilidad de implementar un enlace microondas punto a punto; debido a que este tipo de solución puede emplearse en sistemas terrestres con línea de vista, siempre que se validen condiciones de propagación, disponibilidad y comportamiento del enlace conforme a los criterios establecidos por la recomendación ITU-R P.530 (International Telecommunication Union [ITU], 2025a).

Durante la ejecución del *Technical Site Survey (TSS)*, se determina la ausencia de línea de vista (*Line of Sight, LOS*) entre el local del cliente y los *sites* propuestos, debido a la alta densidad arbórea y a las condiciones topográficas del entorno, esta condición afecta el despeje de la zona de Fresnel, aspecto considerado en el análisis de propagación por difracción de la recomendación ITU-R P.526 (ITU, 2025b)

Ante esta situación, la solución técnica más adecuada consiste en la instalación de una torre ventada de 45 metros de altura en las instalaciones del cliente, con la cual se obtiene visibilidad directa (*LOS*) hacia el site seleccionado del operador. Asimismo, dado que la torre estará ubicada a una distancia superior a los 100 metros de la oficina principal, se propone la implementación de un tramo de fibra óptica que interconecte la radio receptora del servicio con el *Customer Premises Equipment (CPE)* del cliente, garantizando así la continuidad, estabilidad y calidad de la conexión de Internet corporativo.

III.3.1 Problema General

¿Es posible diseñar e implementar un sistema híbrido de comunicaciones, que

combine un enlace microondas y fibra óptica interna, para habilitar un servicio de internet para la atención de un cliente corporativo en una zona de difícil acceso en la región de Cajamarca?

III.3.2 Problemas Específicos

¿Cómo recolectar la información geográfica necesaria para el diseño e implementación del sistema de comunicación entre un punto de acceso de un ISP (Proveedor de Servicios de Internet) y una entidad privada en la región de Cajamarca?

¿Cómo seleccionar el Site óptimo para realizar el diseño del enlace de microondas punto a punto?

¿De qué forma diseñar e implementar un sistema de comunicación con tecnología microondas y fibra óptica para brindar el servicio de internet a un cliente corporativo en la región de Cajamarca?

¿Qué métodos pueden emplearse para evaluar el desempeño y la estabilidad del enlace de microondas punto a punto implementado?

III.3.3 Justificación e importancia de la investigación

El presente trabajo se justifica en la necesidad de garantizar la prestación del servicio de Internet corporativo con la disponibilidad, el ancho de banda y la estabilidad requeridos en zonas de difícil acceso, mediante una solución híbrida compuesta por un enlace microondas y un tramo de fibra óptica interna. Esta propuesta integra dos medios de transmisión complementarios que permiten optimizar recursos, reducir la brecha digital y asegurar la continuidad del servicio en entornos geográficamente complejos.

La elección del tema se sustenta en la necesidad de proponer soluciones de conectividad eficientes en zonas donde el despliegue tradicional de fibra

óptica externa puede demandar mayores costos y tiempos de ejecución. Asimismo, se fundamenta en la aplicación de criterios técnicos de ingeniería de telecomunicaciones para garantizar una solución estable, gestionable y adecuada a los requerimientos del servicio corporativo.

Justificación económica:

El presente trabajo genera un impacto económico favorable tanto para la empresa como para el cliente, al optimizar los recursos requeridos en la fase de implementación del servicio. La propuesta permite reducir los costos operativos y el tiempo de ejecución, dado que no es necesaria la habilitación de nueva infraestructura de fibra óptica, lo cual conlleva una disminución significativa en los gastos asociados y en los plazos de atención.

En consecuencia, la reducción del tiempo de entrega del servicio representa un beneficio directo para el cliente, al posibilitar una conexión anticipada y el inicio oportuno de sus operaciones, lo que se traduce en una generación más rápida de ingresos y un aporte sostenido al crecimiento y rentabilidad de su negocio.

Por su parte, Quintana López (2022), en una tesis desarrollada en la Universidad Nacional de Ingeniería, analiza los costos de infraestructura de la banda ancha de fibra óptica en telecomunicaciones del Perú y propone criterios para optimizar tiempos de control y costos en proyectos de infraestructura de telecomunicaciones. En esa misma línea, el documento de trabajo publicado por ProInversión sobre el impacto de los proyectos de telecomunicaciones en el Perú destaca que la expansión de la banda ancha genera beneficios sociales y económicos, entre ellos mejoras en productividad, empleo, ingresos y acceso a servicios públicos digitales (Bonifaz Fernández, 2025).

En conjunto, estos estudios respaldan la viabilidad económica del presente trabajo, al evidenciar que la optimización de recursos y la reducción de

tiempos de implementación generan beneficios tangibles para las empresas del sector telecomunicaciones, contribuyendo al desarrollo económico y tecnológico del país.

Justificación social:

El presente trabajo contribuye a reducir la brecha digital en zonas donde la infraestructura de telecomunicaciones alámbrica es limitada o inexistente. Al implementar una solución híbrida de comunicaciones, se habilita el acceso a servicios de internet en entornos geográficamente complejos, lo que favorece la integración de empresas e instituciones ubicadas en zonas alejadas a la economía digital del país.

En el caso específico del cliente atendido, cuya actividad está orientada a la prestación de servicios de ensayos y análisis técnicos para el sector minero en Cajamarca, la conectividad habilitada permite el acceso a plataformas digitales, sistemas de gestión remota, herramientas de comunicación en tiempo real y servicios en la nube, optimizando sus procesos operativos y administrativos. Esto genera encadenamientos productivos indirectos, al facilitar la comunicación entre la empresa proveedora de servicios técnicos y las empresas mineras a las que atiende, dinamizando así la actividad económica local.

En ese sentido, la solución implementada no solo responde a una necesidad técnica y comercial, sino que también aporta al desarrollo social de la región de Cajamarca, al ampliar las posibilidades de conectividad en zonas donde el despliegue tradicional de infraestructura presenta mayores restricciones.

Justificación técnica:

Ante la ausencia de infraestructura de fibra óptica y la necesidad de entregar el servicio de internet, una solución inalámbrica es la mejor opción técnicamente factible, el enlace microondas ofrece baja latencia, capacidad

escalable con alta disponibilidad, flexibilidad y rápida implementación. La solución propuesta incorpora, adicionalmente, un tramo de 180 m de fibra óptica interna desde la antena receptora hasta el *Customer Premises Equipment* (CPE) del cliente, garantizando el cumplimiento temprano del acuerdo de nivel de servicio (SLA). En escenarios futuros con disponibilidad de fibra externa, este tramo inalámbrico puede mantenerse como enlace de respaldo, aportando adaptabilidad y continuidad del negocio.

En conclusión, entregar el servicio por microondas permite una activación rápida en un terreno complejo, con menor costo de inversión y menos trámites municipales que implicaría el tendido de fibra; además, menor riesgo operativo y ambiental, al evitar obras civiles extensas.

III.4 Metodología

El desarrollo del presente trabajo se sustentó en una metodología de tipo aplicada, ya que parte de conocimientos teóricos existentes en el campo de las telecomunicaciones para resolver un problema concreto: la habilitación del servicio de internet corporativo en una zona sin infraestructura de fibra óptica externa disponible. También, es de carácter descriptivo, ya que el proceso de diseño e implementación del sistema se documenta de manera sistemática, registrando condiciones del entorno, parámetros técnicos obtenidos y resultados de validación.

El propósito metodológico fue optimizar los recursos disponibles y garantizar la continuidad del servicio mediante el empleo de tecnologías inalámbricas complementadas con planta interna de fibra óptica.

El proceso se organizó en fases secuenciales, que abarcan desde la recopilación y análisis de información técnica (levantamiento de campo y evaluación de viabilidad) hasta el diseño del sistema, la implementación en sitio y la validación del servicio contra criterios de aceptación (parámetros radioeléctricos y métricas de calidad de servicio).

Las herramientas empleadas durante el proceso incluyeron Google Earth para la validación preliminar del perfil de elevación, la plataforma nGMyD de Claro Perú para la revisión de la línea de vista, y el software Link Calc de LigoWave para la verificación del despeje de la zona de Fresnel y la validación del diseño del radioenlace. En la figura 1 se muestra la secuencia de actividades desarrolladas para el diseño e implementación del sistema híbrido de comunicaciones:

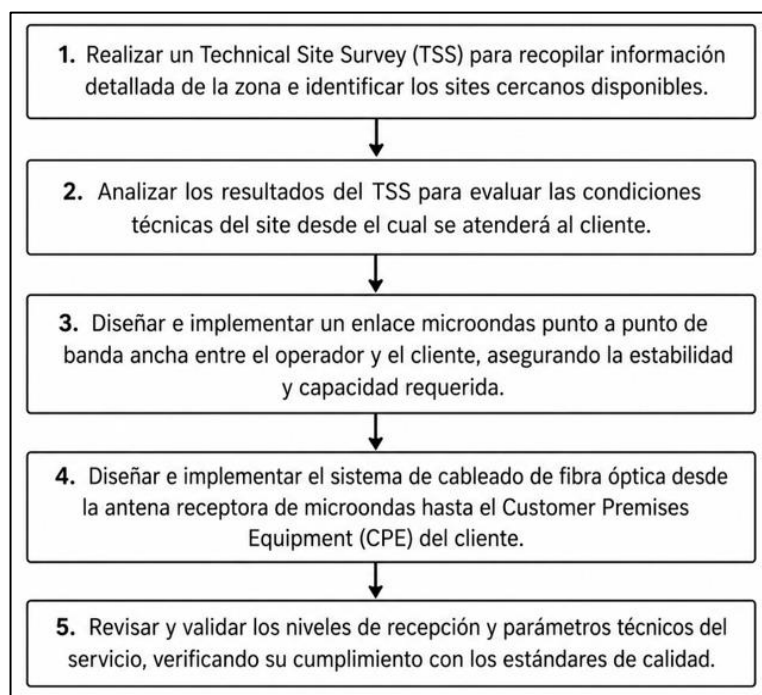


Figura 2 Diagrama de bloques de los objetivos específicos. Fuente: Elaboración propia.

III.4.1 Bases teóricas

El desarrollo de un sistema híbrido de comunicaciones se fundamenta en la integración de principios técnicos de propagación de ondas electromagnéticas, cableado óptico estructurado y estándares internacionales que garantizan la calidad del servicio. Estas bases proporcionan el marco que respalda la solución planteada en el presente trabajo de suficiencia profesional.

La provisión de internet corporativo en zonas con baja disponibilidad de fibra

óptica requiere evaluar alternativas de acceso que aseguren continuidad operativa y un desempeño estable. En este escenario, los enlaces de microondas punto a punto constituyen una solución de interconexión nodo a nodo mediante ondas electromagnéticas en espacio libre. Esta tecnología destaca por su flexibilidad de despliegue en geografías accidentadas y por posibilitar la comunicación cuando otros sistemas presentan restricciones de acceso o implementación (Roca Liñán, 2019). En aplicaciones orientadas a la conectividad empresarial, se reconoce que el uso de radioenlaces se ha incrementado debido a su capacidad para transportar datos, voz e internet hacia lugares alejados de la infraestructura cableada urbana (Flores Pacaya y Gonzales Rodríguez, 2019).

Desde la ingeniería del radioenlace, el desempeño no se limita a establecer conectividad, sino a garantizar parámetros que sostengan la calidad del servicio, tales como disponibilidad, retardo, variación del retardo, pérdida de paquetes, nivel de recepción y estabilidad del enlace. La recomendación ITU-T E.800 define conceptos relacionados con la calidad de servicio en telecomunicaciones, mientras que la recomendación ITU-T Y.1541 establece objetivos de desempeño para servicios basados en IP. Asimismo, la recomendación ITU-R P.530 proporciona criterios de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrestres con línea de vista, como los enlaces microondas punto a punto (*International Telecommunication Union [ITU]*, 2008, 2011, 2025b).

Esto implica considerar fundamentos de propagación y realizar cálculos asociados a atenuaciones, confiabilidad, desvanecimiento, ganancias y pérdidas. Asimismo, el diseño se complementa con herramientas de *software* especializadas que permiten verificar comportamiento del enlace bajo modelos estadísticos y parámetros electromagnéticos como la frecuencia de operación, la potencia de transmisión, la ganancia de antenas, las pérdidas en el espacio libre, el nivel de señal recibida y el umbral de recepción (Díaz Vargas, 2015). De manera complementaria, la recomendación ITU-R P.530 establece métodos de predicción para el diseño de sistemas terrestres con

línea de vista, mientras que la recomendación ITU-R P.526 aborda los efectos de propagación por difracción, relevantes para el análisis de obstáculos y despeje de la zona de Fresnel (*International Telecommunication Union* [ITU], 2025a, 2025b). Además, se deben contemplar condiciones reales de operación —como la distancia, el clima y la geografía del entorno— mediante verificaciones de campo para reducir el riesgo de degradaciones que impacten la estabilidad de la red.

En entornos con obstáculos naturales, como áreas de alta densidad arbórea, resulta crítico asegurar las condiciones físicas que favorezcan el trayecto radioeléctrico, de acuerdo con los criterios establecidos por la recomendación ITU-R P.530, que proporciona métodos de predicción para el diseño de sistemas terrestres con línea de vista, estas condiciones comprenden: la existencia de línea de vista directa (*Line of Sight*, LOS) entre ambos extremos del enlace, el despeje adecuado de al menos el 60 % de la primera zona de Fresnel a lo largo de la trayectoria, la instalación de las antenas a una altura suficiente para superar obstáculos naturales o artificiales presentes en el entorno, la correcta orientación y alineamiento de las antenas hacia el extremo remoto, y la reducción de posibles pérdidas por vegetación. La recomendación ITU-R P.833 aborda la atenuación producida por vegetación, mientras que la recomendación ITU-R P.526 considera los efectos de difracción asociados a obstáculos en la trayectoria de propagación. Asimismo, la recomendación ITU-R P.530 establece criterios de diseño para sistemas terrestres con línea de vista, como los enlaces microondas punto a punto (*International Telecommunication Union* [ITU], 2021, 2025a, 2025b).

En el diseño de estos sistemas se enfatiza el uso de la ubicación geográfica y la altura de las antenas para alcanzar condiciones adecuadas de comunicación (Roca Liñán, 2019). Por ello, la implementación de infraestructura de soporte, como una torre ventada, se entiende como un recurso técnico necesario para lograr el nivel de instalación requerido y sostener el alineamiento del enlace en el tiempo. De manera complementaria, cuando el punto de recepción y el *Customer Premises Equipment* (CPE) del

cliente se encuentran separados por una distancia mayor a 100 metros, la incorporación de un tramo de fibra óptica dentro del local permite transportar la conectividad con alta capacidad y baja susceptibilidad a perturbaciones. En estudios de redes ópticas se destaca que la fibra ofrece pérdidas reducidas, alta velocidad de transmisión e inmunidad a interferencias electromagnéticas en comparación con tecnologías basadas en cobre (López Polo, 2016).

En conjunto, el planteamiento técnico integra un enlace de microondas punto a punto como medio principal de transporte y un tramo de fibra óptica interno para llevar el servicio hasta el usuario final. Esta arquitectura híbrida permite conservar el desempeño extremo a extremo en entornos con restricciones de despliegue y presencia de obstáculos naturales.

III.4.2 Marco conceptual

El marco conceptual desarrolla los principales fundamentos técnicos relacionados con el diseño e implementación del sistema híbrido de comunicaciones propuesto. Para ello, se abordan conceptos asociados a las ondas electromagnéticas, el espectro radioeléctrico, las bandas de frecuencia, la propagación de señales en radioenlaces, los enlaces microondas punto a punto, la zona de Fresnel, el presupuesto de enlace, la atenuación atmosférica, la calidad y disponibilidad del radioenlace, así como los principios de transmisión mediante fibra óptica. Asimismo, se incluyen los conceptos de Internet corporativo y sistema híbrido de comunicaciones, debido a que permiten comprender la integración entre el enlace microondas y el tramo interno de fibra óptica utilizados para brindar conectividad al cliente.

– Fundamentos de las ondas electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas constituyen la base física de los sistemas de telecomunicaciones inalámbricas. Estas ondas se originan por la variación temporal de los campos eléctrico y magnético, los cuales se propagan en el espacio transportando energía e información. En un medio homogéneo y no

conductor, ambos campos son perpendiculares entre sí y también a la dirección de propagación, lo que explica su comportamiento transversal y su aptitud para ser radiadas y captadas por antenas (Balanis, 2016; Pozar, 2012).

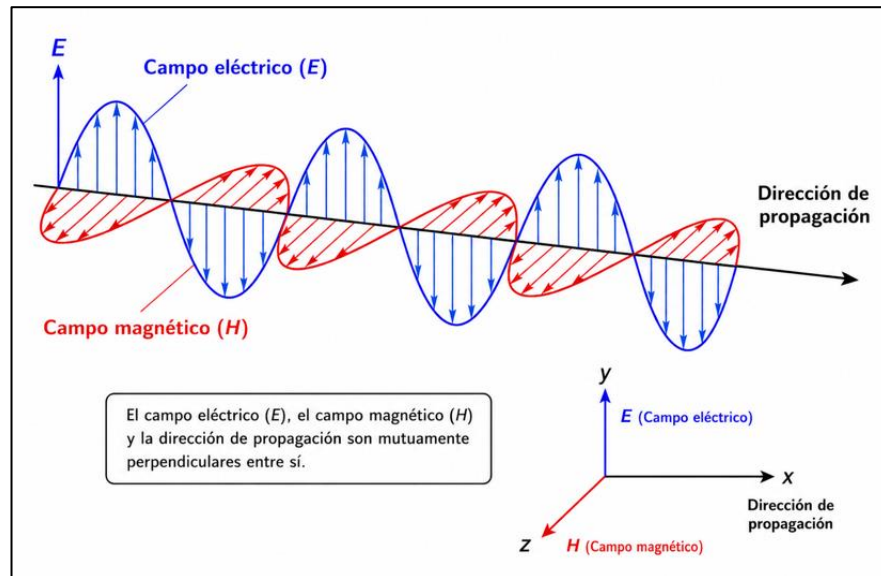


Figura 3 Ondas Electromagnéticas. Fuente: Elaboración propia, con base en los fundamentos de propagación electromagnética descritos por Cheng (1989) y Rappaport (2002).

Desde el punto de vista de ingeniería, las magnitudes fundamentales asociadas a una onda electromagnética son la frecuencia, la longitud de onda y la velocidad de propagación. La relación entre estas variables se expresa mediante la ecuación (21):

$$c = \lambda f \quad (1)$$

En esta expresión, c representa la velocidad de propagación en el vacío, λ la longitud de onda y f la frecuencia. Esta relación es esencial en el diseño de radioenlaces, ya que el tamaño físico de las antenas, la pérdida en espacio libre y el comportamiento de propagación dependen directamente de la frecuencia de operación (Pozar, 2012; Salema, 2003).

Asimismo, el comportamiento de las ondas electromagnéticas se fundamenta en las ecuaciones de Maxwell, las cuales describen la relación entre los campos eléctrico y magnético, así como su interacción con las cargas y

corrientes eléctricas. En forma diferencial, estas ecuaciones pueden expresarse según la ecuación (21):

$$\nabla \cdot D = \rho \quad \nabla \cdot B = 0 \quad \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

Donde E representa el campo eléctrico, H el campo magnético, D la densidad de flujo eléctrico, B la densidad de flujo magnético, ρ la densidad de carga eléctrica y J la densidad de corriente eléctrica. Estas ecuaciones permiten explicar que una variación temporal del campo eléctrico genera un campo magnético variable, y viceversa, dando origen a la propagación de ondas electromagnéticas en el espacio. En un medio homogéneo, lineal y no conductor, sin cargas ni corrientes libres, las ecuaciones de Maxwell conducen a la ecuación de onda, lo que demuestra que los campos eléctrico y magnético se propagan de manera acoplada y transversal a la dirección de avance de la onda (Balanis, 2016; Pozar, 2012).

La velocidad de propagación de la onda en un medio se relaciona con la permitividad eléctrica ε y la permeabilidad magnética μ , mediante la ecuación (3):

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (3)$$

Para el caso del vacío, esta velocidad corresponde a la velocidad de la luz según la ecuación (21):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \quad (4)$$

Por ello, las ecuaciones de Maxwell constituyen la base teórica para comprender la propagación radioeléctrica utilizada en los enlaces microondas, ya que permiten explicar la generación, transmisión y recepción de energía electromagnética mediante antenas (Balanis, 2016; Pozar, 2012).

– Espectro electromagnético

El espectro electromagnético corresponde al conjunto ordenado de ondas electromagnéticas, clasificadas en función de su frecuencia o de su longitud de onda. En el ámbito de las telecomunicaciones, la porción más relevante es el espectro radioeléctrico, debido a que en este se sitúan los servicios de radiocomunicación empleados en sistemas como la radiodifusión, la telefonía móvil, los enlaces fijos, las comunicaciones satelitales y las redes inalámbricas de datos (Forouzan, 2013; Stallings, 2014).

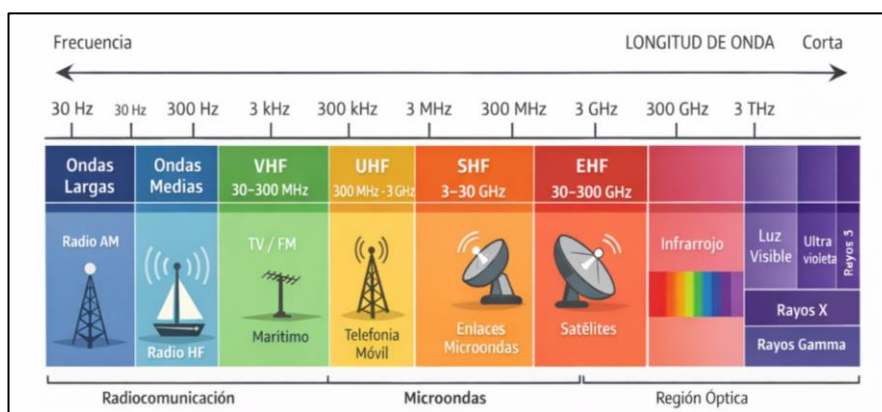


Figura 4 Espectro radioeléctrico. Fuente: Elaboración propia, adaptado de la Recomendación ITU-R V.431-8 y del United States Frequency Allocation Chart de la NTIA.

La clasificación de las bandas de frecuencia utilizadas en telecomunicaciones se basa en la Recomendación ITU-R V.431-8, donde se establecen rangos como VHF de 30 a 300 MHz, UHF de 300 a 3000 MHz, SHF de 3 a 30 GHz y EHF de 30 a 300 GHz (International Telecommunication Union [ITU], 2015). Asimismo, la representación general del espectro electromagnético puede organizarse tomando como referencia el gráfico de asignación de frecuencias de la National Telecommunications and Information Administration, el cual muestra la distribución del espectro radioeléctrico hasta 300 GHz (National Telecommunications and Information Administration [NTIA], 2003).

La importancia práctica del espectro electromagnético reside en que cada intervalo de frecuencias posee características de propagación particulares. En general, las frecuencias más bajas permiten mayores coberturas y presentan una mejor capacidad para rodear obstáculos, mientras que las frecuencias

más altas ofrecen mayor disponibilidad de ancho de banda, aunque con una mayor susceptibilidad frente a la atenuación atmosférica y a las obstrucciones presentes en la trayectoria. En consecuencia, la elección de la banda de operación no responde únicamente a criterios normativos, sino también a consideraciones técnicas que influyen directamente en la viabilidad y el rendimiento del sistema de comunicación (Rappaport, 2002; Saunders & Aragón-Zavala, 2007).

- Bandas de frecuencia

Las bandas de frecuencia permiten clasificar el espectro radioeléctrico en intervalos con características técnicas relativamente homogéneas. Esta clasificación facilita la planificación de servicios, la compatibilidad electromagnética y la asignación ordenada de recursos espectrales. En la práctica, las denominaciones VHF, UHF, SHF y EHF son habituales en radiocomunicaciones, siendo la banda SHF particularmente relevante para los radioenlaces terrestres de microondas (Lehpamer, 2010; Salema, 2003).

Desde una perspectiva técnica, la frecuencia elegida influye sobre la directividad alcanzable, el ancho de canal disponible, la longitud de trayectoria viable y la susceptibilidad a fenómenos como la lluvia, la absorción gaseosa y los desvanecimientos. Por ello, el análisis de bandas de frecuencia forma parte del dimensionamiento inicial de cualquier enlace punto a punto (Poazar, 2012; Rappaport, 2002).

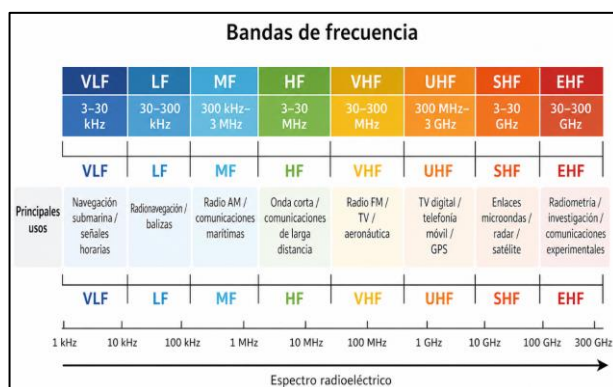


Figura 5 Bandas de frecuencia en radiocomunicación. Fuente: Elaboración propia, adaptado de International Telecommunication Union (2015).

La clasificación de las bandas de frecuencia del espectro radioeléctrico se basa en la nomenclatura establecida por la Recomendación ITU-R V.431-8, la cual define rangos como VLF, LF, MF, HF, VHF, UHF, SHF y EHF para su uso en telecomunicaciones (International Telecommunication Union [ITU], 2015).

– **Espectro radioeléctrico en el Perú**

En el Perú, el espectro radioeléctrico es un recurso natural limitado cuya administración y regulación corresponde al Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Su uso se organiza mediante el Plan Nacional de Atribución de Frecuencias (PNAF), instrumento que establece la atribución de las bandas de frecuencia a los distintos servicios de radiocomunicación y busca asegurar la operatividad de los sistemas, minimizar interferencias perjudiciales y permitir la coexistencia de servicios cuando corresponda. Asimismo, esta planificación se desarrolla en concordancia con el Reglamento de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones para la Región 2, lo que favorece la compatibilidad internacional y la coordinación espectral. En este contexto, la gestión del espectro constituye un elemento fundamental para el diseño y operación de servicios fijos, móviles, satelitales y de radiodifusión en el territorio peruano (*International Telecommunication Union*, 2024a; Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2023).

– **Bandas de frecuencia empleadas en enlaces microondas**

Las bandas de frecuencia empleadas en enlaces microondas se ubican principalmente dentro de los rangos SHF (3–30 GHz) y EHF (30–300 GHz), de acuerdo con la clasificación de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU). Entre las bandas más utilizadas se encuentran L, S, C, X, Ku, K y Ka, las cuales presentan diferentes características en términos de capacidad de transmisión, alcance y comportamiento frente a fenómenos de propagación. En general, las frecuencias más bajas permiten mayores distancias de enlace y menor atenuación, mientras que las frecuencias más altas ofrecen mayor ancho de banda, aunque son más sensibles a efectos

como la atenuación por lluvia y la obstrucción del trayecto. Por ello, la selección de la banda de operación constituye un aspecto fundamental en el diseño de enlaces microondas, ya que influye directamente en su desempeño y disponibilidad (Rappaport, 2002; Saunders & Aragón-Zavala, 2007).

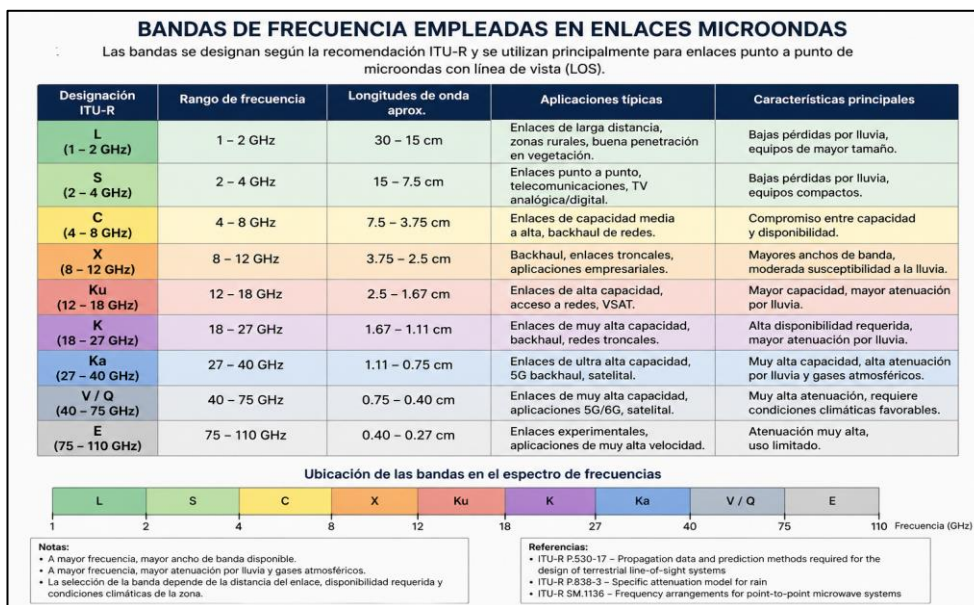


Figura 6 Bandas de frecuencia empleadas en enlaces microondas. Fuente: Elaboración propia, con base en ITU-R P.530-17, ITU-R P.838-3 e IEEE Std 521-2019.

– Propagación de ondas en radioenlaces

La propagación en radioenlaces terrestres describe la manera en que una onda electromagnética viaja entre el transmisor y el receptor a través de la atmósfera. En los enlaces de microondas, el comportamiento de propagación está fuertemente asociado a trayectos con línea de vista, por lo que la geometría del enlace, el perfil del terreno y las condiciones atmosféricas resultan determinantes para el nivel de señal recibido (Rappaport, 2002; Saunders & Aragón-Zavala, 2007).

En radiocomunicaciones se reconocen distintos modos de propagación, entre ellos la onda terrestre, la propagación ionosférica y la propagación troposférica. Para los radioenlaces de microondas punto a punto interesa principalmente la propagación troposférica directa, pues el enlace depende de un haz altamente directivo que se desplaza entre dos emplazamientos con visibilidad radioeléctrica suficiente (Lehpamer, 2010; Salema, 2003).

En los enlaces terrestres de capacidad media y alta, la propagación ionosférica no constituye el mecanismo principal de transmisión, debido a que estos sistemas operan, principalmente, en bandas de microondas donde predomina la propagación en línea de vista. Asimismo, la onda terrestre se encuentra asociada con mayor frecuencia a bandas inferiores, utilizadas en servicios de baja frecuencia y cobertura extendida. Por esta razón, el diseño de enlaces microondas se centra en el análisis de los efectos troposféricos, considerando la curvatura terrestre, la refracción atmosférica, el desvanecimiento de la señal y las pérdidas ocasionadas por obstáculos presentes en la trayectoria del enlace (*International Telecommunication Union*, 2025b; Rappaport, 2002).

Los principales fenómenos que afectan la propagación de un radioenlace son la reflexión, la refracción, la difracción, la absorción, la interferencia y el desvanecimiento. La reflexión puede originar multitrayectoria, la refracción modifica la curvatura aparente del trayecto, la difracción aparece cuando existen obstáculos próximos a la línea de vista, la absorción introduce pérdidas por interacción con el medio y la interferencia puede degradar la relación señal-ruido o la relación portadora-interferencia (Goldsmith, 2005; Rappaport, 2002).

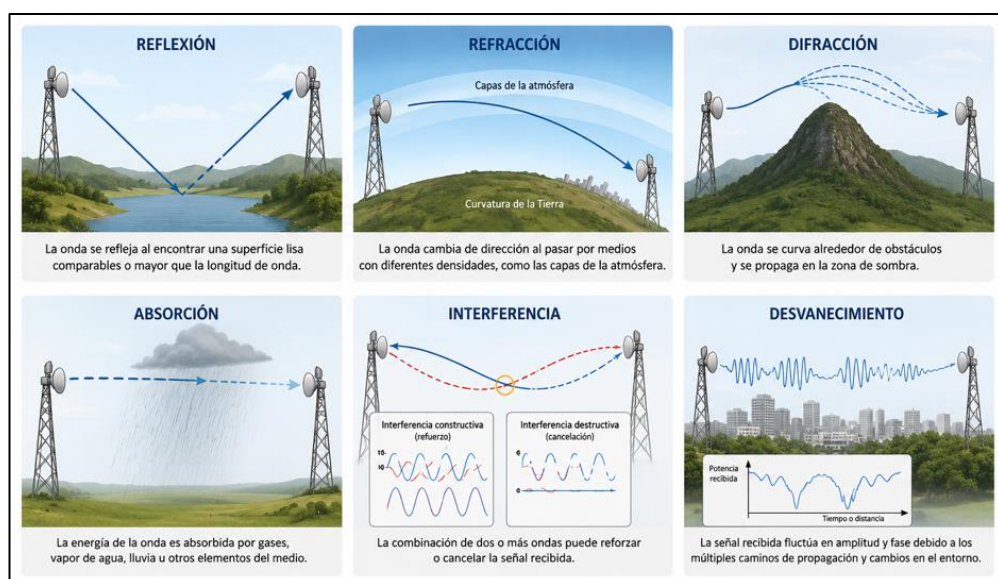


Figura 7 Principales fenómenos que afectan la propagación de un radioenlace. Fuente: Elaboración propia, adaptado de ITU-R P.530-19, ITU-R P.526 e ITU-R P.838-3.

El desvanecimiento constituye un fenómeno crítico en el diseño de enlaces microondas, especialmente cuando se requiere alcanzar altos niveles de disponibilidad. Este efecto puede presentarse como desvanecimiento plano o desvanecimiento selectivo en frecuencia, y suele estar asociado a la propagación por trayectorias múltiples, variaciones en los gradientes atmosféricos o condiciones meteorológicas adversas. Por ello, el diseño del enlace debe contemplar márgenes de desvanecimiento adecuados y, cuando las condiciones del trayecto lo requieran, aplicar técnicas de mitigación como diversidad de espacio o frecuencia, modulación adaptativa y una planificación cuidadosa de la trayectoria del enlace (International Telecommunication Union, 2025b; Lehpamer, 2010).

La Recomendación ITU-R P.530-19 establece métodos de predicción para los efectos de propagación que deben considerarse en el diseño de enlaces terrestres digitales con línea de vista.

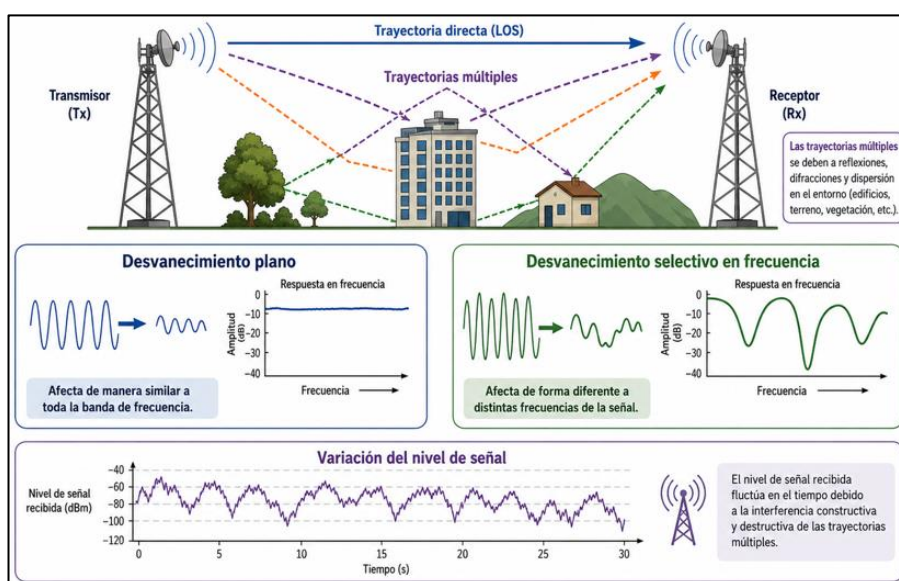


Figura 8 Desvanecimiento en enlaces microondas. Fuente: Elaboración propia, adaptado de International Telecommunication Union (2025) y Rappaport (2002).

– Enlaces microondas

Un enlace microondas es un sistema de radiocomunicación fijo que utiliza antenas directivas y equipos de radiofrecuencia para transmitir información

entre dos puntos geográficos definidos. Su aplicación es frecuente en redes de transporte, interconexión de sedes, enlaces de acceso empresarial y soluciones de *backhaul* (tramo de red que conecta el sitio de acceso con la red troncal del operador) especialmente en escenarios donde el despliegue inmediato de fibra óptica no es técnicamente viable o resulta económicamente desfavorable (Lehpamer, 2010; Salema, 2003).

La importancia de los enlaces microondas radica en su rapidez de implementación, su capacidad para superar limitaciones geográficas y su aptitud para entregar capacidades elevadas con baja latencia. En entornos corporativos, rurales o de difícil acceso, estos enlaces permiten habilitar servicios de telecomunicaciones en plazos menores a los requeridos por una infraestructura totalmente guiada, siempre que exista una trayectoria técnicamente viable y con condiciones adecuadas de línea de vista (Lehpamer, 2010; Rappaport, 2002).

De manera general, los enlaces microondas pueden clasificarse en enlaces punto a punto y punto a multipunto. Los enlaces punto a punto permiten interconectar dos nodos específicos mediante una trayectoria dedicada, por lo que suelen emplearse en redes de transporte, enlaces troncales e interconexión de sedes. En cambio, los enlaces punto a multipunto distribuyen capacidad desde un nodo principal hacia múltiples terminales, priorizando la cobertura y el uso compartido del recurso radioeléctrico (Rappaport, 2002; Salema, 2003).

En proyectos de acceso corporativo y transporte intersitio, el esquema punto a punto resulta el más adecuado, debido a que concentra la energía radiada en una dirección definida, mejora el control de la trayectoria, facilita la planificación de disponibilidad y permite una estimación más precisa del presupuesto de enlace. Estas características lo convierten en una alternativa eficiente para brindar conectividad dedicada cuando el despliegue de fibra óptica no es inmediato o presenta restricciones técnicas y económicas (Lehpamer, 2010; Saunders & Aragón-Zavala, 2007).

Componentes de un enlace microondas

La estructura general de un radioenlace profesional está conformada, en cada extremo, por una unidad interior, una unidad exterior, una antena directiva, líneas de interconexión, sistemas de energía, elementos de protección eléctrica y una infraestructura de soporte. La unidad interior cumple la función de procesar la señal de banda base, gestionar las interfaces de servicio y establecer la conexión con los equipos de red. Por su parte, la unidad exterior realiza las funciones asociadas a la radiofrecuencia, tales como conversión de frecuencia, amplificación, filtrado y transmisión o recepción de la señal (Lehpamer, 2010; Salema, 2003).

Asimismo, el sistema incluye conectores, guías de onda o cables de interconexión, sistemas de puesta a tierra, protecciones contra sobretensiones y elementos de fijación mecánica. Estos componentes son relevantes porque influyen directamente en las pérdidas adicionales del enlace, la estabilidad estructural de la instalación y la continuidad operativa del servicio. En conjunto, una correcta selección e instalación de estos elementos permite asegurar un desempeño confiable del radioenlace y reducir riesgos asociados a fallas eléctricas, mecánicas o de propagación (Lehpamer, 2010; Pozar, 2012).

Antenas para enlaces microondas

Las antenas utilizadas en enlaces microondas deben presentar elevada directividad, buen aislamiento entre polarizaciones y un patrón de radiación apropiado para minimizar interferencias. La antena parabólica es la más empleada en trayectos punto a punto debido a que concentra la energía en un haz angosto y proporciona alta ganancia con un tamaño físico razonable (Balanis, 2016; Saunders & Aragón-Zavala, 2007).

La ganancia ideal de una antena parabólica puede aproximarse mediante la ecuación (21):

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (5)$$

Donde G es la ganancia lineal, η la eficiencia, D el diámetro del reflector y λ la longitud de onda. En decibelios referidos a una antena isotrópica, esta relación se expresa como $G_{dBi} = 10 \log_{10}(G)$, lo cual permite integrarla directamente en el presupuesto de enlace (Balanis, 2016; Salema, 2003).

Parámetros básicos del enlace

Entre los parámetros básicos que gobiernan el desempeño del enlace se encuentran la frecuencia de operación, la potencia transmitida, las ganancias de antena, la sensibilidad del receptor, las pérdidas por cables y conectores, la pérdida de trayectoria y el margen de desvanecimiento. La adecuada combinación de estas variables permite estimar la potencia recibida y determinar si el enlace cumplirá con los objetivos de disponibilidad (Lehpamer, 2010; Salema, 2003).

La potencia recibida debe ser suficientemente superior al umbral de sensibilidad del equipo para absorber las degradaciones propias del canal radioeléctrico. Esa reserva, denominada margen de desvanecimiento, es esencial en enlaces sujetos a lluvia, multitrayectoria o variaciones atmosféricas (Goldsmith, 2005; International Telecommunication Union, 2025b).

Zonas de Fresnel

Además de verificar la línea de vista geométrica entre las antenas, el diseño de un enlace microondas debe considerar el despeje de la primera zona de Fresnel. Esto se debe a que la energía electromagnética no se propaga únicamente sobre una línea recta ideal, sino dentro de una región elipsoidal alrededor del trayecto directo, donde pueden producirse efectos de interferencia y difracción. La zona de Fresnel está conformada por un conjunto de regiones elipsoidales ubicadas alrededor de la línea de vista directa entre

el transmisor y el receptor, estas zonas representan trayectorias alternativas que pueden recorrer las ondas electromagnéticas durante su propagación, generando interferencias constructivas o destructivas según la diferencia de fase entre las señales que llegan al punto de recepción (Rappaport, 2002).

En el diseño de radioenlaces, la primera zona de Fresnel es la más relevante, debido a que concentra la mayor parte de la energía transmitida y tiene mayor influencia sobre el desempeño del enlace, la presencia de obstáculos dentro de esta región puede ocasionar pérdidas adicionales por difracción, reducción del nivel de señal recibido e inestabilidad en la comunicación. Por ello, se recomienda garantizar, como criterio práctico de diseño, el despeje mínimo del 60 % de la primera zona de Fresnel a lo largo de la trayectoria del enlace, especialmente en el punto de mayor obstrucción. Este criterio permite reducir las pérdidas por difracción y mejorar la confiabilidad de la propagación, principalmente en trayectos con vegetación, edificaciones o variaciones pronunciadas del terreno (*International Telecommunication Union, 2019*).

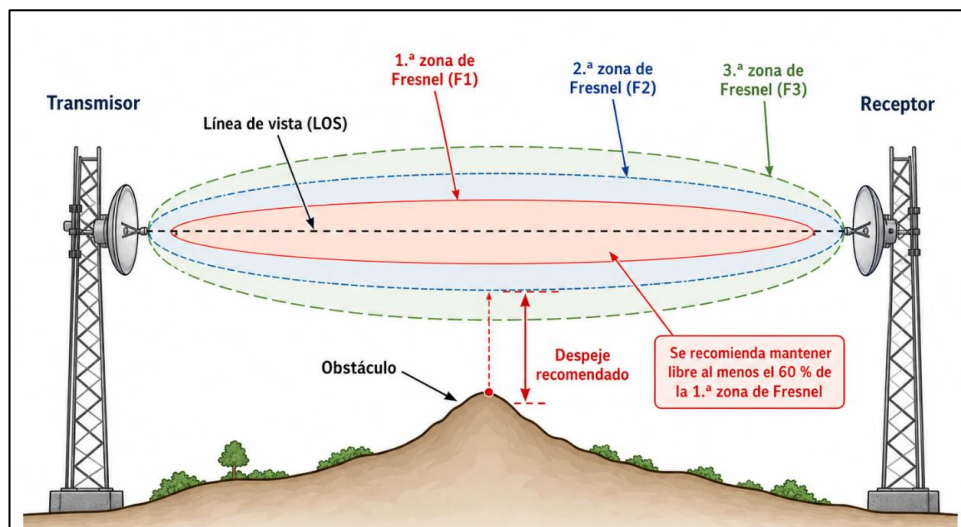


Figura 9 Zonas de Fresnel en un enlace microondas con línea de vista. Fuente: Elaboración propia, adaptado de International Telecommunication Union (2019, 2025).

El radio de la primera zona de Fresnel en un punto del trayecto puede expresarse en la ecuación (21):

$$r_1 = 17.32 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fD}} \quad (6)$$

Donde r_1 es el radio en metros, d_1 y d_2 son las distancias parciales desde el punto considerado hacia el transmisor y el receptor, respectivamente; $D = d_1 + d_2$ es la longitud total del enlace en kilómetros y f es la frecuencia de operación en GHz. El valor del radio alcanza su máximo en el punto medio del enlace, donde las distancias parciales son iguales.

Presupuesto de enlace

El presupuesto de enlace constituye una herramienta fundamental en el diseño de radioenlaces microondas, ya que permite integrar las ganancias y pérdidas del sistema para estimar la potencia disponible en el receptor. A través de este cálculo se verifica si el nivel de señal recibido es suficiente para cumplir con los requerimientos de operación del equipo, la disponibilidad esperada y el margen de desvanecimiento necesario.

La base física del cálculo se encuentra en la ecuación de Friis, la cual describe la potencia recibida en condiciones ideales de propagación en espacio libre, tal como se muestra en la ecuación (21):

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (7)$$

Donde P_R representa la potencia recibida, P_T la potencia transmitida, G_T y G_R las ganancias de las antenas transmisora y receptora, λ la longitud de onda y d la distancia entre ambos puntos del enlace.

En términos logarítmicos, la pérdida en espacio libre se expresa de forma práctica mediante la ecuación (21):

$$L_{FS}(dB) = 92.45 + 20\log_{10}(f_{GHz}) + 20\log_{10}(d_{km}) \quad (8)$$

Donde L_{FS} corresponde a la pérdida en espacio libre, f_{GHz} es la frecuencia de operación expresada en GHz y d_{km} es la distancia del enlace expresada en kilómetros.

A partir de esta pérdida, el balance básico del enlace puede representarse

según la ecuación (9):

$$L_{FS}(dB) = 92.45 + 20\log_{10}(f_{GHz}) + 20\log_{10}(d_{km}) \quad (9)$$

Donde L_{misc} agrupa las pérdidas adicionales asociadas a conectores, guías de onda, cables de interconexión, polarización, atenuación atmosférica, desalineamiento de antenas y otros factores propios de la instalación. De esta manera, el presupuesto de enlace permite evaluar la factibilidad técnica del trayecto, estimar el nivel de señal recibido y determinar el margen requerido para asegurar una operación estable del radioenlace frente a variaciones de propagación y condiciones del entorno (Lehpamer, 2010; Pozar, 2012; Salema, 2003).

Atenuación atmosférica

La atmósfera introduce pérdidas adicionales que deben considerarse dentro del presupuesto de enlace, ya que se suman a la pérdida en espacio libre y pueden afectar el nivel de señal recibido. En bandas altas de microondas, la atenuación por lluvia puede convertirse en uno de los principales factores de indisponibilidad del enlace, especialmente en trayectos largos o en zonas con alta intensidad de precipitación. Asimismo, los gases atmosféricos, principalmente el oxígeno y el vapor de agua, producen atenuaciones específicas que dependen de la frecuencia de operación, la presión, la temperatura y la humedad del entorno (*International Telecommunication Union, 2022, 2025c*).

La recomendación ITU-R P.838 modela la atenuación específica por lluvia mediante una ley potencial de la forma, según la ecuación (21):

$$\gamma_R = kR^\alpha \quad (10)$$

Donde γ_R representa la atenuación específica por lluvia en dB/km, R corresponde a la intensidad de lluvia en mm/h, y k y α son coeficientes que dependen de la frecuencia, la polarización y el ángulo de elevación del enlace.

Este modelo, al combinarse con las estadísticas de precipitación establecidas

en la recomendación ITU-R P.837 y con los métodos de diseño para enlaces terrestres de la recomendación ITU-R P.530, permite estimar la atenuación adicional por lluvia y determinar el margen necesario para alcanzar la disponibilidad objetivo del radioenlace. De esta manera, la evaluación de pérdidas atmosféricas resulta esencial para garantizar un diseño confiable, especialmente en enlaces microondas que operan en frecuencias elevadas o en regiones con condiciones meteorológicas exigentes (*International Telecommunication Union*, 2005b, 2025b, 2025c).

Calidad y disponibilidad del radioenlace

La calidad de un radioenlace digital está relacionada con la integridad de la transmisión, la estabilidad temporal del trayecto y el cumplimiento de umbrales de error compatibles con el servicio transportado. En enlaces de transporte, estos parámetros de desempeño suelen evaluarse mediante indicadores como errores de bit, segundos errados, segundos severamente errados e indisponibilidad, de acuerdo con los criterios establecidos por la UIT para sistemas digitales de telecomunicaciones (*International Telecommunication Union*, 2002).

Por su parte, la disponibilidad representa la fracción de tiempo durante la cual el enlace permanece operativo y cumple las condiciones mínimas de desempeño definidas para el servicio. En este contexto, la recomendación ITU-R F.1703 establece objetivos de disponibilidad aplicables a enlaces inalámbricos fijos digitales, mientras que la recomendación ITU-R P.530 proporciona métodos para estimar la indisponibilidad ocasionada por efectos de propagación, desvanecimiento y atenuación por lluvia.

De esta manera, la calidad y la disponibilidad de un radioenlace no deben analizarse como conceptos independientes, sino como resultados directos del diseño radioeléctrico, del presupuesto de enlace, del margen de desvanecimiento implementado y de las condiciones reales del trayecto. Por ello, un diseño adecuado debe asegurar que el enlace mantenga niveles

aceptables de error y continuidad operativa durante el mayor porcentaje de tiempo posible, especialmente cuando transporta servicios corporativos o de misión crítica (*International Telecommunication Union*, 2005a, 2025b).

Indisponibilidad del radioenlace

La indisponibilidad corresponde al periodo durante el cual el radioenlace no cumple las condiciones mínimas de operación establecidas para el servicio. En sistemas microondas, esta condición puede originarse por desvanecimientos profundos, lluvias intensas, fallas de energía, desalineación de antenas, deterioro de conectores, fallas en los equipos de radio o eventos de interferencia severa.

Desde la perspectiva del diseño, la indisponibilidad total del enlace es el resultado de la combinación de factores radioeléctricos, atmosféricos y operativos. Por ello, su evaluación no debe limitarse únicamente al comportamiento de propagación, sino que también debe considerar la calidad de la instalación, la confiabilidad de los equipos, la protección eléctrica, el mantenimiento preventivo y las condiciones reales del entorno.

En consecuencia, reducir la indisponibilidad exige un diseño con margen suficiente, una correcta selección de equipos y una implementación que asegure estabilidad mecánica, eléctrica y radioeléctrica del sistema (*International Telecommunication Union*, 2005a, 2025b).

Ventajas y limitaciones de los enlaces microondas

Entre las principales ventajas de los enlaces microondas destacan su rapidez de despliegue, la reducción de obras civiles, su flexibilidad para salvar obstáculos geográficos y la posibilidad de alcanzar capacidades elevadas con baja latencia. Estas características los convierten en una solución eficaz para acceso empresarial, transporte de tráfico y enlaces temporales o de expansión rápida (Lehpamer, 2010; Salema, 2003).

No obstante, también presentan limitaciones. Su desempeño depende de una trayectoria con línea de vista y suficiente despeje de Fresnel, puede degradarse por lluvia en bandas altas y requiere una adecuada coordinación espectral para evitar interferencias. Por ello, aunque se trata de una tecnología madura y robusta, su éxito depende de una planificación rigurosa (*International Telecommunication Union*, 2022, 2025b; Rappaport, 2002).

– Fibra óptica

La fibra óptica es un medio de transmisión guiado de alta capacidad que transporta información mediante pulsos de luz confinados dentro de un núcleo dieléctrico. Su empleo se ha extendido en redes de transporte, distribución y acceso debido a su baja atenuación, amplio ancho de banda e inmunidad frente a interferencias electromagnéticas. Estas características permiten transmitir grandes volúmenes de información a largas distancias con alta confiabilidad, por lo que la fibra óptica constituye una solución fundamental en infraestructuras modernas de telecomunicaciones (Agrawal, 2010; Keiser, 2010).

El funcionamiento de la fibra óptica se sustenta en la reflexión interna total. Cuando un rayo luminoso pasa de un medio con mayor índice de refracción a otro con menor índice y el ángulo de incidencia supera cierto valor crítico, la energía queda confinada en el núcleo y puede propagarse a grandes distancias con pérdidas reducidas (Agrawal, 2010; Keiser, 2010).

El comportamiento óptico básico puede describirse mediante la ley de Snell, según la ecuación (21):

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (11)$$

Y el ángulo crítico viene dado por la ecuación (21):

$$\theta_c = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right), \quad n_1 > n_2 \quad (12)$$

Donde n_1 es el índice de refracción del núcleo y n_2 el del revestimiento. Estas relaciones explican el confinamiento de la luz y, por tanto, la viabilidad del medio óptico como guía de onda (Agrawal, 2010).

Una fibra óptica está formada esencialmente por núcleo, revestimiento y recubrimiento protector. El núcleo constituye la región por la que se propaga la luz; el revestimiento garantiza la diferencia de índices necesaria para la reflexión interna; y las cubiertas exteriores aportan protección mecánica frente a humedad, abrasión y esfuerzos de tracción (*International Telecommunication Union*, 2024b; Keiser, 2010).

En la práctica, el cable de fibra óptica se diseña con una estructura mecánica que permite proteger los filamentos ópticos frente a esfuerzos físicos y condiciones ambientales propias del lugar de instalación. Por ello, además de la fibra propiamente dicha, puede incluir tubos de protección, elementos de tracción, recubrimientos internos, cubierta exterior y barreras contra humedad o aplastamiento. Estos componentes permiten conservar la integridad del medio óptico durante el tendido, la manipulación y la operación del enlace, por lo que su selección debe responder al tipo de instalación y a las exigencias del entorno donde será desplegado (Keiser, 2010).

Tipos de fibra óptica

Las fibras se clasifican principalmente en monomodo y multimodo. La fibra monomodo utiliza un núcleo pequeño que permite la propagación de un solo modo, lo cual minimiza la dispersión modal y la hace adecuada para largas distancias y altas tasas de transmisión. La fibra multimodo, en cambio, posee un núcleo mayor que permite múltiples trayectorias de luz y, por tanto, mayores niveles de dispersión modal, razón por la cual se utiliza con mayor frecuencia en distancias cortas (Agrawal, 2010; Keiser, 2010).

La recomendación ITU-T G.652 define las características de la fibra monomodo convencional ampliamente empleada en redes de transporte,

mientras que la recomendación ITU-T G.657 establece requisitos para fibras con mejor comportamiento ante curvaturas, especialmente útiles en instalaciones con radios de doblado más exigentes (*International Telecommunication Union*, 2024b, 2024c).

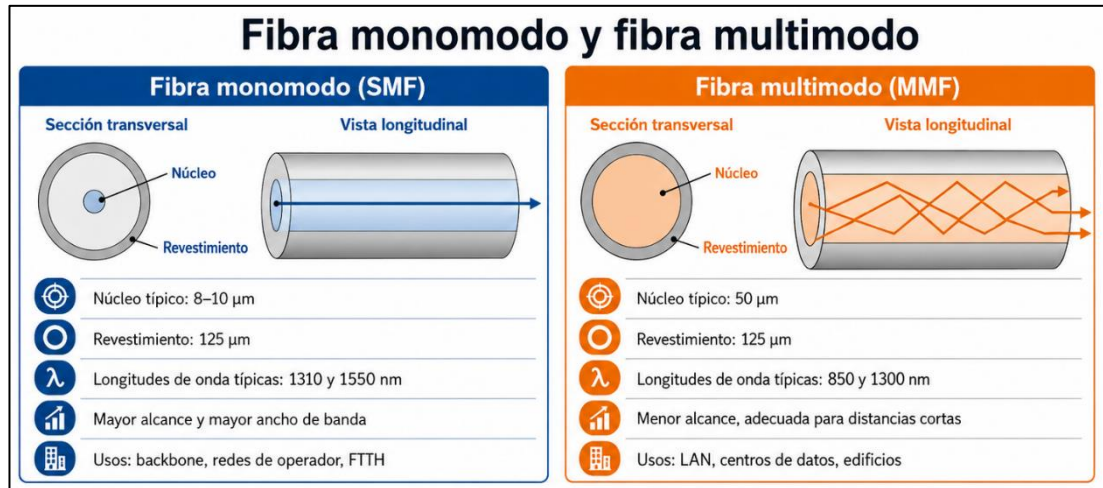


Figura 10 Fibra óptica monomodo y multimodo. Fuente: Elaboración propia, adaptado de Agrawal, G. P. (2013). *Fiber-optic communication systems* (4th ed.)

Parámetros de transmisión en fibra óptica

Los parámetros de transmisión más relevantes en fibra óptica son la atenuación, la dispersión, el ancho de banda y la longitud de enlace alcanzable. La atenuación representa la pérdida de potencia óptica por unidad de longitud, mientras que la dispersión describe el ensanchamiento temporal del pulso durante la propagación. Ambos fenómenos limitan la distancia y la velocidad del sistema (Agrawal, 2010; Keiser, 2010).

En un tramo instalado, el presupuesto óptico puede representarse de manera simplificada según la ecuación (21):

$$P_{R,opt} = P_{T,opt} - \alpha L - \sum L_c - \sum L_e - M \quad (13)$$

Donde $P_{T,opt}$ es la potencia transmitida, αL corresponde a la pérdida del cable, $\sum L_c$ y $\sum L_e$ representan las pérdidas por conectores y empalmes, y M es el margen de diseño. Este cálculo permite verificar que la potencia recibida permanezca dentro del rango operativo del receptor (*International*

Telecommunication Union, 2017; Keiser, 2010).

Componentes de una red de fibra óptica

Una red óptica está conformada por diversos elementos físicos que permiten la transmisión, terminación, administración y conexión de la fibra óptica. Entre estos componentes se encuentran los cables ópticos, conectores, empalmes, bandejas de empalme, distribuidores ópticos y latiguillos de conexión. Cada uno cumple una función específica dentro del enlace y contribuye a garantizar la continuidad física del medio de transmisión.

Estos elementos no solo permiten interconectar los distintos puntos de la red, sino que también influyen directamente en la atenuación total del tramo, la estabilidad de la señal y la facilidad de operación y mantenimiento. Por ello, la calidad del enlace óptico no depende únicamente de las características de la fibra utilizada, sino de toda la cadena de interconexión, incluyendo la correcta instalación, limpieza, protección, organización y certificación de sus componentes (Agrawal, 2010; Keiser, 2010).

La instalación y el tendido de fibra óptica deben ejecutarse respetando criterios técnicos como los radios mínimos de curvatura, la tensión de jalado, la protección mecánica del cable y la limpieza de los conectores. En tendidos interiores, estas consideraciones son aún más importantes debido a la presencia de curvas cerradas, canalizaciones y puntos de transición entre el exterior y el interior. Una instalación deficiente puede incrementar las pérdidas ópticas, afectar la estabilidad del enlace y reducir la vida útil del sistema instalado (International Telecommunication Union, 2024c; Keiser, 2010).

Asimismo, la aceptación técnica de un enlace óptico requiere la realización de pruebas de continuidad, medición de pérdidas e inspección de eventos a lo largo del tramo instalado. Estas pruebas permiten verificar si el enlace cumple con los niveles técnicos previstos para su operación. En este contexto, la recomendación ITU-T G.650.3 reúne métodos de ensayo aplicables a enlaces

monomodo instalados, incluyendo pruebas basadas en reflectometría óptica en el dominio del tiempo, conocida como OTDR, y procedimientos orientados a validar el desempeño del tramo de fibra óptica (International Telecommunication Union, 2017).

La fibra óptica presenta ventajas importantes para los sistemas de telecomunicaciones, tales como muy alto ancho de banda, baja atenuación, inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, buen nivel de seguridad frente a perturbaciones externas y gran capacidad de escalamiento. Sin embargo, también presenta algunas limitaciones, entre ellas la necesidad de técnicas y herramientas especializadas para el empalme, la medición y la certificación del enlace, así como una mayor sensibilidad mecánica frente a doblados, esfuerzos de tracción o manipulaciones inapropiadas que pueden afectar su desempeño (Agrawal, 2010; Keiser, 2010).

– **Servicio de internet corporativo**

El servicio de internet corporativo puede entenderse como una prestación de conectividad orientada a organizaciones que requieren ancho de banda estable, continuidad operativa y parámetros de desempeño definidos para soportar aplicaciones críticas. A diferencia de servicios residenciales de mejor esfuerzo, el entorno corporativo suele exigir compromisos explícitos de disponibilidad, latencia, variación de retardo y atención de incidencias, normalmente expresados en acuerdos de nivel de servicio (Stallings, 2014; Tanenbaum & Wetherall, 2011).

Desde la perspectiva de calidad, la UIT ha definido parámetros para servicios de comunicación de datos con protocolo IP y objetivos de desempeño para servicios basados en IP. Estas referencias permiten vincular el transporte físico del enlace con métricas de servicio como disponibilidad, demora y variación del retardo, especialmente relevantes cuando la conectividad soporta aplicaciones empresariales sensibles (*International Telecommunication Union*, 2011, 2019).

En consecuencia, el acceso corporativo no debe analizarse solo como una provisión de conectividad, sino como una solución integral donde el medio de transmisión, la topología, la disponibilidad prevista y la calidad extremo a extremo condicionan el valor entregado al cliente (Forouzan, 2013; Stallings, 2014).

– **Sistema híbrido de comunicaciones**

Un sistema híbrido de comunicaciones integra dos o más medios de transmisión para aprovechar las ventajas particulares de cada uno. En el ámbito del presente trabajo, la arquitectura híbrida combina un tramo inalámbrico mediante enlace microondas con un tramo guiado mediante fibra óptica, de manera que el acceso pueda concretarse aun cuando la infraestructura totalmente óptica no se encuentre disponible hasta el punto final (Ghazisaidi & Maier, 2011; Lehpamer, 2010).

La lógica técnica de esta integración consiste en emplear el radioenlace para superar restricciones geográficas o de despliegue y utilizar la fibra óptica para completar la distribución interna con alta capacidad y estabilidad. Esta complementariedad es coherente con la literatura sobre redes híbridas fibra-inalámbricas, que destaca la posibilidad de ampliar cobertura, reducir tiempos de implementación y optimizar la relación entre capacidad, costo y factibilidad (Ghazisaidi & Maier, 2011; Keiser, 2010).

Aplicado a un servicio corporativo, el sistema híbrido permite resolver escenarios en los que la última parte del acceso requiere un medio distinto al del transporte principal. Por ello, no se trata de una solución transitoria improvisada, sino de una arquitectura técnicamente justificable cuando la topografía, la vegetación, la distancia o la disponibilidad de infraestructura condicionan el diseño de acceso (Lehpamer, 2010; Salema, 2003).

III.5 Procedimiento

Levantamiento de información (TSS)

Se requiere habilitar un servicio de internet corporativo para un cliente cuyo local se encuentra ubicado en una zona con alta densidad de árboles en la ciudad de Cajamarca (Coordenadas: 7° 8'17.24"S; 78°28'5.00"O).

Para ello, se identificaron tres posibles sites de atención: TC5844 Baños del Inca, TC5853 El Inca y TC5833 Cajamarca Histórico, cercanos al local del cliente. Con el software Google Earth se realizó la validación radioeléctrica preliminar mediante el perfil de elevación y con el programa nGMyD, plataforma de Claro Peru, la revisión de la línea de vista (LOS) desde los sites propuestos hacia el cliente, a fin de validar el enlace con el perfil más optimo.

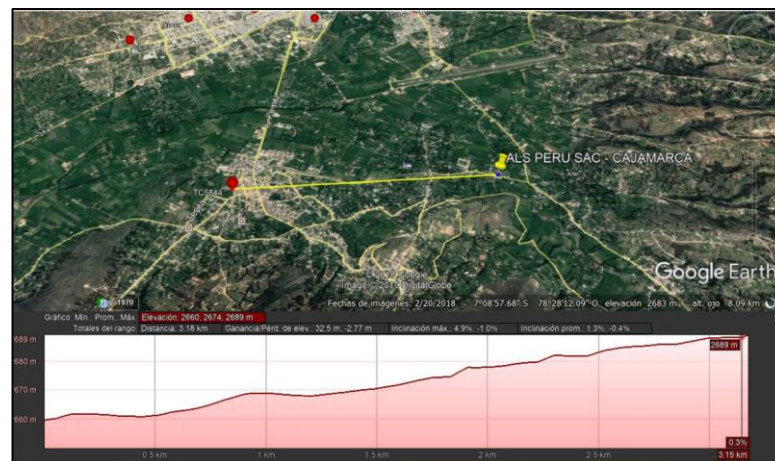


Figura 11 Perfil de elevación Cliente - SITE TC5844 Baños del Inca. Fuente: Elaboración propia

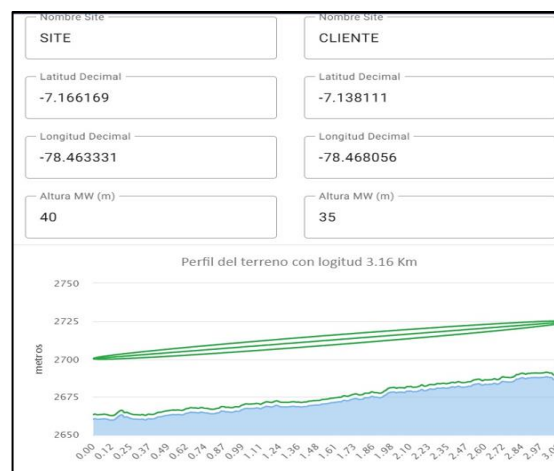


Figura 12 Simulación de línea de vista en la plataforma nGMyD entre SITE TC5844 Baños del Inca – Cliente. Fuente: Elaboración propia

Se determinó que el site TC5844 Baños del Inca, ubicado en las coordenadas 7° 9' 58.21" S y 78° 27' 47.99" O, presentaba el perfil técnico más favorable para la implementación del enlace. El trayecto evaluado registró una distancia aproximada de 3.16 km, con valores referenciales de elevación de 2660 m como mínima, 2674 m como promedio y 2689 m como máxima.

Con ello, se sustentó preliminarmente la viabilidad del trayecto radioeléctrico, al evidenciar una distancia adecuada para un enlace microondas de acceso y condiciones topográficas compatibles con el análisis de línea de vista. Con base en esta evaluación, se programó la visita técnica de validación en campo, a fin de confirmar las condiciones reales del entorno, la disponibilidad de infraestructura y la factibilidad de instalación del enlace.

En ese contexto, se ejecutó la visita técnica al Site TC5844 Baños del Inca para confirmar en campo las condiciones de implementación.



Figura 13 SITE TC5844 Baños del Inca. Fuente: Elaboración propia

Durante la inspección del site se realizó un reconocimiento técnico del sitio para verificar la infraestructura de soporte disponible (estructura portante, puntos de anclaje y zona de trabajo en torre), y para definir el punto de emplazamiento del sistema radio (antena/ODU) orientado hacia el cliente.

Desde la torre monopolo del site se validó la línea de vista con el local del cliente.



Figura 14 Vista desde el SITE TC5844 BANOS DEL INCA al cliente. Fuente: Elaboración propia.

A partir de la validación técnica en campo se determinó la trayectoria física del cableado desde la zona de antenas hacia la bajante, considerando el uso de soportería monopolo y los puntos de fijación necesarios para asegurar una ruta continua y estable.



Figura 15 Proyección del cableado y soporte monopolo en el Site. Fuente: Elaboración propia.

Luego, se determinó el recorrido del cableado desde la parte alta de la torre hasta el ingreso al cuarto/*shelter*, identificando bandejas o zonas de sujeción, el punto de ingreso al gabinete y las condiciones de protección mecánica del

tendido; además, se calculó una longitud referencial de aproximadamente 45 metros para el tramo correspondiente al emplazamiento de la estación base.

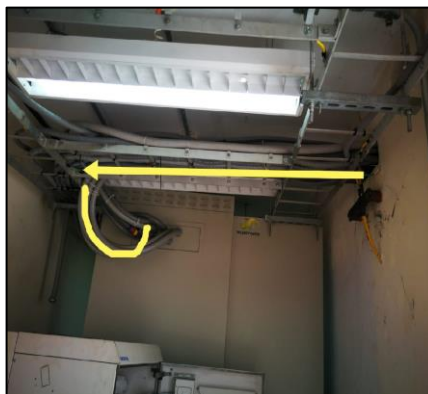


Figura 16 Proyección del recorrido del cableado en el Site. Fuente: Elaboración propia

En el cuarto técnico, se realizó una inspección detallada del gabinete de interconexión, evaluando su configuración general y disposición interna; asimismo, se validó el estado del ordenamiento, el nivel de ocupación de las unidades de rack y las condiciones de factibilidad para la intervención técnica del sistema.

Se identificó el equipo de agregación de servicios modelo SAR-A, se validó la disponibilidad de interfaces físicas para la provisión del servicio corporativo. Asimismo, se revisó el estado y funcionamiento de los equipos existentes, con el fin de confirmar que se encontraban operativos y en condiciones adecuadas para soportar el nuevo enlace de comunicaciones.



Figura 17 Vista del equipo SAR-A. Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se evaluó el sistema de energía disponible para la instalación del nuevo equipamiento. Para ello, se revisaron los módulos de alimentación y distribución existentes, como la unidad de distribución de corriente continua (DCDU) y la unidad de banda base (BBU), con el fin de verificar que contaran con capacidad y condiciones adecuadas para soportar el nuevo enlace.



Figura 18 Vista del equipo DCDU Y BBU. Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se revisó el tablero de protección eléctrica para verificar la disponibilidad de interruptores termomagnéticos (*breakers*) y así poder habilitar un punto de alimentación adicional para el nuevo equipamiento, garantizando condiciones adecuadas de seguridad y cumplimiento de los criterios operativos del emplazamiento.

De manera complementaria, se realizó la evaluación técnica del sistema de puesta a tierra, donde se corroboró la disponibilidad de puntos de conexión libres tanto en la barra colectora de cobre como en la barra de tierra del emplazamiento.

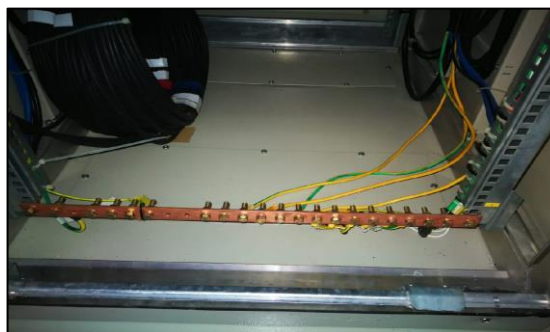


Figura 19 Vista de barra a tierra. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, a partir de la información obtenida en el relevamiento técnico (*TSS*), se validó los parámetros críticos del enlace, tales como la trayectoria,

el perfil de elevación, la línea de vista, la canalización del cableado y la disponibilidad de recursos de red, energía y puesta a tierra.

Este análisis permitió confirmar los requerimientos técnicos necesarios para la implementación del sistema inalámbrico en el lado de la estación base. Como resultado, quedaron definidos los principales insumos de instalación: un tramo de cableado aproximado de 45 metros, la instalación de un soporte tipo monopolo especial y la ubicación de la antena a una altura de 35 metros sobre la estructura portante.

Durante el TSS en el local del cliente, se verificó en campo la dirección del enlace hacia el Site de origen desde el punto propuesto de instalación, desde esa ubicación se confirmó que existe línea de vista (*LOS*) en el eje del enlace; sin embargo, se observó una alta presencia de vegetación en el trayecto, lo que podría afectar el desempeño al invadir la primera zona de Fresnel; por ello, el diseño consideró necesario incrementar la altura de montaje mediante el uso de una torre ventada, con la finalidad de asegurar el despeje requerido, reducir posibles pérdidas por obstrucción y mantener la estabilidad del enlace durante su operación.

Debido a que la solicitud fue priorizada y con el propósito de optimizar los tiempos de implementación del servicio, previamente se había instalado una torre ventada en el local del cliente. Durante la evaluación técnica, dicha estructura fue verificada para confirmar que cumpliera con las condiciones necesarias para ser utilizada como soporte de la antena del radioenlace microondas.



Figura 20 Torre auto soportada en el local del Cliente. Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se verificó que la torre contaba con una caja metálica de paso, instalada en la parte inferior de la estructura, la cual permitiría el ordenamiento, protección y derivación del cableado asociado al sistema (energía, puesta a tierra y cables de transmisión). De manera complementaria, se revisó el entorno inmediato para asegurar que el emplazamiento permitía mantener el despeje necesario hacia el Site de origen y facilitar el tendido del cableado desde la torre hacia el punto de instalación del equipamiento del cliente.



Figura 21 Caja de paso en torre ventada. Fuente: Elaboración propia.

Luego, se definió el trazado del cableado desde la torre ventada hasta el ambiente donde se instalará el equipo CPE. La ruta fue proyectada por la parte superior del almacén, siguiendo el perímetro interno a través de la estructura del techo, esta disposición permitió mantener el cableado fuera de las zonas de tránsito, reducir la exposición a posibles daños mecánicos y asegurar una instalación más ordenada y segura.

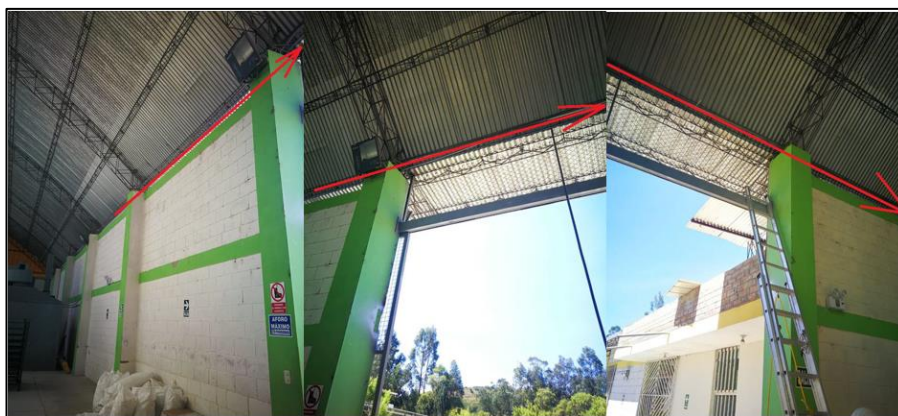


Figura 22 Proyección del cableado en el local del cliente. Fuente: Elaboración propia

En el tramo final se estableció una bajada hacia el punto de instalación, donde se determinó la ubicación del gabinete que concentrará la terminación del cableado y la interconexión con el equipamiento del cliente.



Figura 23 **Proyección del cableado en el local del cliente.** Fuente: Elaboración propia.



Figura 24 **Proyección de ubicación del gabinete en el local del cliente.** Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, se confirmó que la longitud proyectada para el tendido es de 180 metros, magnitud que excede el límite operativo de 100 metros definido para interfaces Ethernet sobre medios de cobre (par trenzado), de acuerdo con las especificaciones del estándar IEEE 802.3.

Ante esta restricción física y técnica, se definió el uso de fibra óptica para este tramo específico; esto permitiría reducir la atenuación de la señal y evitar interferencias electromagnéticas durante la transmisión, asegurando la integridad del flujo de datos hasta el equipo terminal del cliente. De esta manera, se contribuye al cumplimiento de los niveles de servicio requeridos para la operación del CPE.

La implementación de la solución se inició con el levantamiento de información en el *Site* de origen y en las instalaciones del cliente, con la finalidad de validar la viabilidad técnica del servicio. Durante esta etapa se revisó la disponibilidad de infraestructura del operador, la existencia de puertos libres, la capacidad disponible para cursar el tráfico requerido, la disponibilidad de puntos de energía, las condiciones del sistema de puesta a tierra y el estado general de la estructura donde se instalarían los equipos. De manera complementaria, en el local del cliente se inspeccionó el punto más conveniente para la instalación de la estructura de soporte, así como la ruta del tendido interno hacia el ambiente donde se ubicaría el equipo CPE.

– Validación de la línea de vista y análisis del perfil del enlace

Con las coordenadas obtenidas en campo y la información topográfica levantada durante el TSS, se procedió a revalidar la línea de vista entre el Site seleccionado y el local del cliente, con la herramienta Google Earth se revisó la presencia de obstrucciones naturales o artificiales dentro de la trayectoria radioeléctrica, prestando especial atención a la alta densidad arbórea presente en la zona de estudio.

Si bien en la visita en campo se validó visualmente la línea de vista entre los extremos del enlace, es necesario revalidar el despeje de la zona debido a la distancia en el Site y el cliente.

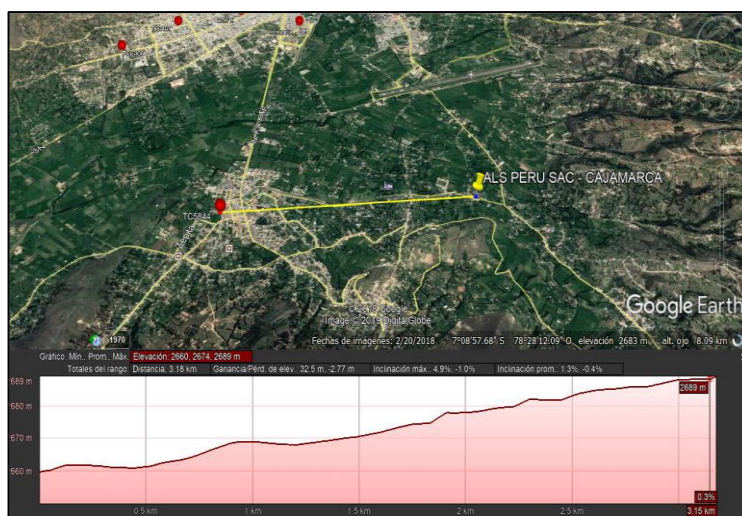


Figura 25 Vista geográfica del enlace Site – Cliente. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 24 se muestra el perfil de elevación entre el site y el cliente, se observa una tendencia ascendente desde el Site hacia el local del Cliente, el relieve del recorrido no presenta cambios abruptos, lo que constituye una base favorable para la evaluación de la línea de vista del enlace microondas.

– Equipamiento Ceragon IP-20S

Para la implementación del radioenlace se consideró la instalación de radios Ceragon FibeAir IP-20S, las cuales corresponden a nodos *all-outdoor* (instalación a la intemperie) para enlaces de microondas punto a punto orientados a aplicaciones de *short-haul* y conectividad empresarial. De acuerdo con la información oficial del fabricante, este equipo opera en bandas licenciadas comprendidas entre 6 GHz y 42 GHz, por lo que resulta compatible con la banda de 23 GHz considerada en el presente diseño.

Desde el punto de vista funcional, el Ceragon IP-20S integra en una sola unidad exterior las funciones de transmisión, recepción y procesamiento de tráfico *Carrier Ethernet*, lo que simplifica la instalación y reduce la necesidad de elementos adicionales en sitio. Esta arquitectura permite disminuir pérdidas asociadas a interconexiones, reducir el consumo de energía y optimizar el espacio requerido en la estructura de soporte.

Asimismo, la plataforma IP-20S está orientada a escenarios de *backhaul* y acceso inalámbrico que requieren una solución compacta, de rápida instalación y compatible con redes de transporte basadas en *Ethernet*. Desde el punto de vista técnico, estas características mostradas en la tabla 1, la hacen adecuada para enlaces corporativos de corta y mediana distancia, donde se requiere una combinación equilibrada entre disponibilidad del servicio, facilidad de despliegue y eficiencia operativa.

Tabla 1 Principales datos técnicos del radio Ceragon FibeAir IP-20S.

Parámetro	Especificación técnica
Modelo de radio	Ceragon IP-20S
Rango de frecuencia soportado	5.7 GHz – 42 GHz
Configuraciones de radio	1+0, 1+1, 2+0 SP o DP (sin XPIC), multibanda con IP-50E o IP-20E
Protección	1+1 HSB
Modulación	QPSK hasta 2048 QAM con ACM
Reutilización de frecuencia	AFR (Advanced Frequency Reuse) para tail site
Dimensiones del radio	230 mm × 233 mm × 98 mm
Peso del radio	6 kg
Temperatura de operación	-33 °C a +55 °C
Temperatura extendida	-45 °C a +60 °C
Alimentación estándar	-48 VDC
Rango de entrada DC	-40 VDC a -60 VDC
Modelo de antena	SB1-220CIPN FibeAir AM-1-23
Banda de operación de la antena	23 GHz
Ganancia de la antena	34.06 dBi
Aplicación en el proyecto	Enlace de microondas punto a punto para acceso corporativo

Fuente: Elaboración propia, con base en Ceragon Networks (s. f.) y Radio Frequency Systems (s. f.).

– Dimensionamiento técnico y presupuesto de enlace

Una vez validada la trayectoria, se efectuó el dimensionamiento técnico del radioenlace mediante el cálculo del presupuesto de enlace. En esta etapa se consideraron la potencia de transmisión del radio, la ganancia de las antenas, las pérdidas en espacio libre, las pérdidas asociadas a conectores y accesorios, así como el nivel de señal esperado en la recepción. Del mismo modo, se evaluó el margen de desvanecimiento requerido para asegurar un funcionamiento estable frente a variaciones atmosféricas y condiciones propias del entorno.

La fórmula general del presupuesto de enlace en microondas se definió en la ecuación (9):

$$P_R(dBm) = P_T(dBm) + G_T(dBi) + G_R(dBi) - L_{FS}(dB) - L_{misc}(dB) \quad (9)$$

La fórmula de las pérdidas en espacio libre según la ecuación (8) es:

$$L_{FS}(dB) = 92.45 + 20\log_{10}(f_{GHz}) + 20\log_{10}(d_{km}) \quad (8)$$

Según la información para este diseño, se tiene:

- Frecuencia: $(23.163 \text{ GHz} + 21.931 \text{ GHz}) / 2 = 22.547 \text{ GHz}$
- Distancia: 3.16 Km
- $G_t = 34.06 \text{ dBi}$
- $G_r = 34.06 \text{ dBi}$

$$L_{FS}(dB) = 92.45 + 20 \cdot \log_{10}(22.547) + 20 \cdot \log_{10}(3.16) \quad (14)$$

$$L_{FS}(dB) = 129.51 \text{ dB} \quad (15)$$

Considerando una potencia de transmisión de 18 dBm, una ganancia de antena de 34.06 dBi en cada extremo y pérdidas del sistema de 1 dB, se reemplaza en la ecuación (9), obteniéndose (16) y (21):

$$P_R(dBm) = 18 + 34.06 + 34.06 - 129.51 - 1 \quad (16)$$

$$P_R(dBm) = -44.39 \text{ dBm} \quad (17)$$

La potencia recibida estimada del enlace es de -44.39 dBm, valor obtenido a partir de la potencia de transmisión, la suma de las ganancias de antena en ambos extremos y las pérdidas totales presentes en la trayectoria de propagación.

A partir del nivel de recepción estimado, se calculó el margen de desvanecimiento del radioenlace, el cual representa la reserva de señal disponible antes de que el nivel recibido alcance el umbral mínimo requerido por el receptor para mantener la operación estable. Para este análisis, se consideró que el umbral de recepción del equipo Ceragon FibeAir IP-20S, para una condición de BER = 1E-6, es de -89 dBm.

El margen de desvanecimiento se determinó mediante la diferencia entre la potencia recibida estimada y el umbral de recepción del equipo. Dado que la potencia recibida calculada fue de -44.39 dBm, se obtuvo un margen de desvanecimiento de 44.61 dB. Este valor indica que el enlace cuenta con una reserva adecuada frente a posibles pérdidas adicionales ocasionadas por variaciones atmosféricas, vegetación, conectores, desalineamiento de antenas o condiciones propias del trayecto radioeléctrico.

– Cálculo de la primera zona de Fresnel

De forma complementaria al presupuesto de enlace, se efectuó el cálculo de la primera zona de Fresnel con la finalidad de verificar el despeje del trayecto radioeléctrico. Para este análisis se consideró la frecuencia más baja de operación del enlace, correspondiente a **21.931 GHz**, debido a que a menor frecuencia se obtiene un mayor radio de Fresnel, lo que representa la condición más crítica y conservadora para la evaluación del despeje.

La fórmula para calcular el radio de Fresnel según la ecuación (6):

$$r_1 = 17.32 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fD}} \quad (6)$$

Donde:

- r_1 : radio de la primera zona de Fresnel en metros
- d_1 : distancia desde el extremo transmisor hasta el punto de análisis, en km
- d_2 : distancia desde el punto de análisis hasta el extremo receptor, en km
- D : distancia total del enlace, en km
- f : frecuencia de operación, en GHz

Se identificó el punto crítico del enlace:

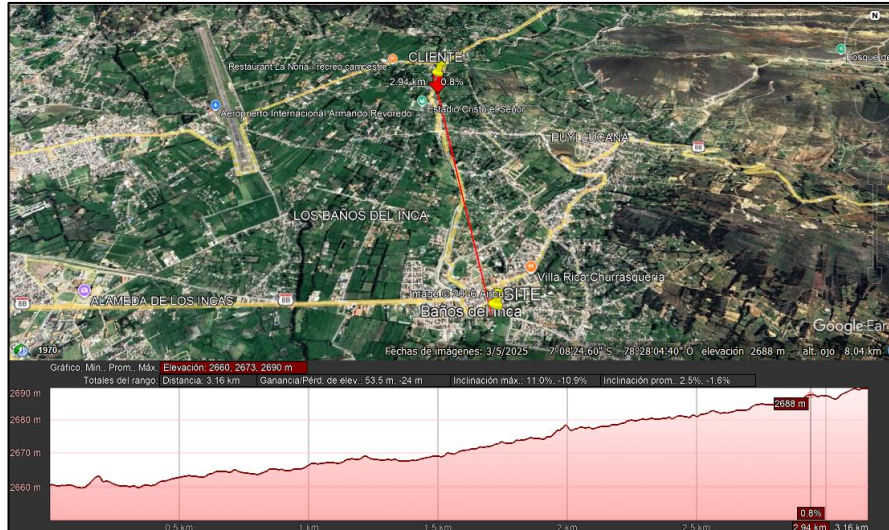


Figura 26 Punto crítico en el enlace microondas. Fuente: Elaboración propia.

Según la imagen, el punto más alto se encuentra aproximadamente a:

$$d1 = 2.94 \text{ Km}$$

La distancia total del enlace es:

$$D = 3.16 \text{ Km}$$

Por lo tanto, la distancia desde el punto más alto hasta el otro extremo es:

$$d2 = 3.16 - 2.94 = 0.22 \text{ km}$$

Para calcular la primera zona de Fresnel según la ecuación (6) y usando la frecuencia más baja de **21.931 GHz** se tiene:

$$r_1 = 17.32 \sqrt{\frac{2.94 \times 0.22}{21.931 \times 3.16}} \quad (18)$$

$$r1 = 1.71 \text{ m} \quad (19)$$

El despeje mínimo recomendado del 60 % de la primera zona de Fresnel sería:

$$0.6r1 = 0.6 \times 1.71$$

$$0.6r1 = 1.03 \text{ m}$$

Entonces, en el punto más alto del enlace, ubicado aproximadamente a 2.94 km del origen, se debe asegurar un despeje mínimo de aproximadamente 1.03 m sobre el terreno u obstáculo, aunque el radio total de la primera zona de Fresnel es de aproximadamente 1.71 m.

– **Consideración del factor K y curvatura terrestre**

En enlaces terrestres de microondas, además del despeje de la zona de Fresnel, debe considerarse el efecto de la curvatura terrestre y la refracción atmosférica. Para ello se utiliza el factor de radio terrestre equivalente K, el cual permite modelar el efecto conjunto de ambos fenómenos sobre la trayectoria radioeléctrica. En condiciones atmosféricas estándar se adopta comúnmente:

$$K = 4/3$$

Este criterio permite aproximar la curvatura aparente de la Tierra y evaluar con mayor precisión el despeje del enlace frente a obstáculos presentes en el trayecto (International Telecommunication Union [ITU], 2017, 2025).

Bajo este criterio, la corrección por curvatura terrestre en el punto de análisis puede estimarse mediante la ecuación (20):

$$hc = \frac{d_1 d_2}{12.75K} \quad (20)$$

Reemplazando:

$$hc = \frac{2.94 \times 0.22}{12.75 \times \frac{4}{3}} \quad (21)$$

$$hc = 0.038 \text{ m}$$

Es decir, en el punto más alto del enlace, la curvatura terrestre corregida por el factor $k = 4/3$ aporta aproximadamente 4 cm. Es un valor pequeño porque el punto crítico está muy cerca del extremo del cliente y no en la mitad del

enlace:

$$h_{despeje} = 1.03 + 0.04 = 1.07 \text{ m}$$

$$h_{despeje} = 1.07 \text{ m}$$

A partir de esta validación inicial, se continuó con la evaluación de las zonas de Fresnel del enlace mediante el software Link Calc de LigoWave.m

El análisis confirmó que la trayectoria propuesta era técnicamente factible, siempre que la antena ubicada en el extremo del cliente se instalara a una altura mínima de 10 metros. No obstante, debido a la alta densidad arbórea presente en el terreno, se determinó la instalación de la antena a 40 metros de altura, con el fin de asegurar un mayor despeje del trayecto radioeléctrico. Asimismo, se verificó que la primera zona de Fresnel cumplía con las condiciones de despeje requeridas para la frecuencia de operación seleccionada, aspecto fundamental para minimizar pérdidas por difracción y garantizar la estabilidad del enlace.

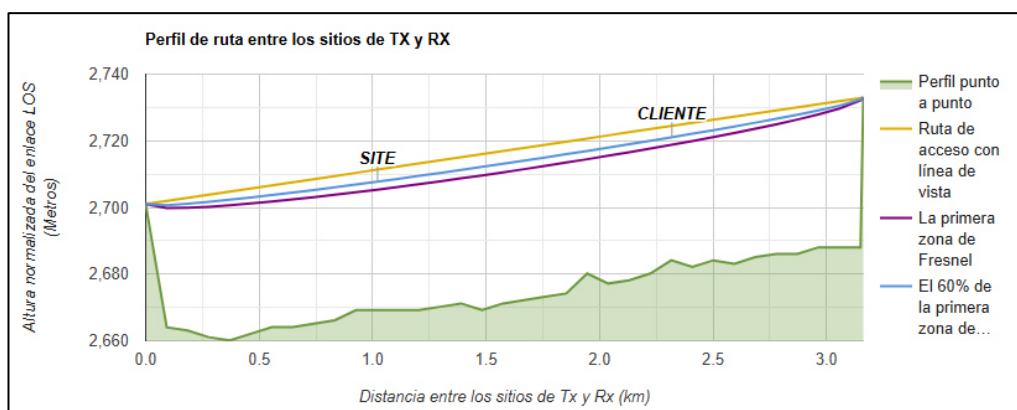


Figura 27 Línea de vista entre Site y local del cliente. Fuente: Elaboración propia a partir del análisis del perfil de ruta realizado en LinkCalc LigoWave.

Instalación e implementación del servicio

Antes de iniciar la instalación física del servicio, se determinó el esquema lógico de interconexión entre el site TC5844 Baños del Inca y el local del cliente.

En el extremo del operador, correspondiente al site TC5844 Baños del Inca, el radioenlace fue integrado al equipo de red identificado como rCSR

BanosdelInca, utilizando la interfaz 1/1/11. En este punto se configuró la VLAN de gestión 2186, junto con el direccionamiento IP asignado para la administración del enlace. Esta configuración permitió el monitoreo remoto del radio y la validación operativa del servicio desde la red del operador.

En el extremo del cliente, el radioenlace fue conectado hacia el equipo Router Huawei AR161F, mediante la interfaz G0/0/4. Sobre este equipo se configuró el servicio de Internet corporativo con una capacidad de 6 Mbps, utilizando la VLAN de servicio 2051. Asimismo, se asignaron las direcciones IP correspondientes para la interfaz WAN, la LAN del cliente y la puerta de enlace predeterminada, permitiendo la entrega del servicio de conectividad hacia la red interna del usuario final.

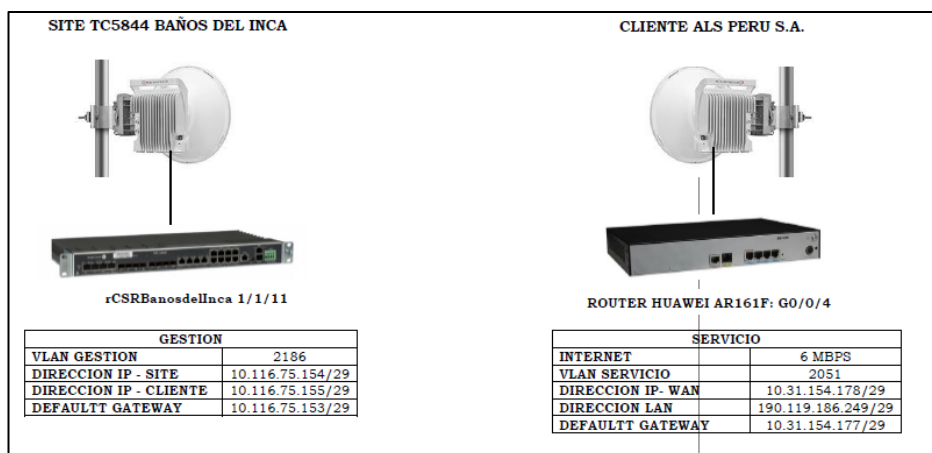


Figura 28 Esquema lógico de interconexión entre el site y el cliente. Fuente:Elaboración propia.

Instalación del radioenlace en el site TC5844 Baños del Inca.

Luego de definir el esquema lógico del servicio y validar los parámetros de gestión y direccionamiento IP, se procedió con la instalación física de los equipos *outdoor* correspondientes al extremo del site TC5844 Baños del Inca. Esta etapa comprendió la verificación de los equipos de radiofrecuencia, el montaje de la antena, la conexión de cables asociados y la orientación del enlace hacia el local del cliente.

Se instaló una antena RFS de 0.3 m y una unidad de radio Ceragon FibeAir IP-20S, la antena RFS será la encargada de dirigir la señal de microondas

hacia el punto remoto del enlace, operando bajo la frecuencia de 23.0 GHz. Por su parte, la unidad Ceragon FibeAir IP-20S realizará la transmisión y recepción de la señal radioeléctrica, permitiendo transportar el tráfico de datos del servicio corporativo a través del enlace microondas.

Se realizó el montaje de la antena sobre el soporte metálico de la estructura, empleando abrazaderas, pernos y elementos de ajuste mecánico para asegurar su correcta fijación y estabilidad frente a vibraciones o condiciones ambientales. Asimismo, los pernos de sujeción fueron protegidos con grasa, con el fin de reducir el riesgo de corrosión y facilitar futuras labores de mantenimiento.

Finalmente, se efectuó la orientación inicial de la antena hacia el extremo remoto del enlace, de acuerdo con la trayectoria establecida durante el análisis de factibilidad.



Figura 29 Instalación de la antena y radio en el Site. Fuente: Elaboración propia.



Figura 30 Direccionamiento de la antena hacia el local del Cliente. Fuente: Elaboración propia.

Una vez instalada la antena, se procedió con la conexión de los cables asociados al equipo *outdoor*. Se conectaron los conductores de energía, puesta a tierra y Ethernet, manteniendo protección mecánica mediante tubería corrugada. Los conectores expuestos fueron protegidos con siliconado para evitar el ingreso de humedad, polvo o partículas que pudieran comprometer la continuidad operativa del enlace. Adicionalmente, cada cable fue identificado mediante etiquetas, diferenciando las conexiones de tierra, alimentación y datos.

El cableado fue guiado desde la antena hacia la bajada de torre utilizando tubería corrugada y sujetadores plásticos, con el objetivo de mantener un recorrido ordenado y protegido, durante esta actividad se cuidó que los cables no quedaran sometidos a tensión mecánica, curvaturas pronunciadas o exposición directa a esfuerzos que pudieran deteriorar la cubierta. La canalización permitió conducir los cables hacia el punto de ingreso al gabinete de comunicaciones.



Figura 31 Recorrido del cableado (bajada). Fuente: Elaboración propia.

Concluida la bajada del cableado, se realizó la conexión en el gabinete de comunicaciones del site. Se observa la conexión del cable de red ethernet, el cable de alimentación y sus etiquetas de identificación, lo cual permite mantener trazabilidad del servicio y facilitar posteriores tareas de mantenimiento, diagnóstico o ampliación.

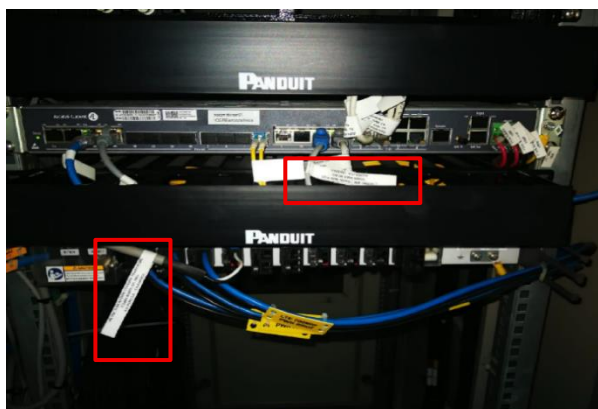


Figura 32 Etiquetado de patch cord Ethernet y cable de alimentación de la radio en gabinete de Site. Fuente: Elaboración propia.

Instalación del radioenlace en el local del cliente.

En el extremo del cliente se realizó la instalación del radioenlace correspondiente al punto remoto del servicio.

Se realizó la instalación exterior en el lado del cliente, ubicando la antena y la unidad de radio en la torre ventada. Los trabajos comprendieron el montaje de la antena, la fijación del soporte, la conexión de los cables de energía, puesta a tierra y datos, así como la orientación inicial de la antena hacia el site TC5844 Baños del Inca.

Durante la instalación, se verificó que la antena quedara correctamente asegurada al mástil mediante abrazaderas, pernos y elementos metálicos de sujeción. Asimismo, los puntos de ajuste fueron protegidos con grasa, con el fin de reducir el riesgo de corrosión y facilitar futuras labores de mantenimiento o alineamiento, esta fijación permitió asegurar la estabilidad de la antena frente al viento, vibraciones y condiciones ambientales de la zona.

Se instaló un módulo óptico SFP Finisar para realizar la interconexión por fibra óptica entre los equipos de comunicaciones, el módulo opera a 1310 nm, longitud de onda utilizada comúnmente en enlaces de fibra monomodo para distancias internas extendidas o metropolitanas.

Posteriormente, se realizó la conexión del cableado asociado a la unidad de radio. Se identificaron los conductores de energía, tierra y red, los cuales fueron canalizados mediante tubería corrugada para protegerlos durante su recorrido por la torre. Asimismo, los conectores expuestos fueron protegidos mediante siliconado, con la finalidad de evitar el ingreso de humedad, polvo o partículas que pudieran afectar el funcionamiento del equipo *outdoor*.



Figura 33 Recorrido del cableado desde antena. Fuente: Elaboración propia.

Como parte del ordenamiento de la instalación, se realizó el etiquetado de los cables y del soporte de antena, facilitando la identificación, operación, mantenimiento y trazabilidad del servicio implementado.

Finalmente, se realizó la orientación física de la antena hacia el extremo del *site* TC5844 Baños del Inca. La vista panorámica desde la torre permitió confirmar la dirección de apuntamiento, de acuerdo con la trayectoria definida durante el diseño del radioenlace, con ello, el sistema exterior quedó instalado y preparado para la etapa de alineamiento fino, medición de niveles de recepción y validación del enlace.



Figura 34 Posición de antena en dirección a Site. Fuente: Elaboración propia.

En el local del cliente se realizó la conexión del cableado proveniente del sistema de radioenlace hacia el gabinete de comunicaciones. El cable de fibra óptica fue etiquetado para facilitar la trazabilidad del servicio, permitiendo identificar con rapidez el origen, destino y equipo asociado al enlace. Esta identificación es importante para las labores de operación, mantenimiento, diagnóstico de fallas y futuras intervenciones en el gabinete.

Posteriormente, se realizó la conexión del equipamiento *indoor* del cliente. En el gabinete se ubicaron el router y el sistema de alimentación de la radio, manteniendo el cableado ordenado y separado según su función.



Figura 35 Vista panorámica del gabinete instalado en el local del Cliente. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se verificó que los equipos se encontraran energizados y correctamente conectados, dejando el extremo del cliente preparado para la configuración lógica del servicio, la validación de conectividad y las pruebas finales de operación.

Configuración de frecuencias y validación de nivel de recepción del radioenlace en el lado site

En el lado del *site* TC5844 Baños del Inca, se verificaron los parámetros operativos del radioenlace mediante la interfaz de gestión del equipo Ceragon,

durante la revisión, se observó que la interfaz de radio se encontraba en estado Up, lo cual indicó que el enlace estaba operativo a nivel de radiofrecuencia.

Respecto a la configuración de frecuencia, el equipo del lado del site presentó una frecuencia de transmisión de 23.163 GHz y una frecuencia de recepción de 21.931 GHz, estos parámetros correspondieron a la configuración asignada para el enlace microondas en la banda de 23 GHz.

Radio Parameters	
Status Parameters	
Radio Location	Radio: Slot 2, Port 1
Type	RFU-N-SC
XPIC support	No
Radio Interface operational status	Up
Operational TX Level (dBm)	18
RX Level (dBm)	-48
Modem MSE (dB)	-38.95
Defective Blocks	0 Clear Counter
TX Mute Status	Off
Adaptive TX power operational status	Down
Frequency control (Local)	
TX Frequency (MHz)	23163.000 (23000.000 ... 23600.000)
RX Frequency (MHz)	21931.000 (21780.000 ... 22400.000)
Frequency Separation (MHz)	1232.000
☐ Set also remote unit	
Configuration Parameters	
TX Level (dBm)	18 (-1 ... 20)

Figura 36 Parámetros de Rx en lado Site. Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se asignó una potencia de transmisión de 18 dBm, mientras que el nivel de recepción registrado fue de -48 dBm, este valor de RX Level indicó que el site recibía la señal proveniente del extremo del cliente con un nivel adecuado para la operación del enlace. Además, se registró un valor de Modem MSE de -38.95 dB y ausencia de bloques defectuosos, lo que permitió confirmar la estabilidad de la comunicación durante la validación.

Configuración de frecuencias y validación de nivel de recepción del radioenlace en el lado cliente

En el extremo del cliente se realizó la verificación de los parámetros operativos del radioenlace mediante la interfaz de gestión del equipo Ceragon. En la

pantalla de monitoreo se observa que la interfaz de radio se encuentra en estado Up, lo cual confirma que el enlace se encuentra activo y operativo desde el lado remoto.

Respecto a la configuración de frecuencias, en el lado cliente se registra una frecuencia de transmisión de 21.931 GHz y una frecuencia de recepción de 23.163 GHz. Asimismo, se asignó un nivel de transmisión de 19 dBm y se validó un nivel de recepción de -49 dBm, este valor de RX Level indica que el radio del cliente recibe adecuadamente la señal proveniente del *site*, manteniendo condiciones aceptables para la operación del enlace. De igual manera, se observa un valor de Modem MSE de -39.05 dB y un registro de 0 bloques defectuosos, lo cual evidencia un funcionamiento estable durante la validación.

Radio Parameters	
Status Parameters	
Radio Location	Radio: Slot 2, Port 1
Type	RFU-N-SC
XPIC support	No
Radio Interface operational status	Up
Operational TX Level (dBm)	19
RX Level (dBm)	-49
Modem MSE (dB)	-39.05
Defective Blocks	0 Clear Counter
TX Mute Status	Off
Adaptive TX power operational status	Down
Frequency control (Local)	
TX Frequency (MHz)	21931.000 (21780.000 ... 22400.000)
RX Frequency (MHz)	23163.000 (23000.000 ... 23600.000)
Frequency Separation (MHz)	1232.000
☐ Set also remote unit	
Configuration Parameters	
TX Level (dBm)	19 (-1 ... 20)

Figura 37 **Parámetros de Rx en lado Cliente.** Fuente: Elaboración propia.

Configuración de IP, VLAN y licencias:

Se realizó la configuración de gestión del radioenlace en ambos extremos del sistema. En el lado del *site* se asignó la dirección IPv4 10.116.75.154, mientras que en el lado del cliente se configuró la dirección IPv4 10.116.75.155, ambos equipos Ceragon fueron configurados con máscara de subred 255.255.255.248 y puerta de enlace predeterminada 10.116.75.153. Esta configuración permitió integrar los radios a la red de gestión del operador,

facilitando el acceso remoto para monitoreo, validación de parámetros operativos y mantenimiento del enlace microondas.

Local Networking Configuration

IP Family Configuration

IP address Family **IPv4**

Apply

Description: local-management-port

IPv4 Address: 10.116.75.154

IPv4 Subnet Mask: 255.255.255.248

IPv4 Default Gateway: 10.116.75.153

IPv6 Address: fec0::c0:a8:1:1

IPv6 Prefix Length: 120 (1 ... 128)

IPv6 Default Gateway: ::

Apply

Figura 38 Configuración de IP lado site. Fuente: Elaboración propia.

Local Networking Configuration

IP Family Configuration

IP address Family **IPv4**

Apply

Description: local-management-port

IPv4 Address: 10.116.75.155

IPv4 Subnet Mask: 255.255.255.248

IPv4 Default Gateway: 10.116.75.153

IPv6 Address: fec0::c0:a8:1:1

IPv6 Prefix Length: 120 (1 ... 128)

IPv6 Default Gateway: ::

Apply

Figura 39 Configuración de IP lado Cliente. Fuente: Elaboración propia.

Ethernet Service Points (Service ID - 2)

<< Back to Services table

Select Service Point Attribute

☒ General

☐ Ingress

☐ Egress

▼ Ethernet Service Points - General SP Attributes

Service point ID	Service point name	Service point type	Interface location	Attached interface type	C-Vlan encapsulation	S-Vlan encapsulation
1	N.A.	SAP	Ethernet Slot 1, Port 1	dot1q	2061	N.A.
2	N.A.	SNP	Radio Slot 2, Port 1	dot1q	2061	N.A.

Add Edit Delete Attached VLAN

Figura 40 Configuración de VLAN de servicio lado site. Fuente: Elaboración propia.

Ethernet Service Points (Service ID - 2)

<< Back to Services table

Select Service Point Attribute

☒ General
☐ Ingress
☐ Egress

▼ Ethernet Service Points - General SP Attributes

Service point ID	Service point name	Service point type	Interface location	Attached interface type	C-Vlan encapsulation	S-Vlan encapsulation
1	N.A.	SAP	Ethernet: Slot 1, Port 2	dot1q	2061	N.A.
2	N.A.	SNP	Radio: Slot 2, Port 1	dot1q	2061	N.A.

Add Edit Delete Attached VLAN

Figura 41 Configuración de VLAN de servicio lado Cliente. Fuente: Elaboración propia.

Luego de configurar los parámetros de gestión de las radios, se instalaron las licencias de ancho de banda en los equipos Ceragon ubicados en ambos extremos del enlace. Para esta actividad, se verificó previamente el número de serie de cada radio, tanto en el lado del *site* como en el lado del cliente, debido a que las licencias se encuentran asociadas al serial del equipo correspondiente, se cargó la clave de licencia en la sección de activación de cada radio, permitiendo habilitar la capacidad de transmisión requerida para el servicio.

Con ello, el radioenlace quedó autorizado para operar con el ancho de banda definido en el diseño, quedando listo para las pruebas de tráfico, validación de conectividad y puesta en servicio.

Activation Key Configuration

Activation Key - Status Parameters

Type: Normal

Validation number: 2812469B07011C071E056835

Date code: 29-05-2019,06:27:01

Violation runtime counter (hours): 48

Sanction state: No

Activation Key Configuration

40581VTP39P9TROJ37D5T4AU843J131G1V5HSE7QP9VTS04453JFT3JUVMI1IF2E8J
FJ6SLM2KJLQ5VAA2805J7LL58GAPPTB60M5BFCCHTMA8VCR7V37V4IOQL71IOL6AJ

Demo Mode Configuration

Demo admin: Disable ▼

Demo timer (hours): 1440

Apply

Figura 42 Instalación de licencias en lado Site. Fuente: Elaboración propia.

Activation Key Configuration

Activation Key - Status Parameters

Type: Normal

Validation number: BAD1035072011C061C046835

Date code: 29-05-2019,06:27:39

Violation runtime counter (hours): 48

Sanction state: No

Activation Key Configuration

5248MPT088DPJN8590UGQN240JUE15M0JLHQ3ED5PLBUQ9H68759QRG8JIM3DD4LM8
AVKCMIGQ48RONAT618EAV175Q7MNE9PV17AV25UUKP36IJL45MSHLQF58NM39JM6R

Demo Mode Configuration

Demo admin: Disable

Demo timer (hours): 1440

Apply

Figura 43 Instalación de licencias en lado Cliente. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 2 se resumen las principales pruebas ejecutadas y los resultados obtenidos durante la validación del enlace:

Tabla 2 Pruebas de validación del radioenlace entre el site TC5844 Baños del Inca – Cliente.

N.º	Prueba de validación	Parámetro verificado	Resultado obtenido	Criterio de aceptación	Estado
1	Verificación del estado de la interfaz de radio	Estado operativo del radioenlace	La interfaz de radio se encontró en estado Up	La interfaz debe encontrarse activa y operativa	Conforme
2	Validación de potencia de transmisión	Potencia TX configurada	18 dBm	La potencia debe corresponder a la configuración técnica asignada al enlace	Conforme
3	Validación del nivel de recepción	RX Level	-48 dBm	El nivel de recepción debe permitir una operación estable del enlace	Conforme
4	Verificación de calidad de señal	Modem MSE	-38.95 dB	El valor debe evidenciar una condición adecuada de modulación y estabilidad	Conforme
5	Revisión de errores de transmisión	Bloques defectuosos	No se registraron bloques defectuosos	No deben presentarse errores que afecten la comunicación	Conforme

6	Validación de frecuencia de transmisión	Frecuencia TX del site	23.163 GHz	Debe coincidir con la frecuencia asignada para el enlace	Conforme
7	Validación de frecuencia de recepción	Frecuencia RX del site	21.931 GHz	Debe coincidir con la frecuencia asignada para el enlace	Conforme
8	Validación general del enlace	Operatividad del radioenlace	El enlace se encontró operativo a nivel de radiofrecuencia	El enlace debe mantenerse activo, estable y sin errores durante la revisión	Conforme

Fuente: Elaboración propia

III.6 Resultado de la actividad

Como resultado de la actividad desarrollada, se diseñó e implementó un sistema híbrido de comunicaciones para brindar el servicio de Internet corporativo a un cliente ubicado en Cajamarca, esta solución permitió superar la limitación inicial generada por la falta de infraestructura de fibra óptica externa disponible en la zona, mediante la implementación de un enlace microondas punto a punto desde el site del operador hasta las instalaciones del cliente.

Además, se complementó la solución con un tramo de fibra óptica interna dentro del local del cliente, debido a que la distancia entre el CPE y los equipos de comunicación era mayor a 100 metros. Esta medida permitió asegurar una transmisión estable y adecuada para la entrega del servicio.

Durante las pruebas de operación del enlace, se comprobó que la señal recibida en ambos extremos se encontraba dentro del rango previsto. En el *site* se registró un nivel aproximado de -48 dBm, mientras que en el local del cliente se obtuvo un valor cercano a -49 dBm, estos resultados indicaron que el apuntamiento de las antenas fue adecuado y que el radioenlace presentó un funcionamiento estable. Posteriormente, el cliente validó la correcta entrega del servicio mediante la firma de las actas de instalación correspondientes.

CAPITULO IV: DISCUSION DE RESULTADOS

IV.1 Descripción de la implementación

La implementación del sistema híbrido de comunicaciones permitió brindar el servicio de Internet corporativo a un cliente ubicado en Cajamarca. Para ello, se utilizó una solución formada por un enlace microondas punto a punto y un tramo de fibra óptica interna dentro del local del cliente, debido a que la distancia entre el CPE del cliente y los equipos de comunicación era mayor a 100 metros.

Esta solución fue elegida porque la zona no contaba con fibra óptica externa disponible para una instalación directa. Implementar una nueva ruta de fibra habría requerido más tiempo, permisos, obras civiles y mayores costos. Luego del análisis técnico, se seleccionó el *site* TC5844 Baños del Inca como punto de origen del enlace, debido a su cercanía con el cliente y a que permitía establecer una comunicación inalámbrica viable. En ambos extremos se instalaron radios Ceragon FiberAir IP-20S y antenas *Radio Frequency Systems* de 0.3 m, que trabajaron en la banda de 23 GHz.

En el lado del *site*, el radioenlace se instaló sobre una estructura tipo monopolo, en el local del cliente, se utilizó una torre ventada liviana existente, en ambos puntos se colocaron los soportes metálicos, antenas, equipos *outdoor* y cables necesarios, también se protegieron los conectores con silicona, se ordenó el cableado con tubería corrugada, se realizó la puesta a tierra y se etiquetaron los cables para facilitar su identificación.

Como la antena del cliente se encontraba aproximadamente a 180 metros del ambiente donde se instalaron los equipos CPE, se tendió un tramo de fibra

óptica interna para llevar la señal hasta el gabinete de comunicaciones. En el lado del site, se instaló un cable UTP de 40 metros para conectar el radio con los equipos de red.

Dentro del local del cliente se instalaron los equipos de comunicación, como el router, la fuente de alimentación, los módulos ópticos y los *patch cords* de fibra, se usaron módulos SFP Finisar de 1310 nm, los cuales permitieron conectar la fibra óptica interna con los equipos de red del cliente; después, se configuraron los radios: en el lado del site se asignó la IP de gestión 10.116.75.154/29 y en el lado del cliente se configuró la IP 10.116.75.155/29. Ambas usaron como puerta de enlace la IP 10.116.75.153, esta configuración permitió que los equipos pudieran ser monitoreados y administrados de forma remota por el operador.

Para validar el funcionamiento del enlace, se revisaron los niveles de recepción en ambos extremos. En el lado del site se obtuvo un nivel aproximado de -48 dBm, mientras que en el lado del cliente se registró un nivel aproximado de -49 dBm, estos niveles de recepción obtenidos presentan una diferencia de aproximadamente 4 a 5 dB respecto al valor teórico calculado en el presupuesto de enlace (-44.39 dBm). Esta diferencia es consistente con lo esperado en la práctica, ya que el modelo teórico no contempla la totalidad de las pérdidas reales del sistema, tales como el desalineamiento inicial de las antenas, pérdidas adicionales por conectores, condiciones atmosféricas del entorno y la atenuación por vegetación densa presente en el trayecto, factor contemplado en la recomendación ITU-R P.833 (ITU, 2021).

De manera complementaria, al comparar el umbral de recepción con los niveles medidos en campo, se obtuvo un margen operativo de 41 dB en el lado del site y de 40 dB en el lado del cliente, estos valores evidencian que el enlace cuenta con una reserva de señal adecuada frente a posibles pérdidas adicionales ocasionadas por variaciones atmosféricas, vegetación, conectores, desalineamiento o condiciones propias del trayecto radioeléctrico.

Además, los niveles obtenidos se encuentran dentro del rango operativo del equipo Ceragon FibeAir IP-20S y son suficientes para garantizar una operación estable del enlace, lo que se confirmó con la ausencia de bloques defectuosos, el estado Up en la interfaz de radio y los valores de Modem MSE registrados, de -38.95 dB en el site y -39.05 dB en el cliente.

Finalmente, se consideró la configuración del servicio de Internet mediante la VLAN 2051, con estas actividades el sistema quedó energizado, operativo, gestionable y listo para las pruebas finales de conectividad y puesta en servicio.

IV.2 Evaluación Económica

Para evaluar la viabilidad económica de la solución implementada, se consideraron los costos asociados a los materiales, equipos y servicios requeridos para la habilitación del sistema híbrido de comunicaciones, este análisis permitió determinar la inversión necesaria para la instalación del enlace microondas punto a punto, el tramo de fibra óptica interna y los equipos de comunicación utilizados en la puesta en servicio.

De acuerdo con el presupuesto de materiales y servicios, la implementación consideró radios Ceragon FiberAir IP-20S, antenas para la banda de 23 GHz, router de acceso, módulo SFP, fuente de alimentación, gabinete, cables de fibra óptica, *jumpers*, *pigtails*, adaptadores y accesorios de montaje. Igualmente, se incluyeron los servicios de instalación de planta externa, instalación de planta interna microondas, diseño PEXT y mantenimiento de la torre ventada.

El costo total estimado de la implementación, como se muestra en la tabla 3, ascendió a S/ 38,375.12; dentro de este monto, los mayores costos correspondieron a las actividades de instalación de torre ventada y habilitación de planta interna microondas, debido a que estas labores involucraron trabajos en altura, montaje de equipos, adecuación de infraestructura y

validación técnica del enlace.

Tabla 3 Detalle de materiales, equipos y servicios invertidos en la instalación del servicio.

Tipo	Texto breve de material y/o servicio	Costo en Soles
Servicios	INSTALACIÓN DE TORRE VENTADA	15,645.00
Servicios	SERVICIO DE INSTALACION DEL ENLACE MICROONDAS	8,900.00
Equipos	RADIO FIBEAIR IP-20S-23-NOESPECIF-H-ESS	2,473.43
Equipos	RADIO FIBEAIR IIP-20S-23-NOESPECIF-L-ESS	2,472.17
Equipos	ANTENA SB1-220CIPN FIBERAIR AM-1-23-R	2,006.36
Equipos	MODULO SFP 1310NM 1250MB/S 10KM	145.17
Equipos	ROUTER AR161F 1GECOMBWAN 4GELAN 50010197	946.12
Equipos	FUENTE RS-150 AC/DC 150W 48VDC	-
Servicios	SERVICIO DE TENDIDO DE FIBRA OPTICA EN LOCAL DEL CLIENTE	4,369.77
Materiales	CABLE ADSS 4000N (69186) 12 HILOS F.O.SM	553.96
Materiales	GABINETE 0.36X0.42X0.362X0.36	363.64
Materiales	CABLE PIGTAIL SC/UPC MONOMODO 2M	103.7
Materiales	JUMPER SM SC/UPC-LC/UPC 12M 2MM DUPLEX	99.59
Materiales	CABLE JUMPER LC/SC SM 3M SIMPLEX2MM	81.94
Materiales	CABLE JUMPER SM SC/LC 05MTS 2MM DUPLEX	80.17
Materiales	CAJA DE MONTAJE DE FO P/6	68.41
Materiales	ADAPTADOR PATCH CMDBUSCBL DUPLEX	65.69
Total		38,375.12

Fuente: Elaboración propia

Desde el punto de vista económico, la solución implementada resultó conveniente porque evitó la construcción de una nueva ruta de fibra óptica externa hasta el cliente, esta alternativa habría requerido mayores costos por obras civiles, permisos, tendido de cableado externo y mayor tiempo de ejecución. En cambio, la activación del servicio mediante microondas permitió habilitar la conectividad en un plazo más corto, esto permitió iniciar la facturación del servicio en menor tiempo y generar ingresos para el operador de manera más temprana.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

La solución híbrida basada en radioenlace microondas y fibra óptica interna resolvió la principal limitación identificada en el proyecto: la falta de infraestructura de fibra óptica externa disponible para atender directamente al cliente. Se concluyó que esta alternativa fue adecuada para brindar el servicio de Internet corporativo en un menor plazo, sin depender de obras civiles externas ni de la construcción de una nueva ruta de fibra óptica.

La selección del site TC5844 Baños del Inca como punto de origen del enlace fue técnicamente adecuada, ya que se estableció una trayectoria radioeléctrica viable hacia el local del cliente: la verificación de línea de vista, el análisis de la zona de Fresnel y el cálculo de propagación confirmaron que el enlace podía operar con niveles adecuados de recepción y estabilidad.

La instalación de la antena en la torre ventada del cliente permitió superar las restricciones generadas por la vegetación y las condiciones del entorno. El uso de un tramo de fibra óptica interna de 180 metros fue necesario para conectar el punto de instalación del radioenlace con el gabinete de comunicaciones, asegurando la continuidad física del servicio hasta los equipos CPE.

Durante la validación del servicio, se comprobó que el radioenlace quedó operativo, estable y gestionable desde la red del operador, lo cual permitió confirmar la correcta puesta en marcha de la solución y su aceptación por parte del cliente.

La solución resultó técnica y económicamente conveniente, ya que

aprovechó infraestructura existente, como los puertos disponibles en el site, lo que permitió estimar un ahorro económico aproximado del 35 % respecto a una solución basada únicamente en fibra óptica externa, y una reducción de aproximadamente el 25 % en el tiempo de ejecución frente a dicha alternativa, al eliminar actividades de permisos municipales, canalización y tendido externo. Esto favoreció la atención oportuna del cliente y el inicio temprano de la facturación del servicio.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

Para futuras implementaciones en zonas sin fibra óptica externa disponible, se recomienda evaluar soluciones híbridas basadas en radioenlace microondas y fibra óptica interna, ya que permiten reducir tiempos de despliegue, aprovechar infraestructura existente y entregar servicios corporativos de manera más rápida y eficiente.

Se recomienda realizar un Technical Site Survey (TSS) detallado antes de definir el site de origen y la solución de acceso, considerando coordenadas, altitud, condiciones del terreno, disponibilidad de energía e infraestructura existente. Debe verificarse la línea de vista directa y el despeje de la primera zona de Fresnel —especialmente en zonas con vegetación alta o relieve irregular—, considerando el factor K, y validar el cálculo de propagación mediante herramientas especializadas (frecuencia, distancia, altura de antenas, pérdidas y margen de desvanecimiento).

Durante la instalación outdoor, se recomienda asegurar correctamente las antenas mediante soportes, abrazaderas y pernería adecuada —protegidos con grasa anticorrosiva—, sellar los conectores expuestos para evitar el ingreso de humedad o polvo, y emplear fibra óptica interna cuando la distancia entre la torre y el ambiente técnico lo requiera, canalizando el cableado y etiquetando equipos, cables y puertos.

Se recomienda mantener habilitada la gestión remota de los radios mediante direcciones IP correctamente configuradas, para supervisar el estado del enlace, los niveles de recepción, las alarmas y la disponibilidad del servicio, y realizar tras la instalación pruebas de validación (estado del radio, niveles de

recepción, conectividad IP, pruebas de tráfico y verificación de VLAN).

Se recomienda realizar inspecciones periódicas de antenas, soportes, conectores, cableado, puesta a tierra y gabinete de comunicaciones, y monitorear los niveles de recepción del enlace; ante variaciones significativas, revisar la alineación de antenas, el estado de los conectores, el crecimiento de vegetación o posibles interferencias, con el fin de sostener en el tiempo el ahorro económico y la reducción de tiempos logrados.

CAPÍTULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Agrawal, G. P. (2010). *Fiber-optic communication systems* (4.^a ed.). Wiley.

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

Banco Central de Reserva del Perú. (2025). *Caracterización del departamento de Cajamarca*.
<https://www.bcrp.gob.pe/docs/Sucursales/Trujillo/Cajamarca-Caracterizacion.pdf>

Bonifaz Fernández, J. L. (2025). *Evaluación de impacto de los proyectos de telecomunicaciones, relacionados con el acceso a internet de banda ancha en Perú* (2.^a ed., Documento de Trabajo N.º 3). Agencia de Promoción de la Inversión Privada - ProInversión.
<https://www.investinperu.pe/publicaciones/evaluacion-de-impacto-de-los-proyectos-de-telecomunicaciones-relacionados-con-el-acceso-a-internet-de-banda-ancha-en-peru/>

Ceragon Networks. (s. f.). *FibeAir IP-20S*.
<https://www.ceragon.com/products/fibeair-ip-20s>

Cheng, D. K. (1989). *Field and wave electromagnetics* (2.^a ed.). Addison-Wesley.

Claro Perú. (s. f.). *Sobre nosotros*. América Móvil Perú S.A.C.
<https://www.claro.com.pe/institucional/sobre-nosotros/>

Díaz Vargas, R. E. (2015). *Diseño de radioenlace microondas isla San Lorenzo-Campus PUCP para el proyecto Perú Magneto* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/7038>

Flores Pacaya, C., & Gonzales Rodríguez, D. P. (2019). *Propuesta para la implementación de servicio de internet mediante enlace microondas en la institución educativa primaria secundaria de menores 60094 del*

centro poblado de Zungarococha del distrito de San Juan Bautista para el año 2019 [Tesis de licenciatura, Universidad Científica del Perú]. Repositorio Institucional UCP.
<http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/20.500.14503/927>

Forouzan, B. A. (2013). *Data communications and networking* (5.^a ed.). McGraw-Hill.

Ghazisaidi, N., & Maier, M. (2011). Fiber-wireless (FiWi) access networks: Challenges and opportunities. *IEEE Network*, 25(1), 36–42.
<https://doi.org/10.1109/MNET.2011.5687951>

Goldsmith, A. (2005). *Wireless communications*. Cambridge University Press.

Google. (s. f.). *Google Earth* [Software]. <https://earth.google.com/>

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2019). *IEEE standard letter designations for radar-frequency bands (IEEE Std 521-2019)*. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.8999849>

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2022). *IEEE standard for Ethernet (IEEE Std 802.3-2022)*. IEEE.
<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9844436>

International Telecommunication Union. (2002). *Recommendation ITU-T G.826: End-to-end error performance parameters and objectives for international, constant bit-rate digital paths and connections*.
<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.826>

International Telecommunication Union. (2005a). *Recommendation ITU-R F.1703-0: Availability objectives for real digital fixed wireless links used in 27 500 km hypothetical reference paths and connections*.
<https://www.itu.int/rec/R-REC-F.1703>

International Telecommunication Union. (2005b). *Recommendation ITU-R P.838-3: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838>

International Telecommunication Union. (2008). *Recommendation ITU-T E.800: Definitions of terms related to quality of service*.
<https://www.itu.int/rec/T-REC-E.800>

International Telecommunication Union. (2011). *Recommendation ITU-T*

Y.1541: Network performance objectives for IP-based services.
<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541>

International Telecommunication Union. (2015). *Recommendation ITU-R V.431-8: Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications.* <https://www.itu.int/rec/R-REC-V.431>

International Telecommunication Union. (2017). *Recommendation ITU-T G.650.3: Test methods for installed single-mode optical fibre cable links.* <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.650.3>

International Telecommunication Union. (2019). *Recommendation ITU-T Y.1540: Internet protocol data communication service - IP packet transfer and availability performance parameters.*
<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1540>

International Telecommunication Union. (2021). *Recommendation ITU-R P.833-10: Attenuation in vegetation.* <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.833>

International Telecommunication Union. (2022). *Recommendation ITU-R P.676-13: Attenuation by atmospheric gases and related effects.*
<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676>

International Telecommunication Union. (2024a). *Radio Regulations: Edition of 2024.* <https://www.itu.int/hub/publication/r-reg-rr-2024/>

International Telecommunication Union. (2024b). *Recommendation ITU-T G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable.*
<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652>

International Telecommunication Union. (2024c). *Recommendation ITU-T G.657: Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable.* <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657>

International Telecommunication Union. (2025a). *Recommendation ITU-R P.526-16: Propagation by diffraction.* <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526>

International Telecommunication Union. (2025b). *Recommendation ITU-R P.530-19: Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.* <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.530>

International Telecommunication Union. (2025c). *Recommendation ITU-R P.837-8: Characteristics of precipitation for propagation modelling*. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.837>

Keiser, G. (2010). *Optical fiber communications* (4.^a ed.). McGraw-Hill.

Lehpamer, H. (2010). *Microwave transmission networks: Planning, design, and deployment* (2.^a ed.). McGraw-Hill.

LigoWave. (s. f.). *LinkCalc* [Software]. <https://www.ligowave.com/linkcalc>

López Polo, E. D. (2016). *Diseño de una red de fibra óptica para la implementación en el servicio de banda ancha en Coishco (Ancash)* [Tesis de licenciatura, Universidad de Ciencias y Humanidades]. Repositorio Institucional UCH. <http://repositorio.uch.edu.pe/handle/uch/47>

Ministerio de Economía y Finanzas. (2025, 2 de septiembre). *Titular del MEF: Vamos a desarrollar en Cajamarca una cartera priorizada de proyectos por más de US\$ 19 000 millones*. Plataforma del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/mef/noticias/1238427-titular-del-mef-vamos-a-desarrollar-en-cajamarca-una-cartera-priorizada-de-proyectos-por-mas-de-us-19-000-millones>

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2023). *Plan Nacional de Atribución de Frecuencias - PNAF*. Plataforma del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/4243339-0597-2023-mtc-01-03>

National Telecommunications and Information Administration. (2003, 1 de octubre). *U.S. Frequency Allocation Chart as of October 2003*. U.S. Department of Commerce. <https://www.ntia.gov/other-publication/2003/us-frequency-allocation-chart-october-2003>

Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones. (2021). *Instructivos técnicos para la medición y cálculo de los indicadores y parámetros del servicio de acceso a Internet*. <https://www.osiptel.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/1/par/instructivos-tecnicos-medicion-calculo-indicadores-parametros/instructivos-tecnicos.pdf>

Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones. (2024). *Problemas de acceso a la infraestructura existente y trámites*

municipales son los principales obstáculos para el avance de fibra óptica.

<https://www.osiptel.gob.pe/repositorioaps/data/1/1/1/par/obstaculos-fibra-optica-2024/informe-obstaculos-fibra-optica.pdf>

Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones. (2025). *Informe N.° 000280-2025-DPRC/OSIPTEL*.
<https://www.osiptel.gob.pe/media/uareffhf/informe280-2025-dprc.pdf>

Pozar, D. M. (2012). *Microwave engineering* (4.^a ed.). Wiley.

Quintana López, S. L. (2022). *Análisis de costos de infraestructura de la banda ancha de fibra óptica en telecomunicaciones del Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería.
<https://renati.sunedu.gob.pe/item/019db3a4-827f-75ae-913d-247274c0102e>

Radio Frequency Systems. (s. f.). *CompactLine microwave antennas*.
<https://www.rfsworld.com/>

Rappaport, T. S. (2002). *Wireless communications: Principles and practice* (2.^a ed.). Prentice Hall.

Roca Liñán, A. J. (2019). *Diseño de un enlace microondas para el monitoreo y atención de pacientes con tos ferina entre el Hospital Mama Ashu y el Hospital Papá Carletto en la Región Áncash, Perú* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur]. Repositorio Institucional UNTELS.
<https://repositorio.untels.edu.pe/xmlui/handle/123456789/349>

Salema, C. (2003). *Microwave radio links: From theory to design*. Wiley.

Saunders, S. R., & Aragón-Zavala, A. (2007). *Antennas and propagation for wireless communication systems* (2.^a ed.). Wiley.

Stallings, W. (2014). *Data and computer communications* (10.^a ed.). Pearson.
 Tanenbaum, A. S., & Wetherall, D. J. (2011). *Computer networks* (5.^a ed.). Pearson.

CAPÍTULO VIII: ANEXOS

Anexo A

Ficha técnica de ODU (*Outdoor Unit* o Unidad Exterior) Ceragon IP20S

CERAGON	
Radio Supported Frequency Range 6-42 GHz Radio Configurations 1+0, 1+1, 2+0 SP or DP (No XPIC) Radio Features Protection: 1+1 HSB High spectral utilization: QPSK to 2048 QAM w/ACM Advanced Frequency Reuse (AFR) (Tail Site) Ethernet Ethernet Interfaces Traffic Interfaces – 1 x 10/100/1000Base-T (RJ-45) and 2x1000Base-X (Optical SFP) or 10/100/1000Base-T (Electrical SFP) Management Interface - 1 x 10/100 Base-T (RJ-45) SFP Types - Optical 1000Base-LX (1310 nm) or SX (850 nm) Note: SFP devices must be of industrial grade (-40°C to +85°C) Ethernet Features MTU – 9600 Bytes Quality of Service - Multiple Classification criteria (VLAN ID, P-bits, IPv4 DSCP, IPv6 TC, MPLS EXP) 8 priority queues per port - Deep buffering (configurable up to 64 Mbit per queue) - WRED - P-bit marking/remarking 4K VLANs VLAN add/remove/translate Frame Cut Through – controlled latency and PDV for delay sensitive applications Header DeDuplication – Capacity boosting by eliminating inefficiency in all layers (L2,MPLS, L3,L4, Tunneling – GTP for LTE, GRE) Y.1731 Ethernet OAM Adaptive Bandwidth Notification ABN, also known as EOAM)	Synchronization Synchronization Distribution Sync Distribution over any traffic interface (GE/FE) SyncE (ITU-T G.8261, G.8262) SSM/ESMC Support for ring/mesh applications (ITU-T G.8264) SyncE Regenerator mode, providing PRC grade (ITU-T G.811) performance for smart pipe applications. IEEE-1588 Optimized Transport for reduced PDV IEEE-1588 TC Standards MEF Carrier Ethernet 2.0 (CE 2.0) Supported Ethernet Standards 10/100/1000base-T/X (IEEE 802.3) Ethernet VLANs (IEEE 802.3ac) Virtual LAN (VLAN, IEEE 802.1Q) Class of service (IEEE 802.1p) Provider bridges (QinQ – IEEE 802.1ad) Link aggregation (IEEE 802.3ad) Auto MDI/MDIX for 1000baseT RFC 1349: IPv4 TOS RFC 2474: IPv4 DSCP RFC 2460: IPv6 Traffic Classes Security Radio Encryption – AES 256 Secured protocols: - HTTPS - SNMPv3 - SSH - SFTP RADIUS authentication and authorization

Figura A1 Especificaciones técnicas del equipo de radio Ceragon Fuente: Ceragon Networks Ltd. (s.f.). Hoja de especificaciones técnicas.



Standards Compliance

Radio Spectral Efficiency: EN 302 217-2-2

EMC: EN 301 489-1, EN 301 489-4, Class B (Europe), FCC 47 CFR, part 15, class B (US), ICES-003, Class B (Canada), TEC/EMI/TEL-001/01, Class B (India)

Surge: EN61000-4-5, Class 4 (for PWR and ETH1/PoE ports)

Safety: EN 60950-1, IEC 60950-1, UL 60950-1, CSA-C22.2 No.60950-1, EN 60950-22, UL 60950-22, CSA C22.2.60950-22

Storage: ETSI EN 300 019-1-1 Class 1.2

Transportation: ETSI EN 300 019-1-2 Class 2.

Technical Specifications

Mechanical Specifications

Dimensions – 230mm(H), 233mm(W), 98mm(D), 6kg

Pole Diameter Range (for Remote Mount Installation) – 8.89 cm – 11.43 cm

Environmental Specifications

-33°C to +55°C (-45°C to +60°C extended)

Power Input Specifications

Standard Input: -48 VDC

DC Input range: -40 to -60 VDC

Power Consumption Specifications

Maximum Power Consumption (1+0 Operation) – 6-11 GHz: 35W; 13-42 GHz: 42W

PoE Injector Mechanical Specifications

Dimensions – 134mm(H), 190mm(W), 62mm(D), 1 kg

PoE Injector Environmental Specifications

33°C to +55°C (-45°C to +60°C extended)

PoE Injector Power Input Specifications

Standard Input: -48 or +24 VDC (Optional)

DC Input range: $\pm(18/40.5 \text{ to } 60)$ VDC (+18VDC extended range is supported as part of the nominal +24VDC support)

PoE Injector Interfaces

GbE Data Port supporting 10/100/1000Base-T

Power-Over-Ethernet (PoE) Port

DC Power Port -40V to -60V (a PoE supporting two redundant DC feeds each supporting $\pm(18-60)$ V is available)

Product Images

IP-20S



Figura A2 Especificaciones técnicas del equipo de radio Ceragon Fuente: Ceragon Networks Ltd. (s.f.). Hoja de especificaciones técnicas.



Radio Specifications

Capacity

Notes: For full specifications, please contact your Ceragon sales representative.

	Capacity (Mbps)	Capacity De-Dup	Capacity (Mbps)	Capacity De-Dup	Capacity (Mbps)	Capacity De-Dup
Modulation	3.5 MHz		7 MHz		14 MHz	
QPSK	3-4	4-13	8-10	9-32	19-24	20-74
8 PSK	-	-	13-16	13-48	29-36	31-112
16 QAM	8-10	9-32	18-22	19-69	40-49	42-153
32 QAM	11-14	12-43	24-30	26-92	53-65	56-203
64 QAM	14-17	15-54	30-37	32-114	66-80	69-249
128 QAM	17-21	18-65	36-44	38-137	79-97	83-301
256 QAM	19-24	20-74	42-51	44-158	90-110	95-344
512 QAM	-	-	45-54	47-169	100-122	105-380
1024 QAM Strong	-	-	48-58	50-182	106-129	111-402
1024 QAM Light	-	-	51-62	53-194	112-137	118-426
Modulation	28 MHz		40 MHz		56 MHz	
QPSK	43-52	45-162	58-71	61-220	87-106	91-331
8 PSK	62-76	65-236	86-105	90-328	127-155	133-482
16 QAM	87-107	92-332	117-143	123-446	176-215	185-670
32 QAM	115-140	121-437	154-189	162-588	232-283	243-881
64 QAM	141-173	149-538	190-232	199-722	284-348	299-1000
128 QAM	170-208	179-648	229-280	241-873	344-420	361-1000
256 QAM	196-239	206-745	247-302	259-939	397-485	416-1000
512 QAM	209-255	219-794	270-330	284-1000	426-521	448-1000
1024 QAM Strong	228-278	239-866	306-375	322-1000	464-567	487-1000
1024 QAM Light	241-295	253-917	325-398	342-1000	493-602	517-1000
2048 QAM	263-321	276-1000	352-430	370-1000	534-653	561-1000
	Capacity (Mbps)	Capacity De-Dup			Capacity (Mbps)	Capacity De-Dup
Modulation	80 MHz			Modulation	80 MHz	
QPSK	114-140	120-435		128 QAM	439-536	461-1000
8 PSK	162-198	170-618		256 QAM	505-618	531-1000
16 QAM	231-283	243-880		512 QAM	555-679	583-1000
32 QAM	304-371	319-1000		1024 QAM	604-738	634-1000
64 QAM	371-454	390-1000				

Transmit Power

Transmit Power (dBm)	Freq. (GHz)	6	7	8	10-11	13-15	18	23	24 UL	26	28-38	42
QPSK - 8 QAM	28	28	28	26	24	22	20	0	21	18	15	
16 QAM	28	27	27	26	23	21	20	0	20	17	14	
32-128 QAM	27	26	26	25	22	20	20	0	19	16	13	
256 QAM	27	26	24	25	20	20	18	0	17	14	11	
512 QAM	25	24	24	24	20	18	18	0	17	14	11	
1024 QAM	25	24	24	23	20	18	17	0	16	13	10	
2048 QAM	23	22	22	21	18	16	16	0	15	12	9	

Figura A3 Especificaciones de capacidad y potencia de transmisión del radioenlace
Ceragon Fuente: Ceragon Networks Ltd. (s.f.). Hoja de especificaciones técnicas.



Receiver Threshold (RSL) (dBm @ BER = 10⁻⁶)

Frequency (GHz)	6	7	8	10	11	13	15	18	23	24UL	26	28-31	32	38	42
3.5 MHz															
QPSK	-96.5	-96.0	-96.0	-95.5	-96.5	-95.5	-94.5	-96.0	-95.0	-94.5	-94.5	-94.5	-94.0	-94.0	-93.5
16 QAM	-90.0	-89.0	-89.0	-89.0	-89.5	-88.5	-88.0	-89.0	-88.0	-87.5	-88.0	-87.5	-87.5	-87.0	-86.5
32 QAM	-86.5	-85.5	-85.5	-85.5	-86.0	-85.0	-84.5	-85.5	-84.5	-84.0	-84.5	-84.0	-84.0	-83.5	-83.0
64 QAM	-83.0	-82.5	-82.5	-82.0	-83.0	-82.0	-81.0	-82.5	-81.5	-81.0	-81.0	-81.0	-80.5	-80.5	-80.0
128 QAM	-79.5	-79.0	-79.0	-78.5	-79.5	-78.5	-77.5	-79.0	-78.0	-77.5	-77.5	-77.5	-77.0	-77.0	-76.5
256 QAM	-76.5	-75.5	-75.5	-75.5	-76.5	-75.0	-74.5	-75.5	-75.0	-74.5	-74.5	-74.0	-74.0	-73.5	-73.0
7 MHz															
QPSK	-93.5	-93.0	-93.0	-92.5	-93.5	-92.5	-91.5	-93.0	-92.0	-91.5	-91.5	-91.5	-91.0	-91.0	-90.5
8 PSK	-87.5	-87.0	-87.0	-86.5	-87.5	-86.5	-85.5	-87.0	-86.0	-85.5	-85.5	-85.5	-85.0	-85.0	-84.5
16 QAM	-87.0	-86.5	-86.5	-86.0	-87.0	-86.0	-85.0	-86.5	-85.5	-85.0	-85.0	-85.0	-84.5	-84.5	-84.0
32 QAM	-83.5	-83.0	-83.0	-82.5	-83.5	-82.5	-81.5	-83.0	-82.0	-81.5	-81.5	-81.5	-81.0	-81.0	-80.5
64 QAM	-80.5	-80.0	-80.0	-79.5	-80.5	-79.5	-78.5	-80.0	-79.0	-78.5	-78.5	-78.5	-78.0	-78.0	-77.5
128 QAM	-77.5	-76.5	-76.5	-76.5	-77.5	-76.0	-75.5	-76.5	-76.0	-75.5	-75.5	-75.0	-75.0	-74.5	-74.0
256 QAM	-74.0	-73.5	-73.5	-73.0	-74.0	-73.0	-72.0	-73.5	-72.5	-72.0	-72.0	-72.0	-71.5	-71.5	-71.0
512 QAM	-72.0	-71.5	-71.5	-71.0	-72.0	-71.0	-70.0	-71.5	-70.5	-70.0	-70.0	-70.0	-69.5	-69.5	-69.0
1024 QAM Strong	-68.5	-68.0	-68.0	-67.5	-68.5	-67.5	-66.5	-68.0	-67.0	-66.5	-66.5	-66.5	-66.0	-66.0	-65.5
1024 QAM Light	-68.0	-67.0	-67.0	-67.0	-67.5	-66.5	-66.0	-67.0	-66.0	-65.5	-66.0	-65.5	-65.5	-65.0	-64.5
14 MHz															
QPSK	-90.5	-90.0	-90.0	-89.5	-90.5	-89.5	-88.5	-90.0	-89.0	-88.5	-88.5	-88.5	-88.0	-88.0	-87.5
8 PSK	-84.5	-84.0	-84.0	-83.5	-85.5	-83.5	-82.5	-84.0	-83.0	-82.5	-82.5	-82.5	-82.0	-82.0	-81.5
16 QAM	-83.5	-83.0	-83.0	-82.5	-83.5	-82.5	-81.5	-83.0	-82.0	-81.5	-81.5	-81.5	-81.0	-81.0	-80.5
32 QAM	-80.5	-79.5	-79.5	-79.5	-80.5	-79.0	-78.5	-79.5	-79.0	-78.5	-78.5	-78.0	-78.0	-77.5	-77.0
64 QAM	-77.5	-76.5	-76.5	-76.5	-77.0	-76.0	-75.5	-76.5	-76.0	-75.5	-75.5	-75.0	-75.0	-74.5	-74.0
128 QAM	-74.0	-73.5	-73.5	-73.0	-74.0	-73.0	-72.0	-73.5	-72.5	-72.0	-72.0	-72.0	-71.5	-71.5	-71.0
256 QAM	-71.5	-70.5	-70.5	-70.5	-71.0	-70.0	-69.5	-70.5	-69.5	-69.0	-69.5	-69.0	-69.0	-68.5	-68.0
512 QAM	-68.5	-68.0	-68.0	-67.5	-68.5	-67.5	-66.5	-68.0	-67.0	-66.5	-66.5	-66.5	-66.0	-66.0	-65.5
1024 QAM Strong	-65.5	-65.0	-65.0	-64.5	-65.5	-64.5	-63.5	-65.0	-64.0	-63.5	-63.5	-63.5	-63.0	-63.0	-62.5
1024 QAM Light	-65.0	-64.0	-64.0	-64.0	-64.5	-63.5	-63.0	-64.0	-63.5	-63.0	-63.0	-62.5	-62.5	-62.0	-61.5
28 MHz															
QPSK	-87.5	-87.0	-87.0	-86.5	-87.5	-86.5	-85.5	-87.0	-86.0	-85.5	-85.5	-85.5	-85.0	-85.0	-84.5
8 PSK	-83.0	-82.5	-82.5	-82.0	-83.0	-82.0	-81.0	-82.5	-81.5	-81.0	-81.0	-81.0	-80.5	-80.5	-80.0
16 QAM	-81.0	-80.5	-80.5	-80.0	-81.0	-79.5	-79.0	-80.5	-79.5	-79.0	-79.0	-79.0	-78.5	-78.0	-78.0
32 QAM	-77.5	-77.0	-77.0	-76.5	-77.5	-76.0	-75.5	-77.0	-76.0	-75.5	-75.5	-75.5	-75.0	-74.5	-74.5
64 QAM	-74.5	-74.0	-74.0	-73.5	-74.5	-73.0	-72.5	-74.0	-73.0	-72.5	-72.5	-72.5	-72.0	-71.5	-71.5
128 QAM	-71.5	-70.5	-70.5	-70.5	-71.0	-70.0	-69.5	-70.5	-69.5	-69.0	-69.5	-69.0	-69.0	-68.5	-68.0
256 QAM	-68.5	-67.5	-67.5	-67.5	-68.0	-67.0	-66.5	-67.5	-66.5	-66.0	-66.5	-66.0	-66.0	-65.5	-65.0
512 QAM	-66.0	-65.0	-65.0	-65.0	-66.0	-64.5	-64.0	-65.0	-64.5	-64.0	-64.0	-63.5	-63.5	-63.0	-62.5
1024 QAM Strong	-63.0	-62.5	-62.5	-62.0	-63.0	-61.5	-61.0	-62.5	-61.5	-61.0	-61.0	-61.0	-60.5	-60.0	-60.0
1024 QAM Light	-62.0	-61.5	-61.5	-61.0	-62.0	-60.5	-60.0	-61.5	-60.5	-60.0	-60.0	-60.0	-59.5	-59.0	-59.0
2048 QAM	-58.5	-58.0	-58.0	-57.5	-58.5	-57.0	-56.5	-58.0	-57.0	-56.5	-56.5	-56.5	-56.0	-55.5	-55.5

Figura A4 Umbral de recepción (RSL) del radioenlace Ceragon, con valores de sensibilidad (dBm @ BER = 10⁻⁶) según frecuencia, ancho de canal y tipo de modulación Fuente: Ceragon Networks Ltd. (s.f.). Hoja de especificaciones técnicas.

Anexo B

Instalación física y conexionado del equipo Ceragon FibeAir IP-20S

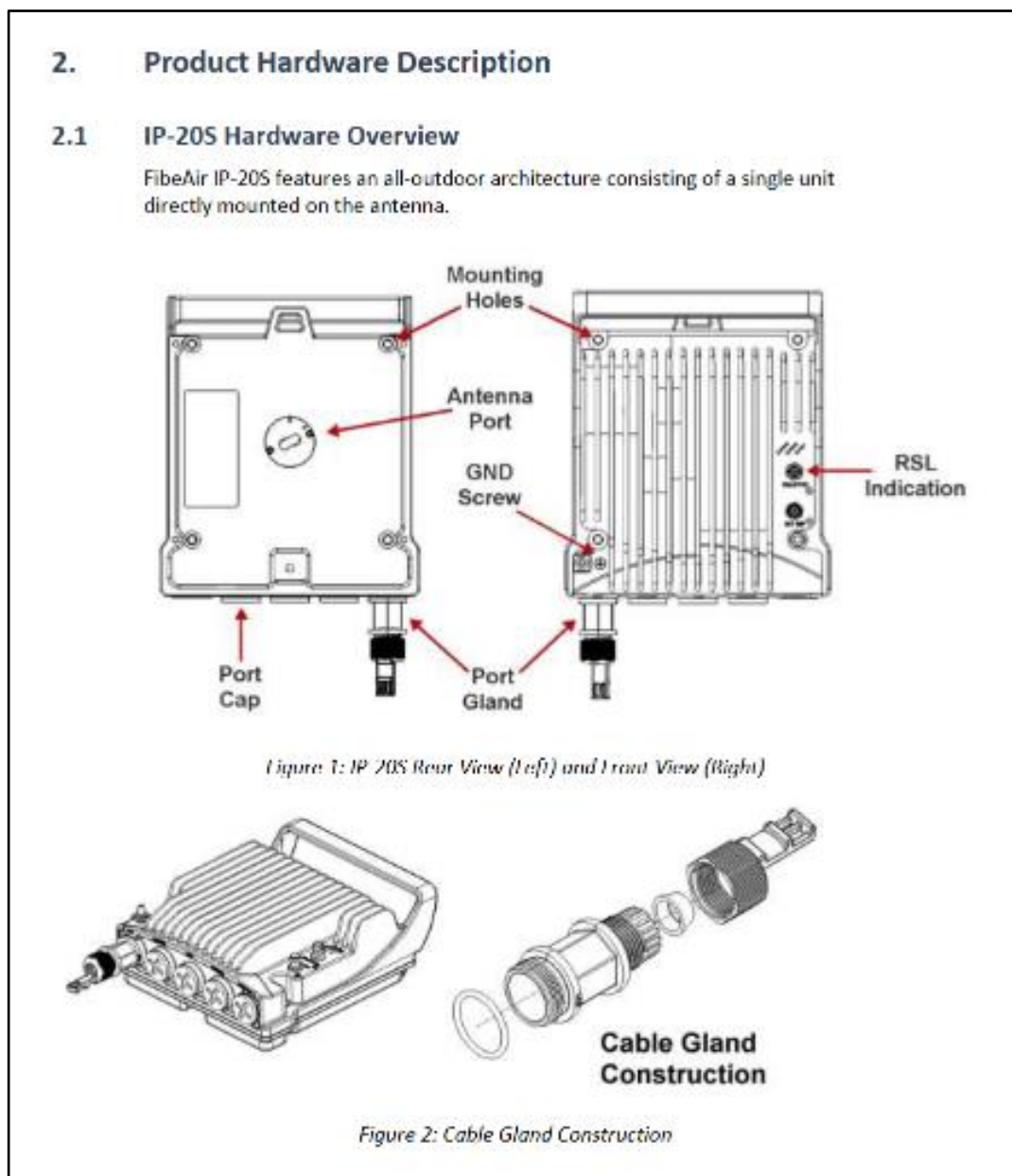


Figura B1 Descripción física del equipo Ceragon FibeAir IP-20S, con vista posterior y frontal de la unidad. Fuente: Ceragon Networks Ltd. (s.f.). Manual de instalación FibeAir IP-20S.

2.1.1 IP-20S Interfaces

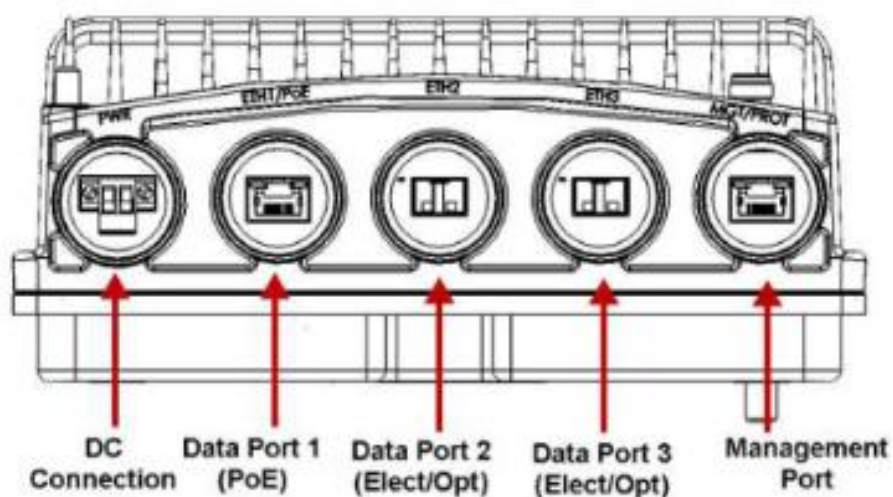


Figure 3: IP-20S Interfaces

- Data Port 1 for GbE traffic:
 - Electric: 10/100/1000Base-T. Supports PoE.
 - Optical: 1000Base-X (optional)
- Data Port 2 for GbE traffic:
 - Electric: 10/100/1000Base-T
 - Optical: 1000Base-X (optional)
- Data Port 3 for GbE traffic:
 - Electric: 10/100/1000Base-T
 - Optical: 1000Base-X (optional)
- Power interface (-48VDC)
- Management Port: 10/100Base-T
- 1 RF Interface – Standard interface per frequency band
- RSL interface: BNC connector
- Grounding screw

Figura B2 Interfaces del equipo Ceragon FibeAir IP-20S. Fuente: Ceragon Networks Ltd. (s.f.). Manual de instalación FibeAir IP-20S.

4. PoE Injector Installation and Connection

4.1 PoE Injector Cable Connection

The PoE Injector cables are connected similar to the IP-20S.

- To connect the Ethernet (CAT5E) cable to the PoE or Data port, refer to *Connection of Ethernet Cable to IP-20S* on page 46.
- To connect the DC power cable to the power port or dual feed port, refer to *Connecting a DC Power Cable* on page 39. This cable is not supplied with the PoE Injector.
- The total length of the cable between the IP-20S port and the Switch/Router the device is connected to should not exceed 100m/328ft. This length includes the connection between the IP-20S and the PoE Injector ($X1 + X2 \leq 100\text{m}/328\text{ft}$ in the figure below).

Note: The length of the cable connecting the customer equipment to the PoE injector should not be longer than 10m (according to ANSI/TIA 568 standard).



Note! For the warranty to be honored, the connection must be through the glands only. Do not open the PoE injector box cover.

Figura B3 Instalación y conexión del inyector PoE del equipo Ceragon FibeAir IP-20S.

Fuente: Ceragon Networks Ltd. (s.f.). Manual de instalación FibeAir IP-20S.

Anexo C

Especificaciones técnicas del router Huawei AR161F

Item	AR161	AR161W	AR161G-L	AR169	AR169W	AR169G-L
Hardware						
WAN speed with services* (IMIX)	150Mbps	150Mbps	150Mbps	150Mbps	150Mbps	150Mbps
Number of recommended users	50	50	50	50	50	50
Fixed WAN ports	1 x GE	1 x GE	1 x GE	1 x VDSL2 (compatible with ADSL2+ Annex A/M, Annex B/J. Support Vectoring)	1 x VDSL2 (compatible with ADSL2+ Annex A/M, Annex B/J. Support Vectoring)	1 x VDSL2 (compatible with ADSL2+ Annex A/M, Annex B/J. Support Vectoring)
Fixed Ethernet switching ports	4 x GE(can be configured as WAN interfaces)	4 x GE(can be configured as WAN interfaces)	4 x GE(can be configured as WAN interfaces)	4 x GE(can be configured as WAN interfaces)	4 x GE(can be configured as WAN interfaces)	4 x GE(can be configured as WAN interfaces)
Integrated LTE	-	-	FDD LTE	-	-	FDD LTE
Wi-Fi	-	802.11 b/g/n	-	-	802.11 b/g/n	-
USB 2.0 ports	1	1	1	1	1	1
Console ports	1	1	1	1	1	1
Memory size	512 MB	512 MB	512 MB	512 MB	512 MB	512 MB
Flash memory	512 MB	512 MB	512 MB	512 MB	512 MB	512 MB
Maximum power	24W	24W	24W	24W	24W	24W
Power supply (AC)	100 V to 240 V					
Frequency	50/60 Hz					
Dimensions (H x W x D)	44.0 mm x 300.0 mm x 216.4 mm (1.73 in. x 11.8 in. x 8.5 in.)					
Operating	0°C to 45°C					

Figura C1 Especificaciones de hardware de routers Huawei serie AR160, con comparativa de modelos AR161, AR161W, AR161G-L, AR169, AR169W y AR169G-L (puertos WAN/LAN, memoria, potencia y dimensiones) Fuente: Huawei Technologies Co., Ltd. (s.f.). Hoja de especificaciones técnicas.

Item	AR161	AR161W	AR161G-L	AR169	AR169W	AR169G-L
Basic features	DHCP server/client, PPPoE server/client, PPPoA server/client, PPPoEoA server/client, NAT, Sub interface management					
WLAN(AP)	AP management, WLAN QoS, WLAN security, WLAN radio management, WLAN user management(Only WLAN models support WLAN AP features)					
WLAN(Ac)	AP management(AC discovery/AP access/AP management),CAPWAP,WLAN user management , WLAN radio management (802.11a/b/g/n) ,WLAN QoS (WMM), WLAN security (WEP/WPA/WPA2/Key management)					
LAN	IEEE 802.1P, IEEE 802.1Q, IEEE 802.3, VLAN management, MAC address management, MSTP, etc.					
IPv4 unicast routing	Routing policy, static route, RIP, OSPF, IS-IS, BGP					
IPv6 unicast routing	Routing policy, static route, RIPng, OSPFv3, IS-ISv6, BGP4+					
Multicast	IGMP version1/2/3, PIM SM, PIM DM, MSDP,MBGP					
VPN	IPSec VPN, GRE VPN, DSVPN, L2TP VPN					
QoS	Diffserv mode, Priority mapping, traffic policing (CAR), traffic shaping, congestion avoidance (based on IP precedence/DSCP WRED), congestion management (LAN interface: SP/WRR/SP+WRR; WAN interface: PQ/CBWFQ), MQC (traffic classification, traffic behavior, and traffic policy), HierarchicalQoS, Smart Application Control (SAC)					
Security	ACL, firewall, 802.1x authentication, AAA authentication, RADIUS authentication, HWTACACS authentication, broadcast storm suppression, ARP security, ICMP attack defense, URPF, CPAR, blacklist, IP source tracing, PKI,					
Management and maintenance	Upgrade management, device management, web-based GUI, GTL, SNMP(v1/v2c/v3), RMON, NTP, CWMP, Auto-Config, site deployment using USB disk, CLI, SSH (v1/v2)					

Figura C2 Características de software de routers Huawei serie AR160, con funciones de enrutamiento (IPv4/IPv6), WLAN, VPN, calidad de servicio (QoS), seguridad y gestión/mantenimiento. Fuente: Huawei Technologies Co., Ltd. (s.f.). Hoja de especificaciones técnicas.