

Diseño de un sistema de contingencia en Telecomunicaciones para la interconexión de subestaciones eléctricas con el Centro de Control de Emcali

Stevens Oliverio Olarte Forero

3159609

Asesor

Maurico Ochoa Sana

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI

Especialización en Redes de Nueva Generación

2025

Nota de Aceptación

Nombre Director de Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

Dedicatoria

Dedico este trabajo con gran amor a toda mi familia por el apoyo incondicional, por siempre impulsarme a ser mejor y lograr con éxito mi carrera.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a mi Madre, por su fe inquebrantable en mi potencial y por estar siempre presente con una palabra de ánimo en los momentos más desafiantes.

A la Universidad en cabeza de los docentes, cuya guía y sabiduría han sido la columna vertebral de esta investigación.

A mi lugar de trabajo por su comprensión y flexibilidad, y por permitirme equilibrar mis responsabilidades profesionales con mis compromisos académicos lo cual fue crucial para alcanzar este hito.

Resumen

El principal problema que aborda este proyecto es la crítica vulnerabilidad de la infraestructura de telecomunicaciones de EMCALI, donde la obsolescencia y el vandalismo han dejado a 25 subestaciones eléctricas sin una cobertura de fibra óptica robusta, lo que provoca indisponibilidad de hasta 120 horas mensuales, afectando la calidad del servicio, la toma de decisiones y resultando en incumplimientos regulatorios y sanciones. Ante esta situación, la justificación radica en la necesidad imperativa de diseñar e implementar un sistema de contingencia de alta disponibilidad mediante radioenlaces, que garantice la transmisión de datos operativos en tiempo real y mitigue el riesgo operacional. La metodología se centró en diseñar, modelar e implementar una red inalámbrica robusta; la topología seleccionada fue tipo estrella, asegurando la Calidad del Servicio (QoS) con el Centro de Control de Energía (CCE) como nodo central, y utilizando el estándar IEEE 802.1Q para la segregación de VLAN y asegurar una baja latencia. Además, se realizó una prueba piloto operativa entre la Subestación Centro y el Nodo Tanque 30 para la validación. Los resultados de las simulaciones confirmaron la viabilidad técnica al garantizar una disponibilidad mínima del 99.99% y el piloto demostró un 100% de disponibilidad a nivel de radiofrecuencia (RF) sin interrupciones, validando la solidez de la solución. En conclusión, la viabilidad técnica y operativa del diseño propuesto queda firmemente establecida, proporcionando a EMCALI la hoja de ruta necesaria para mitigar el riesgo operacional, fortalecer su infraestructura tecnológica y asegurar la base para la modernización de su gestión energética.

Palabras clave: Radion enlace, CREG, red inalambrica, diseño, topología.

Abstract

The main problem addressed by this project is the critical vulnerability of EMCALI telecommunications infrastructure, where obsolescence and vandalism have left 25 electrical substations without robust fiber optic coverage. This causes service unavailability of up to 120 hours per month, affecting service quality, decision-making, and resulting in regulatory non-compliance and sanctions. Given this situation, the justification lies in the imperative need to design and implement a high-availability contingency system using radio links (radioenlaces), which guarantees the real-time transmission of operational data and mitigates operational risk. The methodology focused on designing, modeling, and implementing a robust wireless network; the selected star topology was chosen to ensure Quality of Service (QoS) with the Energy Control Center (CCE) as the central node, and by using the IEEE 802.1Q standard for VLAN segregation to ensure low latency. Furthermore, an operational pilot test was conducted between the Centro Substation and the Tanque 30 Node for validation. The simulation results confirmed the technical feasibility by guaranteeing a minimum availability of 99.99%, and the pilot demonstrated 100% availability at the radio frequency (RF) level without interruptions, validating the solution's soundness. In conclusion, the technical and operational viability of the proposed design is firmly established, providing EMCALI with the necessary roadmap to mitigate operational risk, strengthen its technological infrastructure, and secure the basis for modernizing its energy management.

Keywords: Radio Link, CREG, Wireless Network, Design, Topology.

Tabla de Contenido

Resumen.....	5
Abstract.....	6
Introducción	13
Justificación	15
Plantamiento del problema	17
Objetivos.....	18
Objetivo General.....	18
Objetivos Específicos	18
Marcos de referencia.....	19
Marco Teórico de la investigación	19
Bases Teóricas.	19
Radioenlaces y su aplicación en la interconexión de subestaciones.....	19
Beneficios de la conectividad inalámbrica en Subestaciones	20
Selección de bandas de frecuencia y modelamiento de enlaces	20
Selección de Bandas de Frecuencia.	21
Análisis general (véase Tabla 1).....	24
Bandas licenciadas	24
Bandas emergentes (mmWave/E-Band 70/80 GHz)	24
Banda libre de 5 GHz.....	24
Modelamiento de Enlaces.....	25
Investigaciones o antecedentes del estudio	26
Estudios previos sobre radioenlaces en subestaciones	26

Implementación en EMCALI y proyectos relacionados.....	27
Ciberseguridad y fesaños en Redes Inalámbricas	28
Marco conceptual.	29
Radioenlace.....	30
Red Inalámbrica.....	33
Antena parabólica	34
Desarrollo del Proyecto.....	36
Diseño del Proyecto.....	36
Recoleccion de datos	36
Visitas de campo recoleccion de datos	36
Formato de visitas levantamiento de información	37
Diseño y modelamiento de la red inalambrica.	40
Diseño	40
Modelamiento del diseño general.....	41
Modelamiento del perfil del enlace.	43
Modelamiento del diseño logico.....	59
Características de los equipos utilizados.	61
Despliegue de la Topología.	77
Monitoreo y gestión de los enlaces.....	80
Conclusiones	83
Recomendaciones	85
Referencias Bibliográficas	86

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Topología tipo estrella</i>	41
Figura 2 <i>Topología de la red según el levantamiento de la información</i>	42
Figura 3 <i>Perfil del enlace Tres Cruces – San Luis y zona de Fresnel</i>	44
Figura 4 <i>Perfil del enlace Tres Cruces – Pance y zona de Fresnel</i>	45
Figura 5 <i>Perfil del enlace Tres Cruces – Mulaló y zona de Fresnel</i>	46
Figura 6 <i>Perfil del enlace Tres Cruces – Menga y zona de Fresnel</i>	47
Figura 7 <i>Perfil del enlace Tres Cruces – Menga y zona de Fresnel</i>	47
Figura 8 <i>Perfil del enlace Tres Cruces – Centro de Control Maestro y zona de Fresnel</i>	48
Figura 9 <i>Perfil del enlace Tres Cruces – Campiña y zona de Fresnel</i>	48
Figura 10 <i>Perfil del enlace Tres Cruces – Arroyohondo y zona de Fresnel</i>	49
Figura 11 <i>Perfil del enlace Tres Cruces – San Antonio y zona de Fresnel</i>	50
Figura 12 <i>Perfil del enlace Tres Cruces – Tanque 30 y zona de Fresnel</i>	51
Figura 13 <i>Perfil del enlace Tres Cruces – DiaseI y zona de Fresnel</i>	51
Figura 14 <i>Perfil del enlace Tanque 30 Centro de Control maestro y zona de Fresnel</i>	52
Figura 15 <i>Perfil del enlace Tanque 30 Centro y zona de Fresnel</i>	52
Figura 16 <i>Perfil del enlace Tanque 30 Puerto Mallarino y zona de Fresnel</i>	53
Figura 17 <i>Perfil del enlace Tanque 30 Ladera y zona de Fresnel</i>	53
Figura 18 <i>Perfil del enlace Tanque 30 Juanchito y zona de Fresnel</i>	54
Figura 19 <i>Perfil del enlace Reforma Centro de Control maestro y zona de Fresnel</i>	54
Figura 20 <i>Perfil del enlace Reforma Aguablanca y zona de Fresnel</i>	55
Figura 21 <i>Perfil del enlace Pico de Águila Puerto Tejada y zona de Fresnel</i>	55

Figura 22	<i>Perfil del enlace Pico de Águila Meléndez y zona de Fresnel</i>	56
Figura 23	<i>Perfil del enlace Pico de Águila Ciudad del Sur y zona de Fresnel</i>	56
Figura 24	<i>Perfil del enlace Pico de Águila Centro de Control Maestro y zona de Fresnel</i>	57
Figura 25	<i>Perfil del enlace Pico de Águila Alférez y zona de Fresnel</i>	57
Figura 26	<i>Perfil del enlace Guachicona Mulaló y zona de Fresnel</i>	58
Figura 27	<i>Perfil del enlace Guachicona Guachal y zona de Fresnel</i>	59
Figura 28	<i>Diagrama lógico.....</i>	60
Figura 29	<i>Enlace establecido.....</i>	80
Figura 30	<i>Sistema de gestión de los radios marca Telrad.....</i>	82

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Matriz comparativa de alternativas tecnológicas: costo, disponibilidad, desempeño y robustez.</i>	22
Tabla 2 <i>Equivalencia aproximada en minutos de indisponibilidad por año</i>	33
Tabla 3 <i>Subestaciones a visitar.....</i>	36
Tabla 4 <i>Formato estado de la infraestructura</i>	37
Tabla 5 <i>Formato datos para simulación.....</i>	39
Tabla 6 <i>Disponibilidad radio enlaces simulados</i>	40
Tabla 7 <i>Especificaciones enlaces troncales.....</i>	61
Tabla 8 <i>Especificaciones enlaces de acceso</i>	66
Tabla 9 <i>Especificaciones switch</i>	71
Tabla 10 <i>Especificaciones cables</i>	73

Lista de imágenes

	Pág.
Imagen 1 <i>Nodo tanque 30</i>	78
Imagen 2 <i>Rack nodo tanque 30</i>	78
Imagen 3 <i>Subestación energía centro</i>	79
Imagen 4 <i>Rack subestación centro</i>	79

Introducción

El sector eléctrico en Colombia es un componente esencial para el desarrollo económico y social del país. Su funcionamiento está regulado por la Ley 142 de 1994 y la Ley 143 de 1994, y supervisado por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), la cual tiene como responsabilidad garantizar la calidad, continuidad y eficiencia del servicio eléctrico prestado a los usuarios.

En este marco, Empresas Municipales de Cali (EMCALI E.I.C.E. E.S.P.) opera 25 subestaciones eléctricas las cuales son monitoreadas desde el Centro de Control de Energía en Cali mediante una Red Multiservicios soportada en fibra óptica. No obstante, la realidad operativa actual evidencia una importante limitación, varias subestaciones carecen de cobertura cableada, lo que impide una transmisión oportuna de datos en tiempo real y dificulta el monitoreo eficaz de los sistemas eléctricos.

Esta carencia de infraestructura de telecomunicaciones adecuada genera deficiencias significativas en la gestión operativa, afectando la recopilación de datos necesarios para la toma de decisiones oportunas, así como el cumplimiento de los estándares exigidos por los entes reguladores. Como consecuencia directa, se han registrado tiempos de indisponibilidad de hasta 120 horas mensuales, situación que compromete la continuidad del servicio, disminuye su calidad y expone a la empresa a sanciones regulatorias.

Frente a este escenario, se identifica la necesidad de diseñar e implementar un sistema de contingencia en telecomunicaciones basado en radioenlaces de alta disponibilidad. Esta solución alternativa permitirá interconectar de manera eficiente las subestaciones actualmente sin cobertura cableada, mejorando la transmisión de datos, fortaleciendo la gestión operativa y

asegurando un servicio eléctrico continuo, confiable y de alta calidad. contribuir a una mejor comprensión de este fenómeno y sus desafíos.

Justificación

La infraestructura de telecomunicaciones de EMCALI presenta deficiencias en la interconexión de un número significativo de subestaciones eléctricas, lo que impide la transmisión en tiempo real de datos operativos y compromete la eficiencia en la gestión y supervisión del sistema eléctrico, resultando en hasta 120 horas de indisponibilidad mensual y posibles sanciones regulatorias (EMCALI, 2024; Ley 142/1994; Ley 143/1994).

Problemas específicos:

Cobertura insuficiente de fibra óptica: Varias subestaciones carecen de enlaces de fibra, limitando la recolección de datos en tiempo real y retrasando la detección de fallas (EMCALI, 2024).

Alta indisponibilidad operativa: Los tiempos de indisponibilidad alcanzan 120 horas mensuales, afectando la continuidad del servicio y el cumplimiento de estándares de la CREG (CREG, s.f.).

Dependencia de cableado vulnerable: La infraestructura cableada está sujeta a averías y restricciones de despliegue, lo que subraya la necesidad de enlaces inalámbricos como alternativa o respaldo (Martínez, 2018).

Ausencia de plan de contingencia inalámbrico formalizado: No existe un diseño sistemático de radioenlaces de alta disponibilidad que respalde la red cableada y asegure la continuidad de las comunicaciones ante fallos.

La presente investigación parte de la hipótesis de que la implementación de un sistema de contingencia basado en radioenlaces de microondas y 5G privadas permitirá optimizar los tiempos de respuesta ante fallas, reducir los periodos de indisponibilidad y garantizar el

cumplimiento de los estándares regulatorios de calidad y continuidad del servicio eléctrico en las subestaciones de EMCALI.

Plantamiento del problema

En este contexto, Empresas Municipales de Cali (EMCALI E.I.C.E. E.S.P.) desempeña un papel crucial en la distribución de energía, operando actualmente 25 subestaciones eléctricas. Estos sistemas son monitoreados desde el Centro de Control de Energía en Cali mediante una Red Multiservicios interconectada a través de fibra óptica. Sin embargo, una parte significativa de las subestaciones aún carece de cobertura cableada, lo cual limita la transmisión de datos en tiempo real y afecta negativamente la capacidad de respuesta operativa y la toma de decisiones estratégicas.

La ausencia de una infraestructura de telecomunicaciones robusta en estas subestaciones ha ocasionado deficiencias en la gestión de datos operativos y ha dificultado el cumplimiento de los requisitos exigidos por los organismos reguladores. Como consecuencia, se han registrado tiempos de indisponibilidad de hasta 120 horas mensuales, lo que no solo deteriora la calidad del servicio, sino que también genera sanciones económicas y pérdida de confianza por parte de los usuarios.

Ante esta problemática, se hace necesario diseñar e implementar un sistema de contingencia en telecomunicaciones, basado en una red inalámbrica de alta disponibilidad mediante radioenlaces. Esta solución permitirá interconectar las subestaciones actualmente desconectadas, optimizar la recolección y análisis de datos, y garantizar así un servicio continuo, eficiente y de calidad.

Objetivos

Objetivo General

Implementar una red inalámbrica alterna basada en radioenlaces de alta disponibilidad para optimizar la gestión y aumentar la disponibilidad operativa de las subestaciones de energía

Objetivos Específicos

- Diseñar la arquitectura más adecuada para realizar una interconexión inalámbrica en cada subestación de energía mediante radioenlaces que se comuniquen de manera eficiente con el Centro de Control, permitiendo la gestión y monitoreo en tiempo real de los datos operativos.
- Modelar los radios enlaces inalámbricos para el diseño óptimo de redes punto a punto y punto a multipunto, mejorando la eficiencia y cobertura de la comunicación en las subestaciones mediante simulación.
- Desplegar la arquitectura de comunicación seleccionada en entornos controlados (origen y destino) utilizando equipos en banda no licenciadas, asegurando el cumplimiento de los requerimientos de disponibilidad exigidos por el organismo de control.

Marcos de referencia

Marco Teórico de la investigación

La incorporación de la automatización, junto con el uso de control remoto en la industria energética, ha progresado significativamente con el fin de aumentar la eficacia de las operaciones y garantizar la seguridad en el suministro de electricidad. En este caso específico de los enlaces de radio utilizados para el control remoto de las subestaciones, se ha vuelto importante monitorear y operar el sistema de energía eléctrica sin usar cables físicos debido a las capacidades de transferencia de datos en tiempo real.

El desarrollo en telecomunicaciones ha favorecido una mayor movilidad y adaptabilidad de los enlaces de radio a diferentes terrenos geográficos. Se vuelve más fácil instalarlos en regiones de difícil acceso. La introducción de SCADA, RTUs e IEDs ha mejorado la fiabilidad del suministro de electricidad.

La implementación de enlaces de radio en subestaciones representa un avance importante en la industria de la energía eléctrica, así como una contribución significativa a la modernización del sector de servicios públicos. Dispositivos relativamente avanzados como micrófonos, altavoces y antenas han mejorado en gran medida la conectividad y la eficiencia operacional de la red de energía eléctrica.

Bases Teóricas.

Radioenlaces y su aplicación en la interconexión de subestaciones. Los radioenlaces, basados en la transmisión inalámbrica de información mediante ondas electromagnéticas, han cobrado gran relevancia en la modernización de los sistemas eléctricos, especialmente en la interconexión de subestaciones. Su aplicación ha permitido mejorar la operatividad y

confiabilidad de las redes de distribución mediante la optimización de la supervisión remota, la teleprotección y la gestión eficiente de la infraestructura eléctrica (Martínez, 2018).

En el contexto de EMCALI EICE ESP, los esfuerzos por modernizar sus telecomunicaciones mediante radioenlaces han sido notables. Estudios recientes han evaluado la implementación de enlaces en bandas licenciadas y no licenciadas, logrando con ello una infraestructura más robusta y acorde con las demandas actuales y futuras de los usuarios (Universidad Autónoma de Occidente, 2021). Con una inversión significativa, EMCALI ha modernizado la subestación Meléndez e instalado reconectores inteligentes, mejorando la distribución de energía y la detección de fallas (Valencia, 2024).

Beneficios de la conectividad inalámbrica en Subestaciones. La implementación de redes inalámbricas en subestaciones mejora la gestión y el funcionamiento del sistema eléctrico, cruciales para una transmisión segura y eficiente de la electricidad. Tradicionalmente, las subestaciones han dependido de sistemas de comunicación por cable, que pueden ser menos flexibles para actualizaciones. Las redes inalámbricas ofrecen un enfoque diferente, reduciendo costos de instalación y mantenimiento y ofreciendo mayor flexibilidad para futuras actualizaciones. Sin embargo, la comunicación inalámbrica tiene desafíos, como la seguridad (las señales inalámbricas se pueden interceptar más fácilmente), la integridad y seguridad de la transmisión de datos, y la compatibilidad con sistemas heredados. El análisis de costo-beneficio es crucial, considerando que, si bien puede haber ahorros iniciales, podría haber costos continuos relacionados con el mantenimiento y la seguridad de la infraestructura inalámbrica.

Selección de bandas de frecuencia y modelamiento de enlaces. La selección de bandas de frecuencia y el modelamiento de enlaces juegan un papel fundamental en la planificación y optimización de redes de radioenlace para la interconexión de subestaciones. Estos factores

determinan la calidad de la señal, la estabilidad del enlace y la mitigación de interferencias, impactando directamente en la confiabilidad del sistema.

Selección de Bandas de Frecuencia. Para garantizar la disponibilidad y estabilidad de la red inalámbrica en EMCALI, considero una banda de frecuencia, con características específicas que afectan el desempeño del enlace.

Banda de 5 GHz: Esta banda es ampliamente utilizada en enlaces de corto y mediano alcance debido a su alta estabilidad y menor susceptibilidad a interferencias. Además, no requiere licencia en muchas jurisdicciones, lo que facilita su implementación (ITU, 2020). Según Rodríguez y Pérez (2021), “las redes basadas en 5 GHz presentan un equilibrio entre velocidad de transmisión y costo de implementación, siendo ideales para redes urbanas de alta densidad” (p. 87).

Con el fin de fortalecer la trazabilidad y objetividad del proceso de selección tecnológica, se incorpora a continuación una matriz comparativa que evalúa alternativas frecuentes en enlaces punto-a-punto para interconexión de subestaciones con el centro de control. Los criterios considerados son: costo (CAPEX/OPEX), disponibilidad/tiempo de implementación, desempeño (capacidad/estabilidad) y robustez (frente a interferencia y condiciones ambientales). La calificación y justificación se fundamentan en guías y modelos de diseño reconocidos (p. ej., ITU-R P.525 para atenuación en espacio libre; ITU-R P.530 para márgenes y disponibilidad; ITU-R P.838/P.837 para lluvia; requisitos regulatorios ETSI/FCC y lineamientos de la ANE en Colombia)

Tabla 1

Matriz comparativa de alternativas tecnológicas: costo, disponibilidad, desempeño y robustez

Alternativa	Costos	Disponibilidad	Desempeño	Robustez	Justificación técnica
Banda libre 5 GHz	No requiere tasas por uso del espectro. Equipos COTS de bajo costo; OPEX moderado y repuestos disponibles.	Uso inmediato (plug-and-play). Despliegue ágil y time-to-market mínimo.	Centenas de Mbps a ≈ 1 Gbps según modulación (MCS), ancho de canal y limpieza espectral; rendimiento sensible a interferencia co-canal.	Media–alta con ingeniería adecuada (antenas direccionales, selección de canal, alineación, despeje de Fresnel); coexistencia gestionada por DFS/TPC.	Equilibrio costo-desempeño idóneo para enlaces LOS de acceso/contingencia ; requiere verificación de PIRE/PSD y cumplimiento regulatorio local; dimensionar márgenes con ITU-R P.530 y considerar lluvia si aplica (P.838/P.837).
Banda libre 2,4 GHz	Sin tasas de espectro. Equipos muy económicos y amplia oferta.	Uso inmediato; base instalada extensa en mercado.	Limitado por menor ancho de banda utilizable y elevada ocupación del espectro ISM; throughput y latencia variables.	Baja en entornos saturados (Wi-Fi, Bluetooth, IoT); alta probabilidad de colisiones e interferencia.	Adecuada para tramos cortos, telemetría o servicios no críticos; no recomendable para backhaul por congestión estructural.
Banda licenciada (6–42 GHz)	CAPEX alto (equipos carrier-grade) y	Requiere coordinación y licencia ante la	Capacidades de nivel Gbps con canal	Muy alta: directividad y exclusividad reducen	Preferible para misión crítica y backbone. Con diseño según ITU-R

	licencias/tasas de espectro; TCO elevado.	autoridad; mayor lead time.	exclusivo; modulación adaptativa (ACM) y alta estabilidad.	interferencia; desempeño predecible; soporta SLA estrictos.	P.530 (diversidad, XPIC) y márgenes por lluvia (P.838/P.837), alcanza disponibilidades $\geq 99,999\%$; la principal barrera es el TCO/licenciamiento.
Microondas licenciadas (EHF / V-Band / E-Band 70/80 GHz)	CAPEX alto (mmWave) y posibles costos de estudio/licencia; TCO elevado.	Oferta creciente; disponibilidad y regulaci3n dependen del pa3s; mayor adopci3n en 3reas urbanas.	Multi-Gbps en tramos cortos con anchos de canal amplios; baja latencia y gran estabilidad espectral.	Alta directividad; sensible a atenuaci3n por lluvia, niebla y humedad; exige mayor margen de desvanecimiento.	Excelente para backhaul urbano de muy alta capacidad en distancias cortas; requiere alineaci3n precisa y dimensionar márgenes por lluvia (ITU-R P.838) para cumplir la disponibilidad objetivo (ITU-R P.530).

Nota. COTS = equipos de producci3n masiva; LOS = l3nea de vista; DFS/TPC = mecanismos de coexistencia; PIRE/PSD = potencia isotr3pica radiada equivalente/densidad espectral; SLA = acuerdo de nivel de servicio; ACM = modulaci3n y codificaci3n adaptativa; XPIC = cancelaci3n de interferencia por polarizaci3n cruzada. S3ntesis basada en ITU-R P.525 (FSPL), ITU-R P.530 (diseño LOS y márgenes), ITU-R P.838 y P.837 (lluvia), ETSI EN 301 893 (requisitos WAS/RLAN 5 GHz), 47 CFR §15.407 (U-NII) y normativa local (ANE 105/2020; 737/2022).

Análisis general (véase Tabla 1)

Bandas licenciadas. Ofrecen la mayor robustez y previsibilidad del desempeño gracias a la exclusividad del canal y a la alta directividad de sus enlaces, lo que reduce la interferencia co-canal y permite SLA estrictos (p. ej., para misión crítica o transporte de operador). Su principal desventaja es el TCO elevado (equipos carrier-grade y licencias de espectro) y los trámites de coordinación/licitación ante la autoridad regulatoria, que incrementan los tiempos de puesta en marcha. En términos de ingeniería, el diseño se sustenta en ITU-R P.530 para márgenes y disponibilidad, y se ajusta a la normativa nacional de uso del espectro (ANE) según la banda seleccionada. (ITU-R, 2025; ANE, 2020, 2022).

Bandas emergentes (mmWave/E-Band 70/80 GHz). Constituyen la frontera de capacidad para backhaul urbano con multi-Gbps en tramos cortos. No obstante, su cobertura efectiva se ve limitada por la atenuación por lluvia y otros fenómenos atmosféricos, lo que exige márgenes de desvanecimiento mayores y planificación cuidadosa del radioenlace (zonas urbanas, alineación fina, disponibilidad de infraestructura). Por ello, aunque su adopción crece, su despliegue es más costoso y acotado a distancias cortas en entornos con infraestructura moderna. (ITU-R, 2005, 2017, 2025).

Banda libre de 5 GHz. Ofrece un equilibrio costo–desempeño–tiempo difícil de igualar: equipos COTS económicos, alta disponibilidad en el mercado y despliegue ágil. Aunque es susceptible a interferencias por coexistencia, una ingeniería adecuada antenas direccionales, selección de canal, despeje de Fresnel, control de PIRE/PSD, y cumplimiento de DFS/TPC— permite lograr enlaces estables y eficientes para última milla y contingencia. Estos criterios están normados en ETSI EN 301 893 (WAS/RLAN 5 GHz) y 47 CFR § 15.407 (U-NII), y los cálculos

de presupuesto de enlace y disponibilidad se respaldan con ITU-R P.525 y ITU-R P.530. (ETSI, 2024; FCC, 2025; ITU-R, 2024, 2025; ANE, 2020, 2022).

Conclusión y justificación final para 5 GHz. Para un proyecto orientado a despliegue rápido y optimización de costos característico de la última milla, la banda libre de 5 GHz resulta técnica y económicamente conveniente. Permite alcanzar centenas de Mbps hasta 1 Gbps con tiempos de implementación mínimos y CAPEX/OPEX contenidos, siempre que el diseño incluya: (i) presupuesto de enlace con verificación de FSPL (P.525); (ii) margen de desvanecimiento suficiente para la disponibilidad objetivo (P.530), incorporando, cuando aplique, atenuación por lluvia (P.838/P.837); y (iii) cumplimiento regulatorio de DFS/TPC y límites de PIRE/PSD vigentes (ETSI/FCC/ANE). En este contexto, 5 GHz es la alternativa más adecuada y objetivamente justificable para cumplir metas de cobertura y servicio sin incurrir en los mayores costos y tiempos de licenciamiento propios de las bandas licenciadas. (ETSI, 2024; FCC, 2025; ITU-R, 2005, 2017, 2024, 2025; ANE, 2020, 2022).

Modelamiento de Enlaces. El modelado de enlaces es un aspecto en el diseño y la optimización de una red de interconexión inalámbrica que permite examinar la propagación de la señal y estimar el desempeño de los enlaces de radio bajo diferentes condiciones ambientales y geográficas.

Se cuenta con herramientas como Radio Mobile y LinkPlanner, que sirven para el hacer el diseño del sistema y a través de consideraciones de topografía, meteorología, y obstáculos físicos, se calcula la cobertura que el enlace puede lograr (IEEE, 2021).

Investigaciones o antecedentes del estudio

El desarrollo y la implementación de radioenlaces en subestaciones eléctricas han sido objeto de múltiples estudios e iniciativas en diversas regiones. Estos avances han permitido optimizar la eficiencia operativa, garantizar la estabilidad del suministro eléctrico y mejorar la seguridad de las infraestructuras críticas. A continuación, se presentan investigaciones previas, casos de estudio y desafíos asociados a la ciberseguridad en este ámbito.

Estudios previos sobre radioenlaces en subestaciones.

En los últimos años, diversas investigaciones han demostrado el impacto positivo de los radioenlaces en la automatización y supervisión de subestaciones eléctricas. Un estudio de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) destacó la relevancia de estos sistemas en la mejora de la operación y el mantenimiento de la red eléctrica. Gracias a la implementación de radioenlaces, la EEQ logró optimizar el monitoreo remoto de las subestaciones, lo que permitió detectar fallas con mayor rapidez y reducir significativamente los tiempos de respuesta ante incidentes (Empresa Eléctrica Quito, 2017).

Por otro lado, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en México ha apostado por la integración de radioenlaces dentro de su estrategia de modernización del sistema eléctrico nacional. A través de esta tecnología, se ha conseguido mejorar la confiabilidad del servicio y garantizar una respuesta más rápida ante fallas en la red. Además, la CFE ha explorado el uso de enlaces de microondas como alternativa a las infraestructuras cableadas, logrando una reducción en costos operativos y mayor flexibilidad en la distribución de la energía (Comisión Federal de Electricidad [CFE], 2020).

A nivel global, la adopción de redes inalámbricas ha demostrado múltiples beneficios en el sector eléctrico. Un análisis reciente publicado por Industry News MX (2023) subrayó que el

uso de radioenlaces no solo optimiza la supervisión y control en tiempo real, sino que también contribuye a la mejora de la ciberseguridad y la reducción de costos en infraestructura. Gracias a la eliminación de cables y sistemas físicos vulnerables, los radioenlaces minimizan el riesgo de interrupciones accidentales o sabotajes, asegurando una mayor continuidad del servicio.

Implementación en EMCALI y proyectos relacionados.

En Colombia, la Empresas Municipales de Cali (EMCALI) ha llevado a cabo importantes inversiones en la modernización de su infraestructura eléctrica, incluyendo la incorporación de radioenlaces para fortalecer la comunicación entre subestaciones. En su estrategia de mejora del sistema eléctrico, EMCALI ha implementado soluciones avanzadas que han permitido optimizar la transmisión de datos en tiempo real, garantizando así un suministro de energía más estable y eficiente (EMCALI, 2024).

Uno de los avances más destacados ha sido la instalación de 660 kilómetros de cable semiaislado, lo que ha permitido reducir las interrupciones del servicio en aproximadamente tres horas anuales. Esta mejora no solo ha incrementado la calidad del servicio para los usuarios, sino que también ha optimizado la respuesta ante eventos inesperados, como fallas en la red o condiciones climáticas adversas (Alcaldía de Santiago de Cali, 2022).

Desde el punto de vista técnico, la planificación de radioenlaces en Santiago de Cali ha requerido un análisis detallado de los factores de propagación de la señal. Investigaciones recientes han utilizado modelos matemáticos como el modelo de Okumura-Hata, el cual permite predecir la atenuación de la señal en diferentes condiciones geográficas y climáticas. Este tipo de estudios han sido fundamentales para diseñar redes inalámbricas eficientes y garantizar una cobertura óptima en las zonas de operación de EMCALI (García & Rodríguez, 2024).

Asimismo, el uso de herramientas especializadas como Radio Mobile y LINKPlanner ha permitido la simulación precisa de la cobertura de los radioenlaces y la optimización de la red inalámbrica. Estos softwares han facilitado la planificación estratégica de la infraestructura, asegurando que la señal de comunicación entre subestaciones sea estable y confiable (Delmastro & Vignati, 2022); (Cambium Networks, 2024).

Ciberseguridad y desafíos en Redes Inalámbricas

La implementación de enlaces de radio en infraestructuras críticas como las subestaciones eléctricas plantea algunas preocupaciones para la ciberseguridad. La transferencia de información a través de redes inalámbricas puede estar sujeta a eventos como un ataque DDoS (Denegación de Servicio), interceptación de datos y acceso no autorizado, lo que puede comprometer la integridad del sistema eléctrico.

Para abordar estas preocupaciones, es necesario el uso de estrategias de protección avanzadas. Instituciones como la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) han recomendado la implementación de medidas como la encriptación de datos, la autenticación multifactor y la monitorización continua de redes para prevenir el acceso no autorizado y asegurar las comunicaciones en el sector eléctrico (Comision de Regulación de Energía y Gas - CREG, s.f.).

Desde un punto de vista técnico, la evaluación de indicadores clave de rendimiento (KPI) como la latencia, el ancho de banda y la fiabilidad es útil para la mitigación de riesgos asociados con la inestabilidad del sistema. Un análisis de IEEE determinó que las redes inalámbricas bien diseñadas pueden aumentar significativamente la continuidad del servicio y disminuir los tiempos de respuesta ante fallos, reduciendo así las consecuencias negativas de posibles ataques o interrupciones no planificadas (2020).

Finalmente, el análisis de CND sugiere que la implementación de redes inalámbricas aumenta la estabilidad de las subestaciones eléctricas.

Marco conceptual.

Actualmente la GUENE de EMCALI tiene en operación 25 subestaciones de distribución de energía que son Gestionadas desde el Centro de Control de Energía ubicado en la autopista sur de la ciudad de Cali. Estas subestaciones son interconectadas al Centro de Control de Energía a través de la Red Multiservicios de la GUENTIC. Los nodos de la Red Multiservicio están interconectados por anillos de fibra óptica. Las subestaciones se encuentran interconectadas por fibra óptica a diferentes nodos de la red Multiservicios y la información de gestión es enrutada a través de una conexión LAN to LAN al Centro de Control de Energía. Los indicadores de disponibilidad de la Gestión sobre las subestaciones muestran que la gestión sobre las subestaciones ha alcanzado tiempo de indisponibilidad del orden de 120 horas al mes.

La red cableada se ha detectado como una de las principales causas del problema, el cual se pretende resolver en el presente proyecto es la insuficiente y baja calidad de los servicios de telecomunicaciones entre las subestaciones de energía eléctrica de la empresa EMCALI, la cual busca solucionarse mediante la implementación de una red de telecomunicaciones de última generación, de bajo costo y alta calidad que opera los equipos remotamente los que están automatizados, para esto se instalará unos equipos en cada punto los cuales dirigirán el tráfico de la información hasta llegar al centro de control.

En esta sección se desarrollan los fundamentos y las principales características relacionadas con los radioenlaces mediante la tecnología de las Microondas. Esto con el objetivo de tener un panorama amplio de los principios físicos que rigen la tecnología, así como los

elementos que son necesarios para la implementación de cada enlace, los criterios para el diseño y escogencia de la tecnología a implementar en los enlaces entre las subestaciones.

Radioenlace

Es un sistema electrónico de comunicación inalámbrica mediante ondas de radio que permiten la transmisión de datos entre los equipos y dispositivos entre una subestación y una radio base, facilitando un monitoreo y control remoto más eficiente de la red eléctrica y la transferencia de información entre dos o más puntos separados por pocos metros de distancia o varios kilómetros, existe diversidad de radioenlaces como, por ejemplo, el tipo de la radio comercial, el tipo de multipunto o los enlaces de larga distancia por satélite y las conexiones digitales terrestres, ambos radioenlaces punto a punto.

El sistema más básico de radioenlace está formado por 4 elementos principales:

El transmisor produce una señal de microondas de una frecuencia y potencia determinadas, modulada de determinada manera que la inyecta en la línea de transmisión, normalmente un cable coaxial, y llega a la antena que emite la señal hacia el espacio libre.

La antena del receptor que apunta a la del emisor recoge la energía de la señal y la pasa a la línea de transmisión que conecta al receptor que la demodula y procesa para interpretar la información.

La línea de transmisión en radioenlaces de óptimo rendimiento, debe existir una línea vista entre las 2 antenas para que se establezca la comunicación.

El tamaño de la antena, la capacidad del enlace y el funcionamiento está determinada por la frecuencia.

Actualmente las tecnologías de radioenlace continúan evolucionando para satisfacer las crecientes demandas de conectividad, ofrecen conexión a Internet confiable y robusta en lugares

donde llegar con cableado físico tendría un alto costo. En el caso específico de la banda libre de 5 GHz, el cumplimiento regulatorio se centra en respetar los límites de Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE/EIRP) y en emplear mecanismos de mitigación de interferencias como la Selección Dinámica de Frecuencia (DFS) y el Control de Potencia de Transmisión (TPC), de acuerdo con los marcos ETSI EN 301 893 (WAS/RLAN), 47 CFR § 15.40 (U-NII) y las disposiciones nacionales vigentes (Agencia Nacional del Espectro [ANE], 2020, 2022 ETSI, 2024; FCC, 2025).

1. Cálculo del presupuesto de enlace (link budget)

El presupuesto de enlace permite verificar la viabilidad técnica del radioenlace, asegurando que la potencia recibida (PR) supere el umbral de sensibilidad (S_{min}) del receptor (ITU-R, 2024, 2025).

A. Potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE/EIRP).

Define el límite máximo de emisión permitida:

$$\text{PIRE (dBm)} = \text{PT (dBm)} + \text{GT (dBi)} - \text{Ltx (dB)}$$

donde PT es la potencia del transmisor, GT la ganancia de la antena transmisora y Ltx las pérdidas por conectores/cables del lado transmisor. En numerosos marcos regulatorios, para 5.725–5.850 GHz se permite hasta 36 dBm de PIRE en ciertas condiciones de operación (verificar límites y densidad espectral aplicables en la norma local) (FCC, 2025; ANE, 2020, 2022).

B. Pérdida por espacio libre (FSPL).

Atenuación ideal por distancia (d) y frecuencia (f):

$$\text{FSPL (dB)} = 92,45 + 20 \cdot \log_{10}(d_{\text{km}}) + 20 \cdot \log_{10}(f_{\text{GHz}}) \text{ (ITU-R, 2024).}$$

C. Potencia recibida y margen de enlace.

$$PR \text{ (dBm)} = PT + GT + GR - L_{\text{total}} - FSPL$$

$$\text{Margen de enlace (dB)} = PR - S_{\text{min}}$$

donde GR es la ganancia de la antena receptora y L_{total} las pérdidas totales en ambos extremos (ITU-R, 2025).

Nota sobre unidades. Para usar el término 92,45, d debe estar en km y f en GHz. Si se emplea MHz, use 32,45 como constante con d_{km} y f_{MHz} (ITU-R, 2024).

2. Cálculo del margen de desvanecimiento (fade margin)

El margen de desvanecimiento es la reserva adicional para contrarrestar fluctuaciones de la señal por fenómenos de canal antes de caer por debajo de S_{min} :

$$\text{Margen de desvanecimiento (dB)} = \text{Margen de enlace} - (A_{\text{lluvia}} + A_{\text{multipath}} + A_{\text{otros}})$$

(ITU-R, 2025).

A. Desvanecimiento por trayectos múltiples (multipath).

Se estima con ITU-R P.530 (modelos de ocurrencia e intensidad de desvanecimientos profundos en enlaces LOS), pudiendo incorporar estrategias como diversidad, ACM y diseño de antenas para alcanzar la disponibilidad objetivo (ITU-R, 2025).

B. Atenuación por lluvia (rain fade).

Aunque 5 GHz es menos sensible que bandas superiores, los eventos de lluvia intensa pueden afectar tramos largos. Se estima con: $\gamma_R = k \cdot R^\alpha$ (dB/km) $\rightarrow A_{\text{lluvia}} \approx \gamma_R \cdot$

L_{efectivo} ,

donde R es la tasa de lluvia (p. ej., $R_{0.01}$) obtenida de ITU-R P.837; k y α provienen de ITU-R P.838; y L_{efectivo} se calcula según P.530 (ITU-R, 2005, 2017, 2025).

3. Estimación de disponibilidad y fiabilidad

La disponibilidad anual es el porcentaje de tiempo en que el enlace permanece operativo. De forma orientativa, la industria suele exigir 99,99 % (“cuatro nueves”) o 99,999 % (“cinco nueves”). Su equivalencia aproximada en minutos de indisponibilidad por año es:

Tabla 2

Equivalencia aproximada en minutos de indisponibilidad por año

Nivel de disponibilidad	Porcentaje	Tiempo máximo fuera de servicio/año
Cuatro nueves	99,99 %	≈ 52,6 min
Cinco nueves	99,999 %	≈ 5,3 min

Los cálculos deben presentarse por enlace y para el tramo completo (en serie), documentando parámetros y supuestos (ITU-R, 2025).

Nota metodológica. Adicionalmente, para 5 GHz debe verificarse el cumplimiento de DFS/TPC, límites de PIRE/PSD, canales permitidos y condiciones de operación (indoor/outdoor) según ETSI EN 301 893, 47 CFR § 15.407 y la normativa ANE vigente (ETSI, 2024; FCC, 2025; ANE, 2020, 2022).

Red Inalámbrica

En telecomunicaciones se conoce como red inalámbrica a una clase de conexión entre sistemas informáticos que se lleva a cabo mediante diversas ondas del espectro electromagnético. Es decir, una conexión de nodos que no requiere de ningún tipo de cableado o dispositivo alámbrico, ya que la transmisión y recepción de la información se produce mediante puertos especializados.

Las redes inalámbricas de área local (WLAN) juegan en la actualidad un papel muy importante en el desarrollo de empresas, este tipo de redes facilita la comunicación

proporcionando un acceso móvil a los servicios y aplicaciones de la red generando una alternativa de uso de tecnología más económica y eficiente a fin de asegurar que se tenga la información oportuna, no pierdan tiempo y sean más eficientes, incrementando la productividad y permitiendo el rápido desarrollo de la empresa.

Existen varios tipos de redes inalámbricas como:

WPAN Wireless Personal Área Network corresponde a una red inalámbrica de área personal.

WLAN Wireless Local Área Network se refiere a una red inalámbrica de área local.

WMAN Wireless Metropolitana Área Network es una red inalámbrica de área metropolitana con mayor alcance.

WiMAX es una tecnología de comunicaciones de punto a multipunto encauzada a proporcionar una alta velocidad de transmisión de datos a través de redes inalámbricas de área metropolitana.

WWAN Wireless Wide Área Network red inalámbrica de área amplia para transferir datos a lo largo de enormes distancias (Romo, 2013).

Antena parabólica

La invención de la antena parabólica en la década de 1880. Esta innovación permitió la transmisión y recepción de señales a larga distancia con mayor eficiencia y precisión. La antena como primer componente de los radioenlaces es responsable de transmitir y recibir las señales. Estas antenas pueden ser de diferentes tipos, como antenas parabólicas, sectoriales o direccionales.

Construir una red de radioenlaces requiere la instalación de antenas en puntos estratégicos para establecer conexiones inalámbricas entre ellos. Las antenas alineadas de

manera precisa garantizan una comunicación óptima entre las antenas de transmisión y recepción. Además, la elección de la frecuencia adecuada y la implementación de medidas de seguridad son fundamentales para garantizar la confiabilidad y la privacidad de la comunicación (Sistelec, s.f.).

Torre

Las torres y mástiles de telecomunicaciones son estructuras artificiales diseñadas para soportar antenas para labores de radiodifusión y telecomunicaciones. Desde el punto de vista de su soporte, hay dos tipos: auto portantes y atirantadas.

Dado que las torres son elementos pasivos que corresponden a la infraestructura sobre las cuales se instalan las antenas, las torres de telecomunicaciones se usan con estaciones radio base para un sin fin de aplicaciones como radiocomunicación, montaje de antenas de microondas para radioenlaces, repetidoras de telefonía celular entre otras (IESTEL, s.f.).

Desarrollo del Proyecto

Diseño del Proyecto

El diseño de la red de contingencia se definió bajo una topología física tipo estrella, donde el Centro de Control de Energía (CCE) actúa como el nodo central de agregación de tráfico, y cada subestación de distribución se conecta mediante un enlace dedicado Punto a Punto (PTP). La segregación y priorización del tráfico, se sustenta en la implementación del estándar IEEE 802.1Q. Este protocolo permite la creación de Redes de Área Local Virtuales (VLANs), logrando la separación VLAN de Control y de servicio. Esta segmentación lógica es crucial para garantizar la calidad de servicio (QoS) para los sistemas SCADA, ya que aísla dicho tráfico de las congestiones o interferencias de otros servicios.

El diseño tubo varias etapas recolección de datos, simulación, modelamiento y despliegue acontinuacion se evidenciara este proceso.

Recoleccion de datos

Visitas de campo recoleccion de datos. En la siguiente tabla se observa las subestaciones que se deben visitar.

Tabla 3

Subestaciones a visitar

Subestaciones de energia		
San antonio	San luis	Menga
Arroyohondo	Guachicono	Guachal
Mulalo	Pance	Campiña
Melendez	Puerto Tejada	Alferez
Ciudad del sur	Aguablanca	Juanchito
Puerto Mallarino	Ladera	Diesel I
Diesel II	Centro	

Fuente: elaboración propia

Para este diseño se realizó una visita a cada subestación de energía tomando las coordenadas cada sitio ubicados en la ciudad de Cali. En el análisis se determinó que cada subestación cuenta con monopolos de 25 metros de altura donde se ubicaran las antenas permitiendo una línea de vista óptima para cada enlace.

Formato de visitas levantamiento de información. Estos son los formatos que se utilizaron para el levantamiento de la información estado de la infraestructura y datos para simulación de los enlaces de radio

Tabla 4

Formato estado de la infraestructura

ítem	2. Cuarto de Equipos	ESTADO		
		Bueno	Regular	Malo
1	Puertas, ventanas y seguridad en general			
2	Temperatura			
3	Cableado eléctrico			
4	Barraje de tierra			
5	Iluminación			
6	Pasa muros correctamente instalados y sellados			
7	Barraje de tierra de pasamuros instalado y conectado a la malla de tierra del sistema			
8	Batería sanitaria			
9	El sitio se encuentra limpio y libre de obstáculos			
ítem	3. Sistemas de Respaldo	ESTADO		
		Bueno	Regular	Malo
1	Acometidas principales			
2	Planta Eléctrica			
3	Bancos de Baterías			
ítem	4. Estado General de la Torre	ESTADO		
		Bueno	Regular	Malo
1	Pintura			
2	Pararrayos			
3	Cable conductor del pararrayos			
4	Luces de Obstrucción			
5	Estado de las riendas			
6	Escalerilla de ascenso			

ítem	4. Estado General de la Torre (cont)	ESTADO		
		Bueno	Regular	Malo
7	Línea de Vida			
8	Sistema de Puesta a Tierra (SPT)			
9	Verificación estado del Anclaje de las escalerillas a la torre			
10	Escalerillas poseen barrajes de tierra conectados a la malla			
11	Las escalerillas se encuentran correctamente instaladas y fijas a las bases de concreto y/o muros o demás soportes			
12	El estado físico de los materiales de las escalerillas y porta cables se encuentra en buen, estado libres de corrosión o efectos.			
13	Barraje de tierra de pasamuros instalado y conectado a la malla de tierra del sistema			
14	Los cables están bien sujetos a las bandejas y en buen estado			
15	Especies animal o vegetal que esté alojada o invadiendo la torre			
16	El sitio se encuentra limpio y libre de obstáculos			

Observaciones:

Fuente: elaboración propia

Tabla 5*Formato datos para simulacion*

1. Información del Nodo				
Nombre del Nodo:				
Código del sitio:				
Dirección y/o vereda:				
Código DANE del municipio:				
Ubicación Geográfica (WGS84):	Latitud (grados, minutos y segundos) (N/S)			N
	Longitud (grados, minutos y segundos) (W)			W
Tecnologías instaladas(1):	Tipo 1	Tipo 3	Tipo 5	Tipo 6
Tipo de estructura (Marcar con una X):	Tipo 2	Tipo 4	Tipo 7	Tipo 8
	Torre	Terraza		Fachada
	Poste	Mástil		Interiores
	Monopolo	Otro:		
Descripción de las tecnologías instaladas				
Otras estaciones radioeléctricas en el sitio: (2)				
Otras estaciones radioeléctricas cerca en un radio de 100 metros: (3)				
Cerramiento perimetral				
Vigilancia				
Acceso al sitio				
1 Tipo 1: IDEN, GSM y/o CDMA, Tipo 2: UMTS (WCDMA), CDMA 2000, Tipo 3: LTE o 4G, Tipo 4: WIMAX V2, Tipo 5: Radio Enlaces BL, Tipo 6: Radio Enlaces BNL. Tipo 7: 5G, Tipo 8: Otro				
2 Indicar Operador y tipo de servicio para cada estación radioeléctrica ubicada en el sitio.				
3 Indicar Operador y tipo de servicio para cada estación radioeléctrica ubicada en un entorno de 100 metros con respecto al punto central de la estación, en caso de que se tenga esta información.				

Fuente: elaboración propia

Diseño y modelamiento de la red inalámbrica.

Diseño

Se realizaron simulaciones y cálculos del presupuesto para todos los enlaces, asegurando el cumplimiento del margen de desvanecimiento. El **diseño** final del sistema no solo **garantiza** el cumplimiento de los **requerimientos exigidos** de calidad de servicio (QoS) y rendimiento (*throughput*), sino que también optimiza el uso de la potencia de transmisión y la sensibilidad del receptor.

Acontinuacion se sintetiza los niveles de señal recibida, los anchos de banda, los esquemas de modulación y el porcentaje de disponibilidad obtenidos en las simulaciones de los radioenlaces del proyecto. Los resultados muestran una alta disponibilidad, lo que respalda la viabilidad técnica y la confiabilidad de la solución en el tiempo, en concordancia con los objetivos de servicio y las exigencias de los organismos de control.

Tabla 6

Disponibilidad Radio Enlaces Simulados

Modulation	Net Throughput	RSSI	Availability
BPSK	11.1	-40	99.999988
QPSK1/2	22.2	-40	99.999982
QPSK3/4	33.3	-40	99.999970
16QAM1/2	44.4	-44	99.999845
16QAM3/4	66.6	-44	99.999756
64QAM2/3	88.8	-48	99.997526
64QAM3/4	99.9	-48	99.996084
64QAM5/6	100.0	-48	99.992186

Fuente: elaboración propia

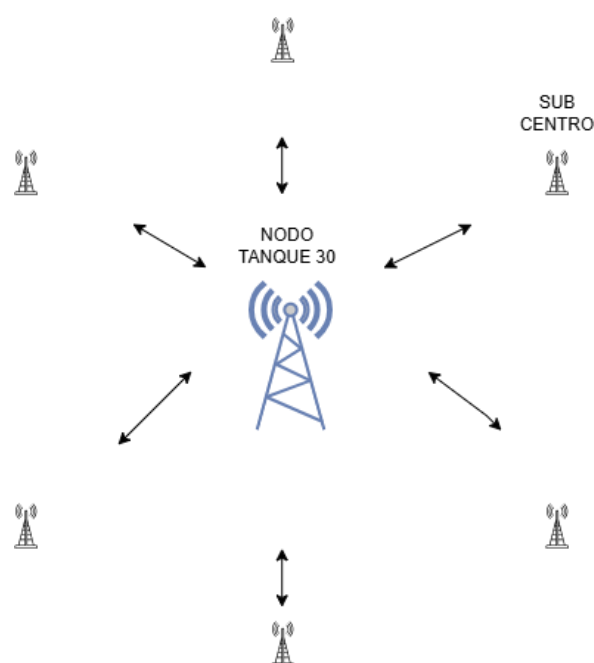
Sobre las simulaciones del proyecto. La Tabla 6 consolida niveles de señal, anchos de banda, esquemas de modulación y la disponibilidad estimada de los radioenlaces modelados. Los resultados evidencian alta disponibilidad, por lo que la solución propuesta es viable y confiable

en el tiempo, cumpliendo tanto las metas de servicio como los requerimientos regulatorios para la banda de 5 GHz (ETSI, 2024; FCC, 2025; ITU-R, 2024, 2025; ANE, 2020, 2022).

La primera implementación de este diseño se realizó exitosamente en el Nodo Tanque 30 Subcentro, validando los parámetros calculados y demostrando un rendimiento con una disponibilidad del servicio del 99.99%

Figura 1

Topología tipo estrella



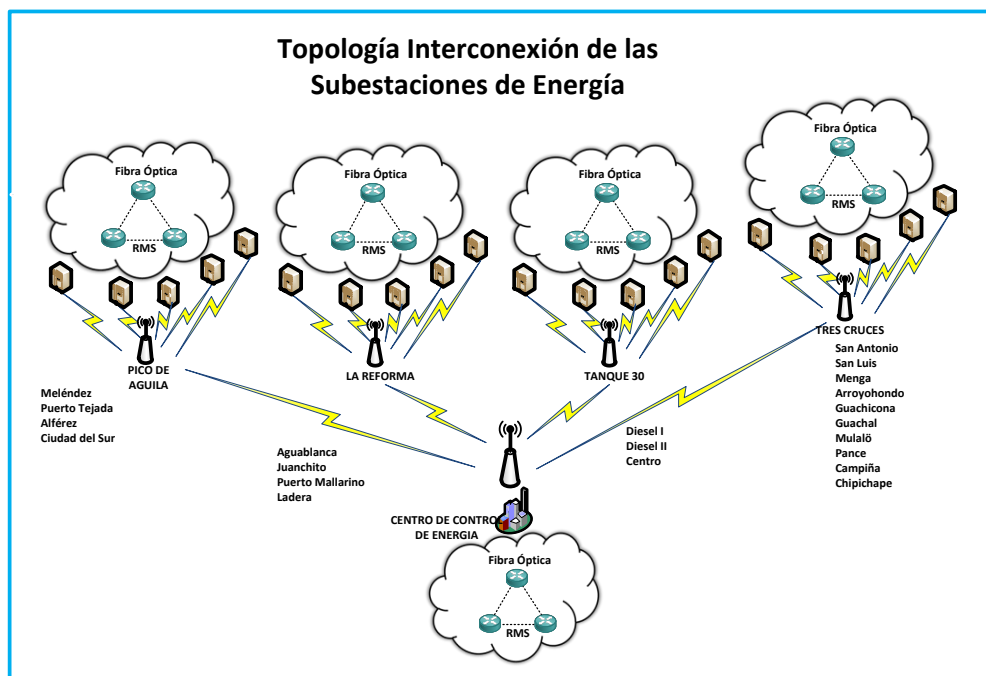
Fuente: Nodo Tanque 30 – Sub centro

Modelamiento del diseño general

Con base en recolección de información en campo y el análisis de los parámetros de propagación simulados con la herramienta de Telrad, se ha definido y validado el siguiente diseño de la red inalámbrica. El sistema de contingencia debe garantizar una disponibilidad mínima del 99.99% y una latencia bidireccional inferior a 50 milisegundos (ms) para soportar la transmisión en tiempo real de los protocolos.

Figura 2

Topología de la red según el levantamiento de la información.



Fuente: Elaboración propia

En esta simulación se ha tenido en cuenta la línea de vista, zona de Fresnel, la distancia, disponibilidad y la capacidad agregada del enlace.

En cada subestación se instalará una ODU (OUT DOOR UNIT) que se conectará al switch que conecta la subestación a la RMS. Del lado del nodo de telecomunicaciones se instalará una ODU estableciendo una conexión punto a punto (PTP) con la ODU de la respectiva subestación. En cada nodo de telecomunicaciones se instalará un switch al cual se conectarán los radio enlaces que unen cada subestación al nodo principal. En otro puerto del switch se conectará el radio enlace que une el nodo con el Centro de Control de Energía. En el Centro de Control de Energía se instalará otro switch al cual se conectarán los radios enlaces que interconectan los

nodos de telecomunicaciones. Cada uno de estos radios enlaces transporta el tráfico agregado de cada grupo de subestaciones.

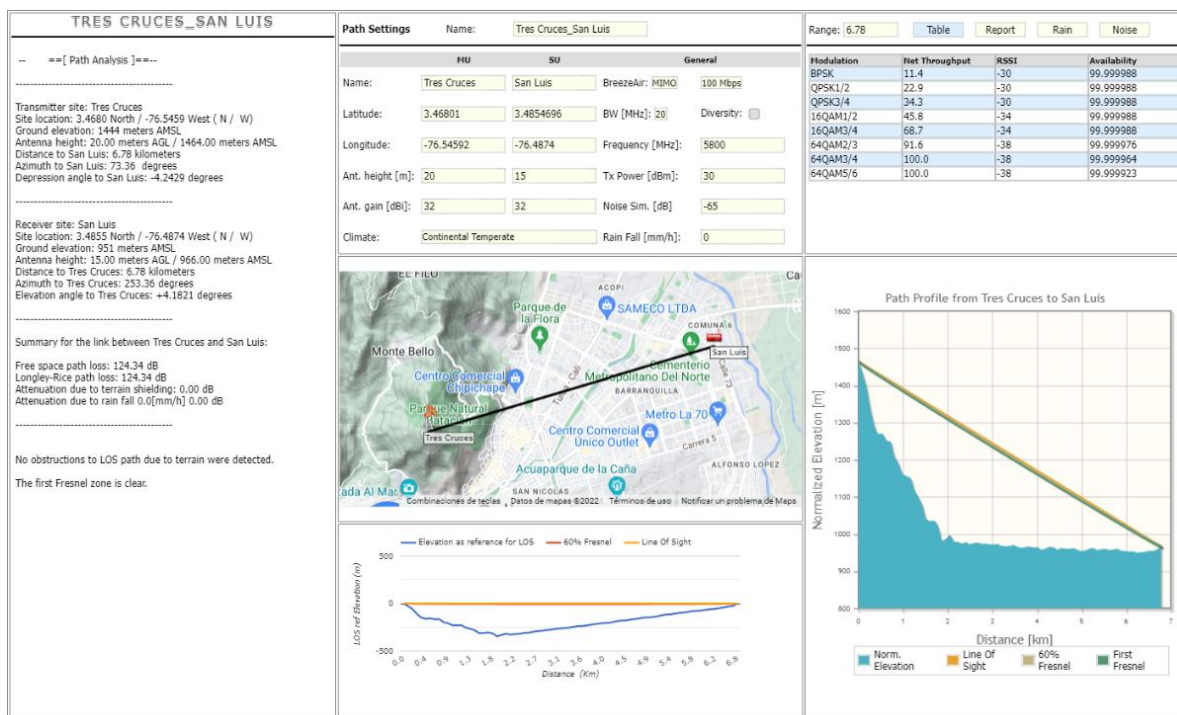
Modelamiento del perfil del enlace.

Utilizando la información recopilada y el software de simulación del fabricante Telrad, se modelaron todos los radioenlaces con el fin de determinar el nodo óptimo para establecer una conexión exitosa. A continuación, se detallan los resultados de los estudios realizados con esta aplicación.

El gráfico muestra el relieve entre los sitios, las alturas de torre y la primera Zona de Fresnel al 60%, que es el criterio mínimo para una línea de vista efectiva (LOS) en radioenlaces. Este análisis sirve para verificar el despeje y los puntos de posible obstrucción a lo largo de la ruta simulada. Adicionalmente, se presenta el Nivel de Señal Recibida esperado (RSL) con los parámetros de potencia, ganancias y pérdidas. Este valor es crucial para calcular el margen de desvanecimiento frente al umbral del receptor.

Figura 3

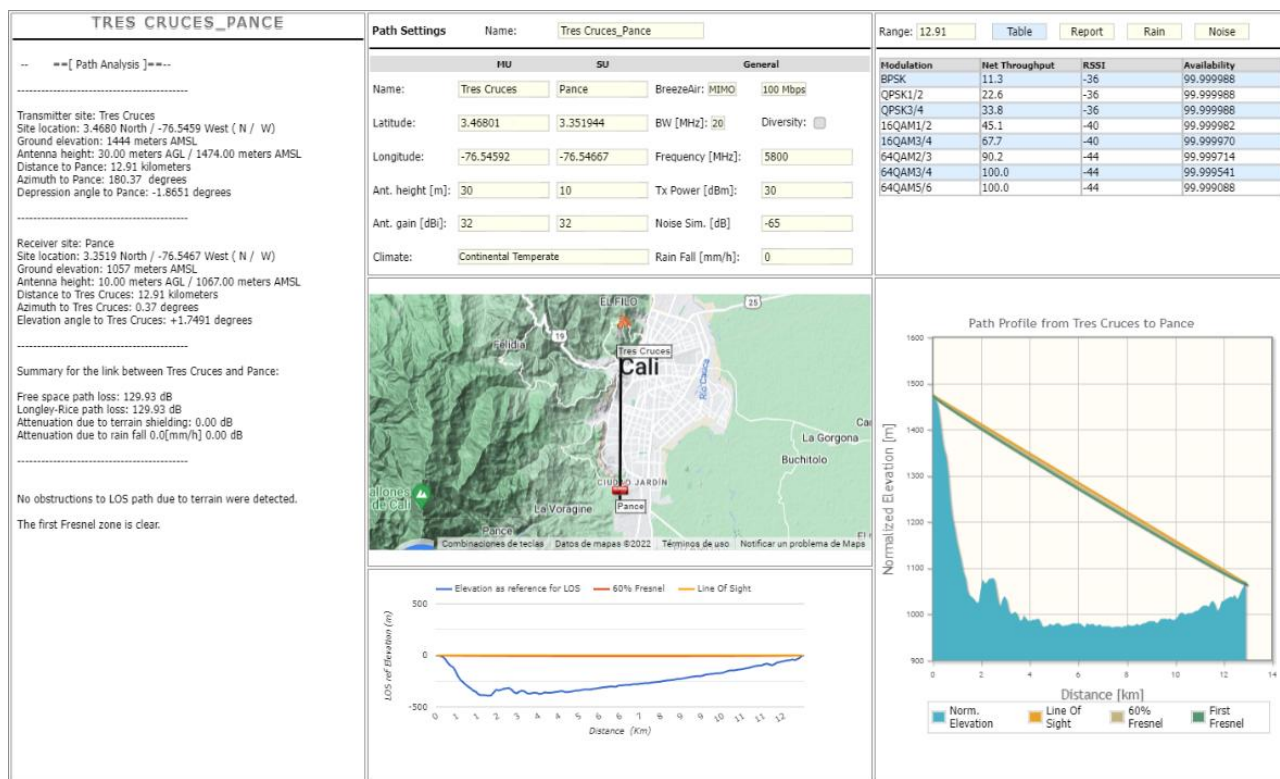
Perfil del enlace Tres Cruces – San Luis y zona de Fresnel



Nota. El gráfico muestra el relieve entre los sitios, las alturas de torre y la primera zona de Fresnel al 60%, criterio mínimo para línea de vista efectiva en radioenlaces. Sirve para verificar despeje y puntos de posible obstrucción a lo largo de la ruta simulada.

Figura 4

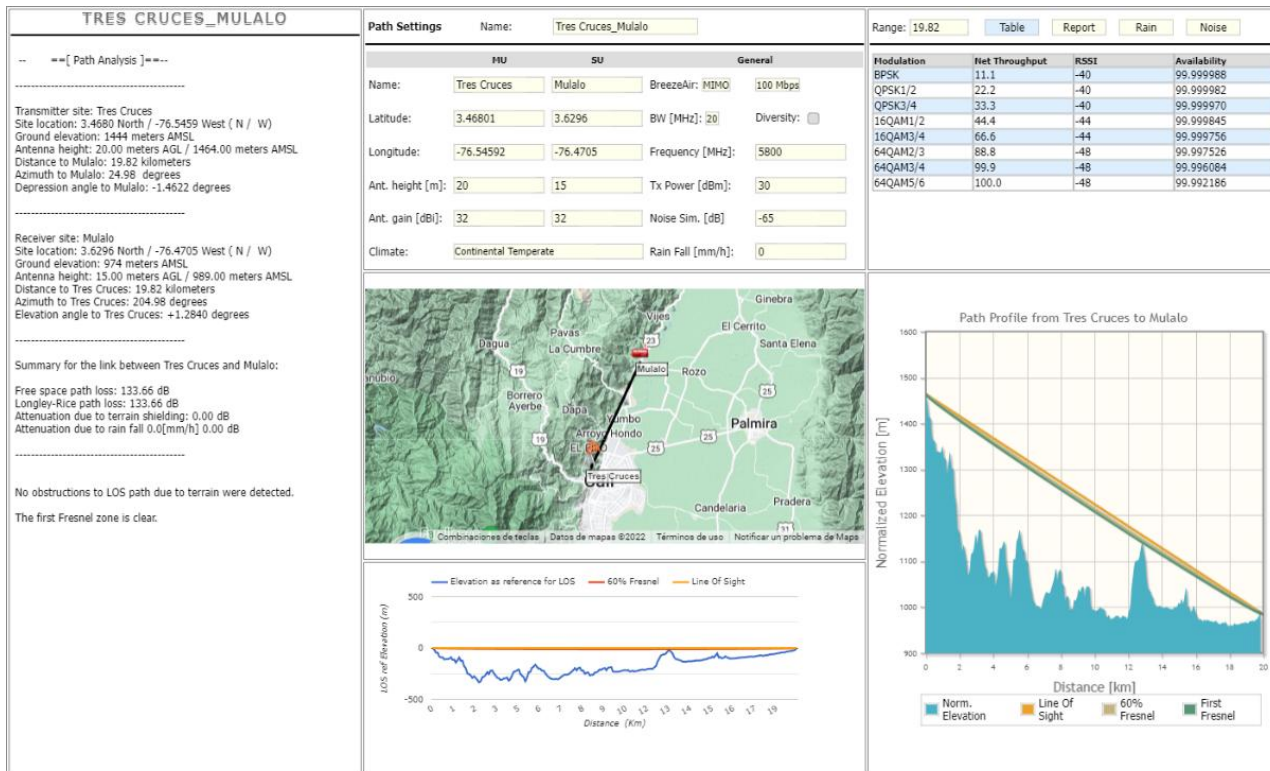
Perfil del enlace Tres Cruces - Pance y zona de Fresnel



Nota. El gráfico muestra el relieve entre los sitios, las alturas de torre y la primera zona de Fresnel al 60%, criterio mínimo para línea de vista efectiva en radioenlaces. Sirve para verificar despeje y puntos de posible obstrucción a lo largo de la ruta simulada

Figura 5

Perfil del enlace Tres Cruces – Mulalo y zona de Fresnel

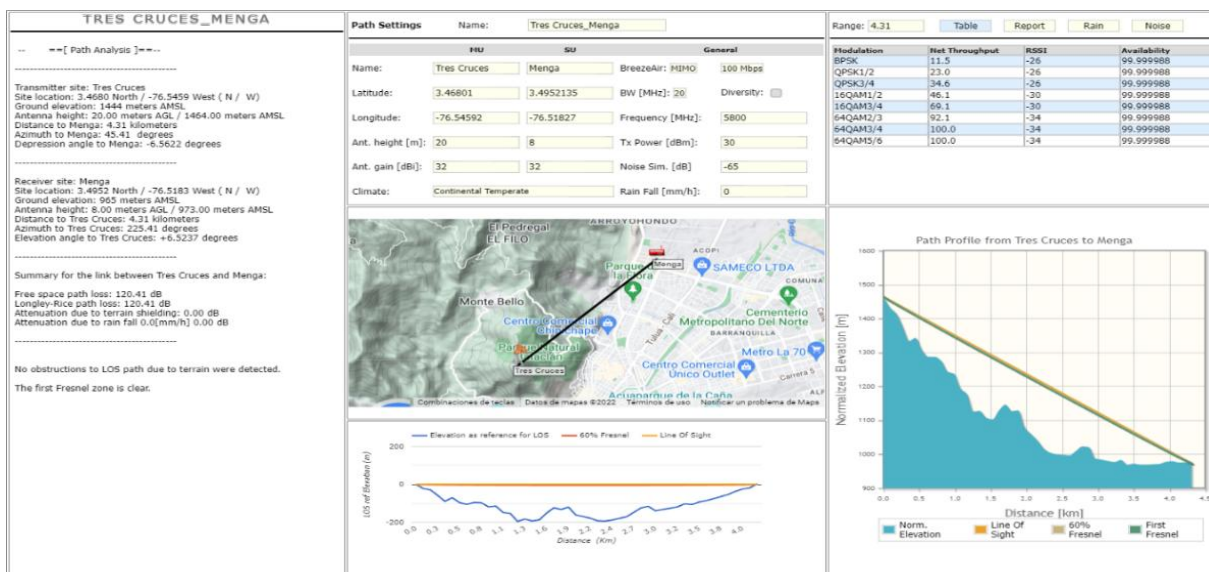


Nota. Se visualiza la trayectoria sobre el terreno considerando curvatura efectiva estándar ($k=4/3$).

La simulación permite confirmar línea de vista y distancia de primer cruce con el relieve, útil para validar alturas de torres.

Figura 6

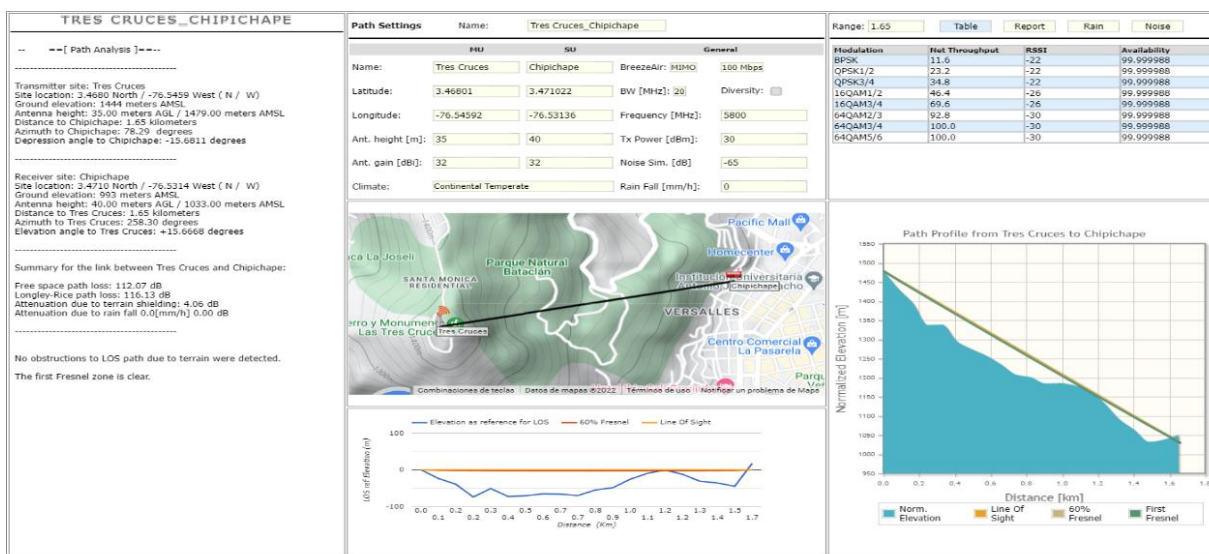
Perfil del enlace Tres Cruces - Menga y zona de Fresnel.



Nota. Se presenta el RSL esperado con los parámetros de potencia, ganancias y pérdidas. Este valor se usa para calcular el margen de desvanecimiento frente al umbral del receptor.

Figura 7

Perfil del enlace Tres Cruces - Menga y zona de Fresnel.

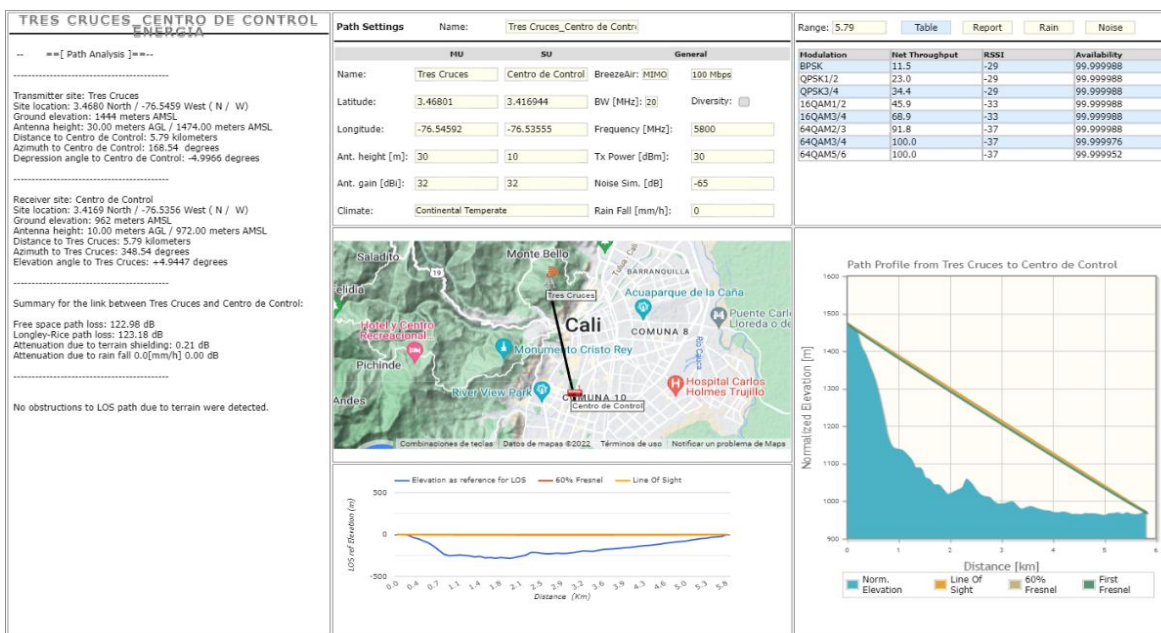


Nota. La curva de FSPL ilustra el incremento de pérdidas con la distancia a la frecuencia simulada.

Apoya la elección de diámetro de antena y EIRP necesarios

Figura 8

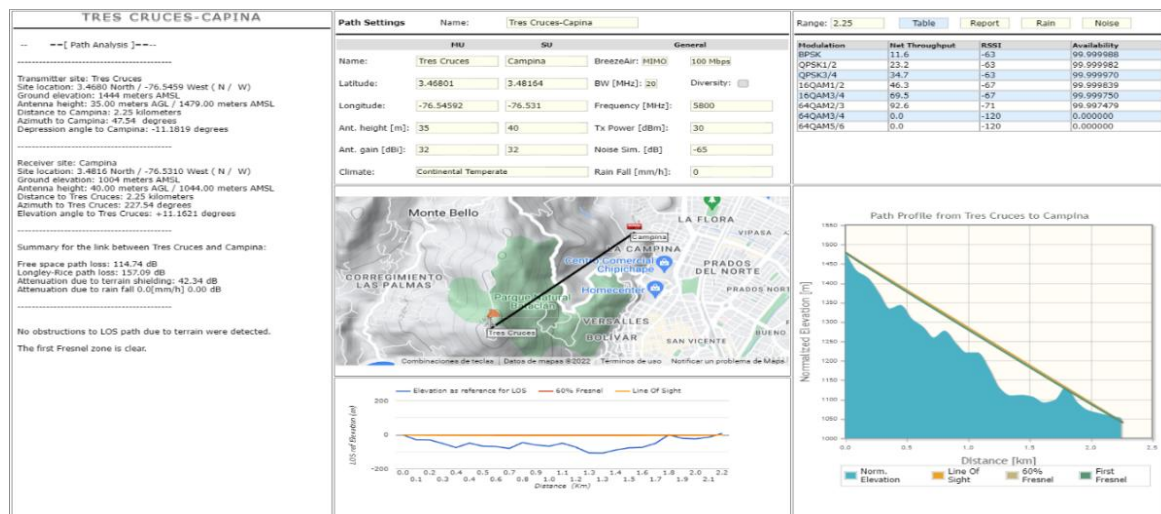
Perfil del enlace Tres Cruces – Centro de Control Maestro y zona de Fresnel



Nota. Se estima el fade margin como diferencia entre RSL y umbral de sensibilidad. Un margen adecuado respalda metas de disponibilidad.

Figura 9

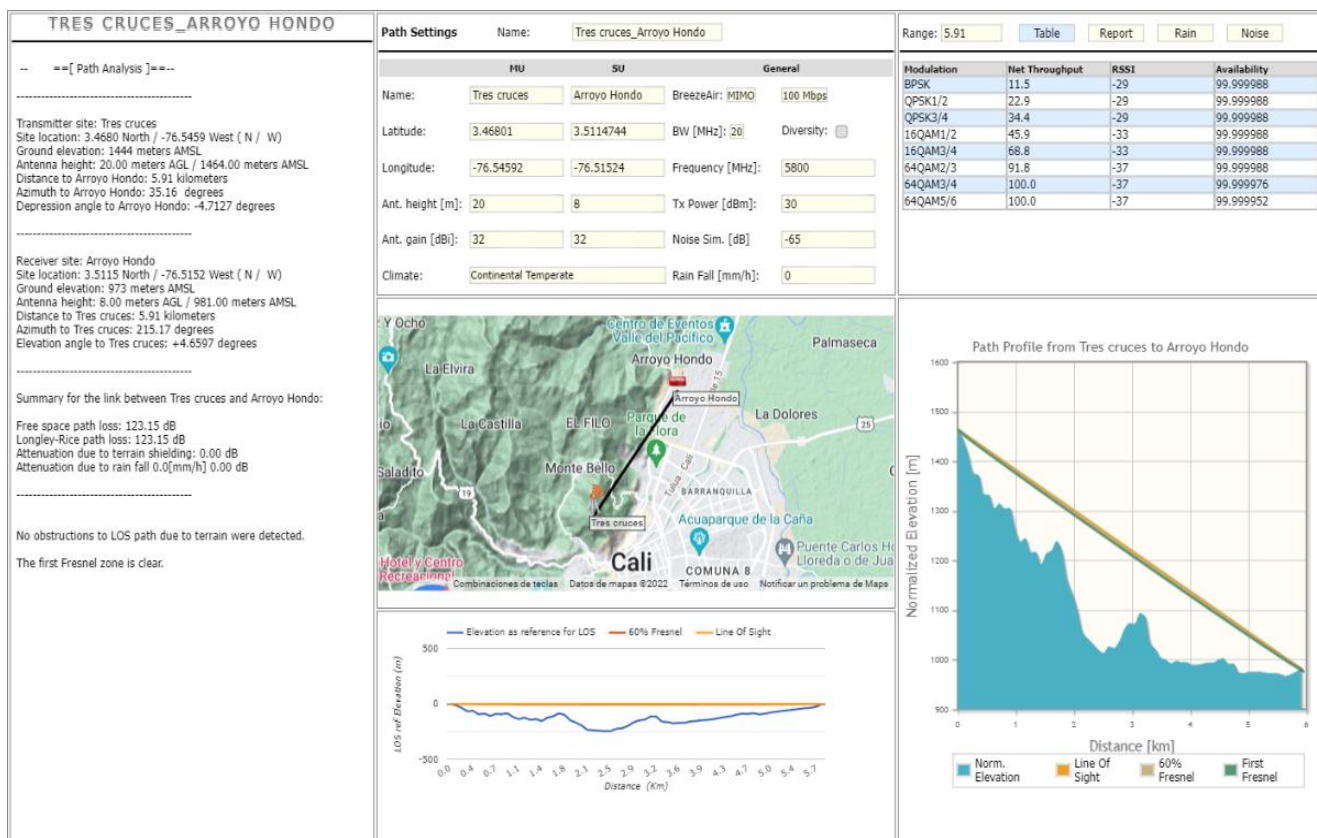
Perfil del enlace Tres Cruces – Campina y zona de Fresnel



Nota. Proyección de disponibilidad (%) bajo supuestos de clima/llovía de la ruta. Apoya la verificación del SLA objetivo (p. ej., $\geq 99.0\%$).

Figura 10

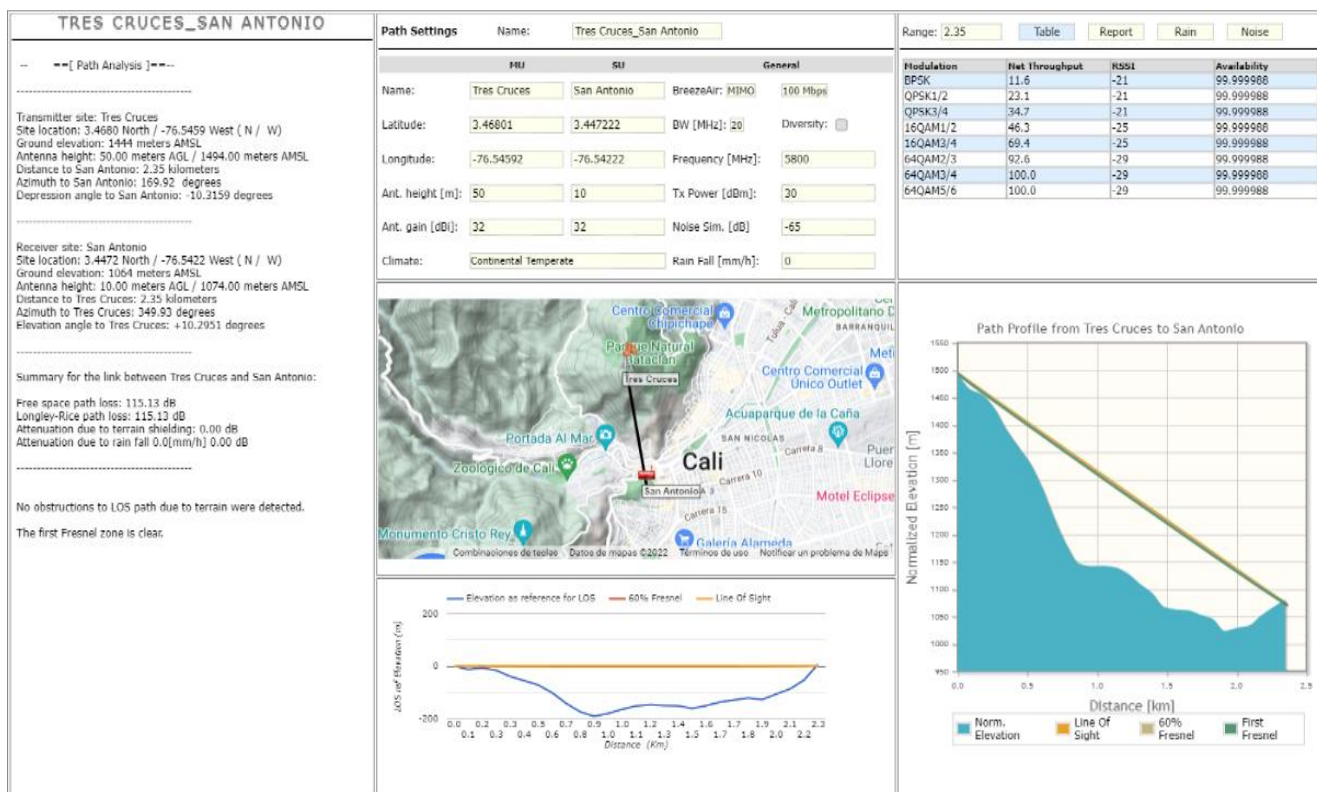
Perfil del enlace Tres Cruces – Arroyo Hondo y zona de Fresnel



Nota. Relaciona modulación / throughput con la calidad de señal. Sirve para ver el impacto de una variación del RSL en capacidad efectiva

Figura 11

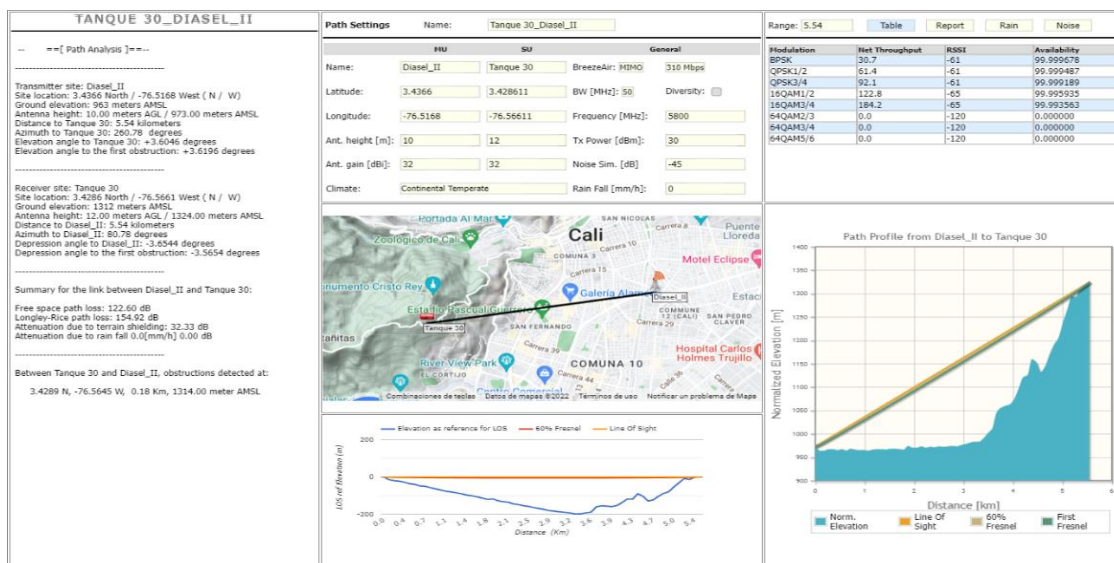
Perfil del enlace Tres Cruces – San Antonio y zona de Fresnel



Nota. Muestra el lóbulo principal y lóbulo lateral de la antena, relevante para evaluar directividad y rechazo de interferencias.

Figura 12

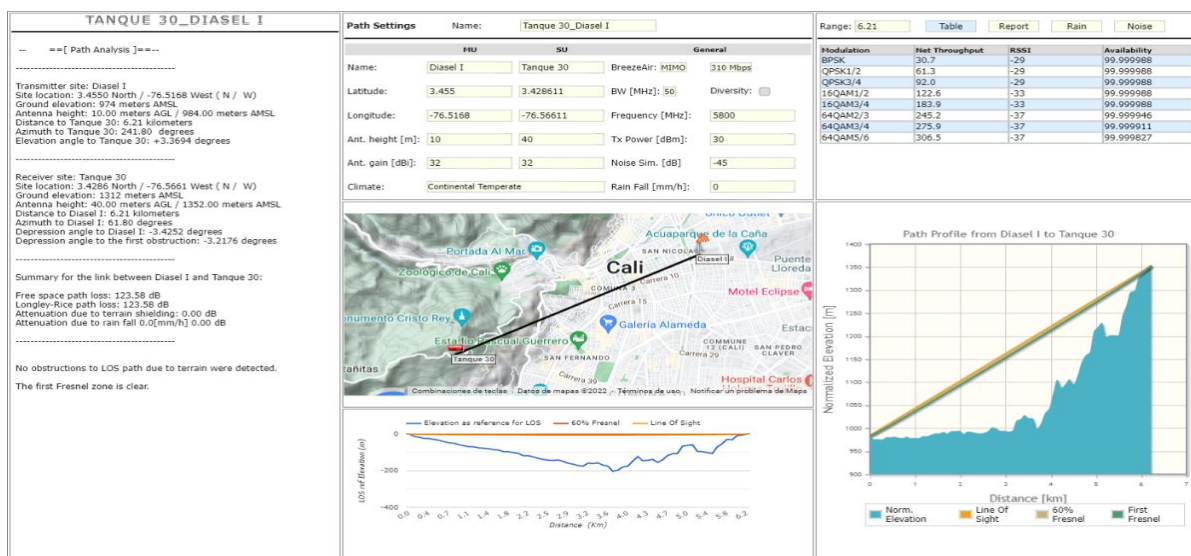
Perfil del enlace Tres Cruces – Tanque 30 y zona de Fresnel



Nota. Indica azimut y tilt requeridos para apuntar cada antena. Referencia práctica para la instalación y verificación en campo.

Figura 13

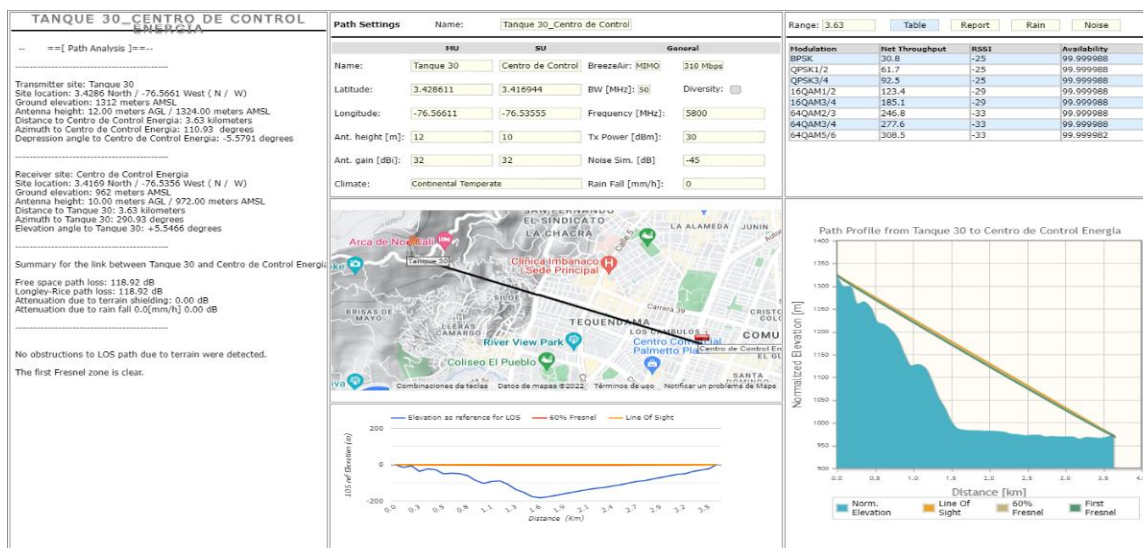
Perfil del enlace Tres Cruces – DiaseI I y zona de Fresnel



Nota. Se comparan perfiles con diferentes k (p. ej., 1.0, 4/3, 2.0). Útil para analizar ducting/superrefracción y su efecto en el despeje.

Figura 14

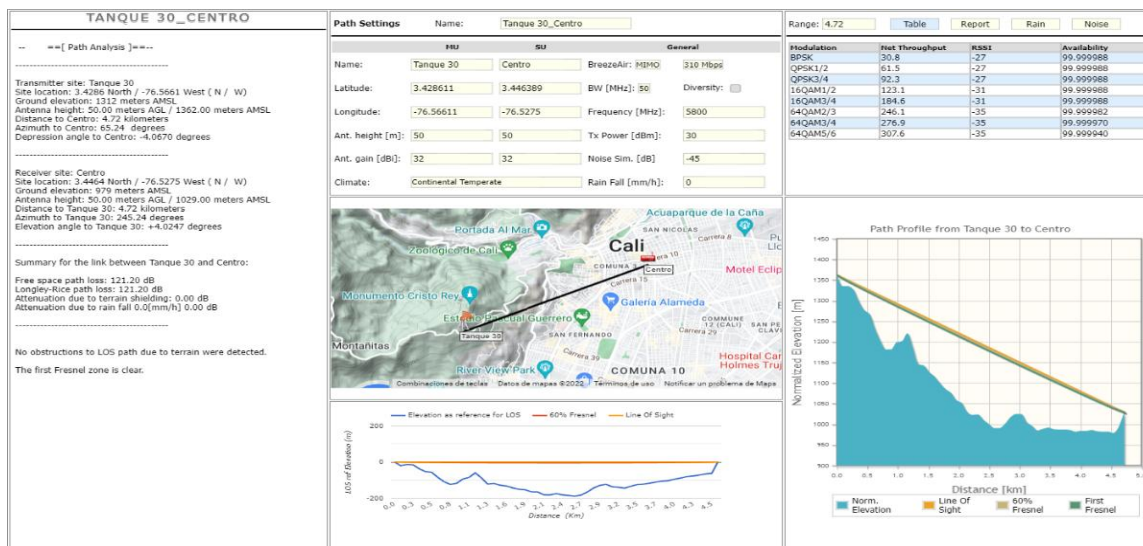
Perfil del enlace Tanque 30 Centro de Control Maestro y zona de Fresnel.



Nota. Indica azimut y tilt requeridos para apuntar cada antena. Referencia práctica para la instalación y verificación en campo.

Figura 15

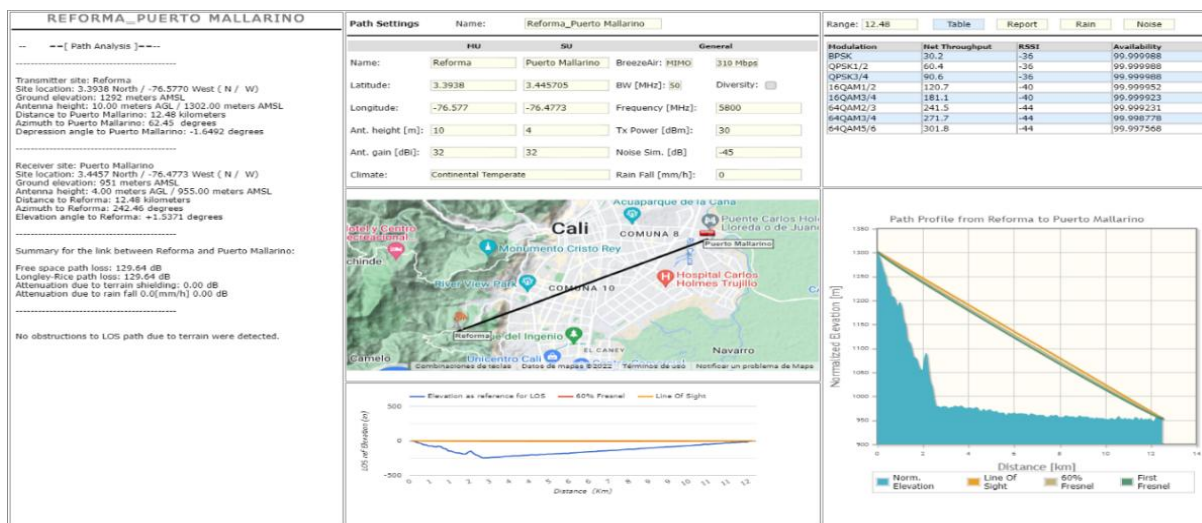
Perfil del enlace Tanque 30 Centro y zona de Fresnel



Nota. Representa niveles RSS en el entorno cercano, útil para validar accesos auxiliares, pruebas o interferencias locales.

Figura 16

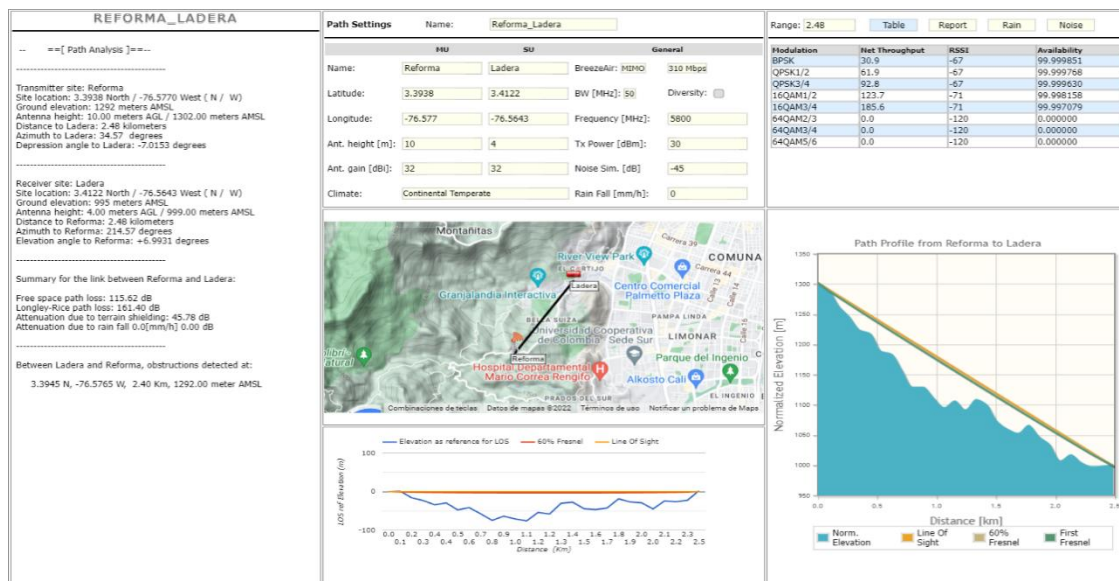
Perfil del enlace Tanque 30 Puerto Mallarino y zona de Fresnel



Nota. Considerando fuentes co-canal/adyacentes. Ayuda a confirmar que el enlace cumple con protección contra interferencia.

Figura 17

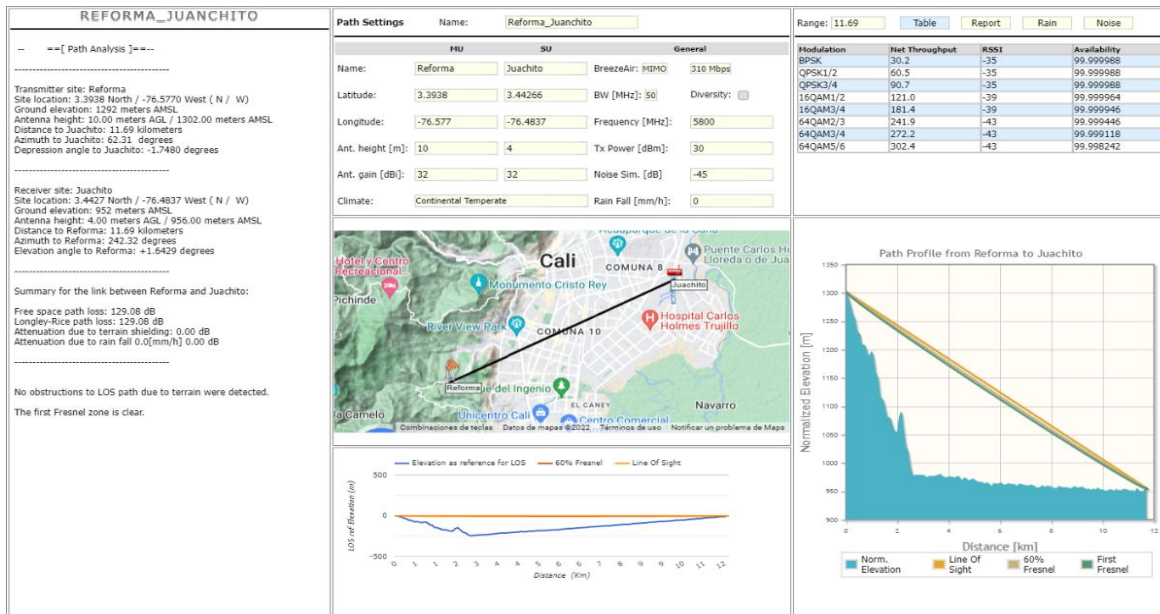
Perfil del enlace Tanque 30 Ladera y zona de Fresnel



Nota. Se incluyen clutters (arbolado/edificaciones). Permite identificar la necesidad de mayor altura o reubicación de torres.

Figura 18

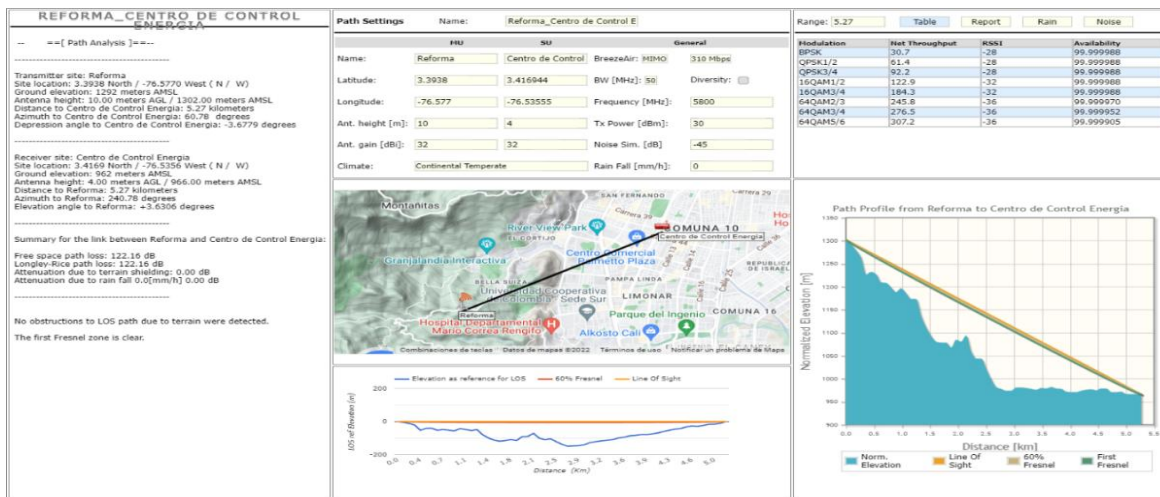
Perfil del enlace Tanque 30 Juanchito y zona de Fresnel



Nota. Contrasta los criterios de despeje. El 80% añade margen frente a variaciones ambientales y oscilaciones del trayecto

Figura 19

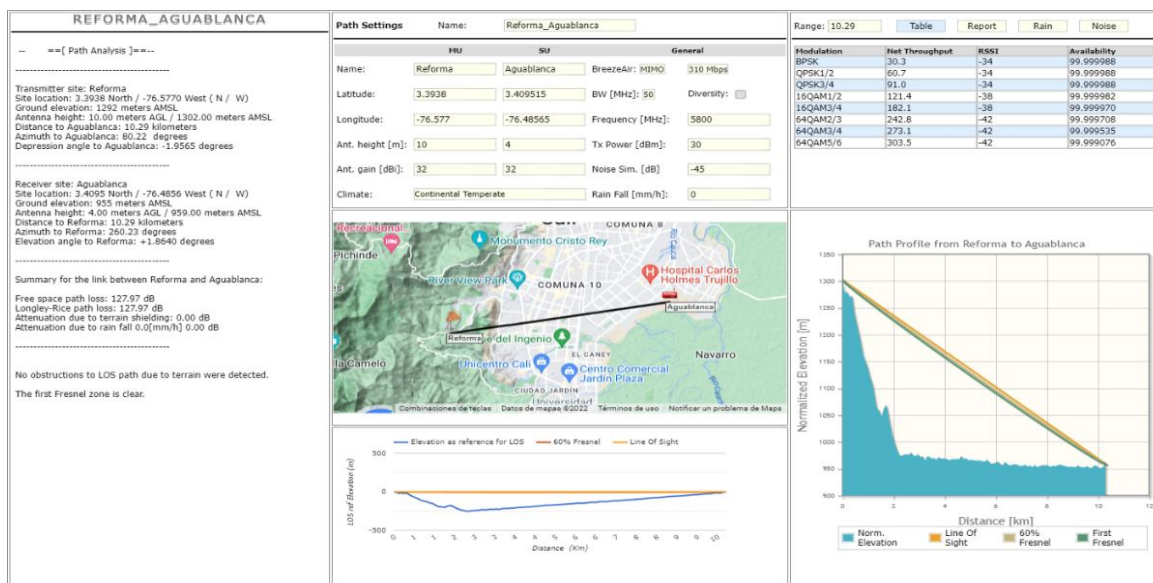
Perfil del enlace Reforma Centro de Control Maestro y zona de Fresnel



Nota. Distribución de eventos de fading por severidad/frecuencia. Sustenta la elección de margen y modulación adaptativa.

Figura 20

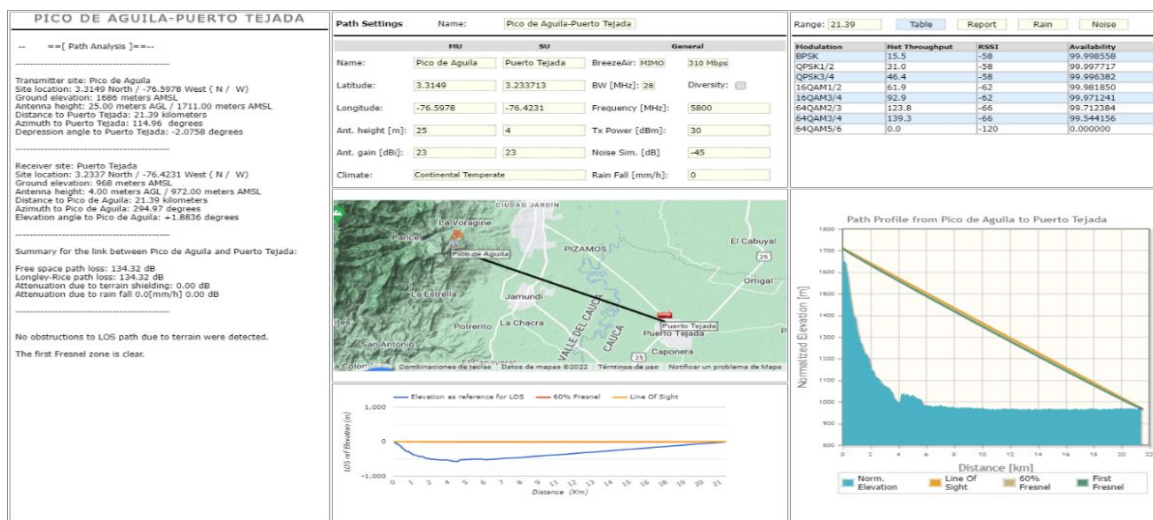
Perfil del enlace Reforma Agua Blanca y zona de Fresnel



Nota. Ubica el enlace en su zona pluviométrica de referencia ITU-R, insumo para atenuación por lluvia y disponibilidad

Figura 21

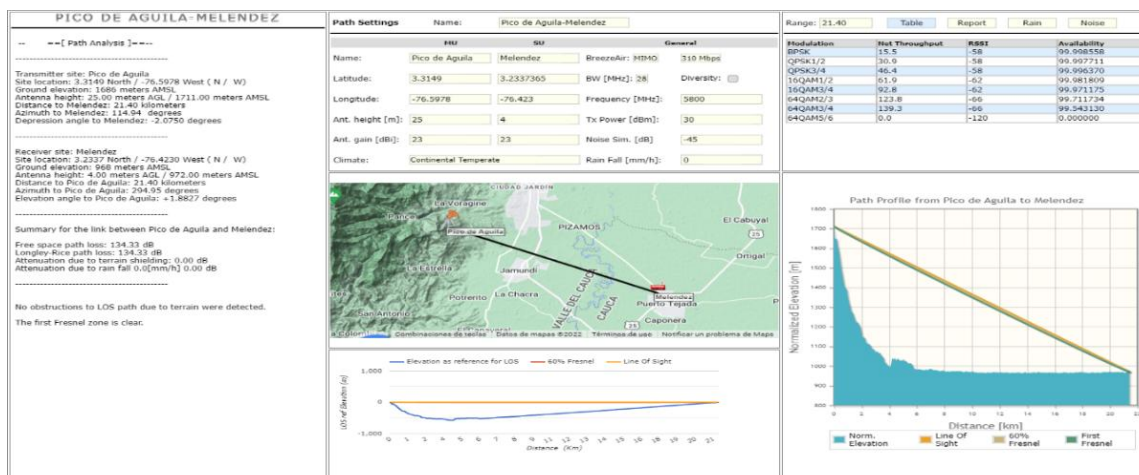
Perfil del enlace Pico de Aguila Puerto Tejada y zona de Fresnel



Nota. Presupuesto de enlace: potencias, ganancias y pérdidas. Resumen del link budget (EIRP, pérdidas en espacio libre, cables/conectores, RSL). Facilita justificar el diseño seleccionado.

Figura 22

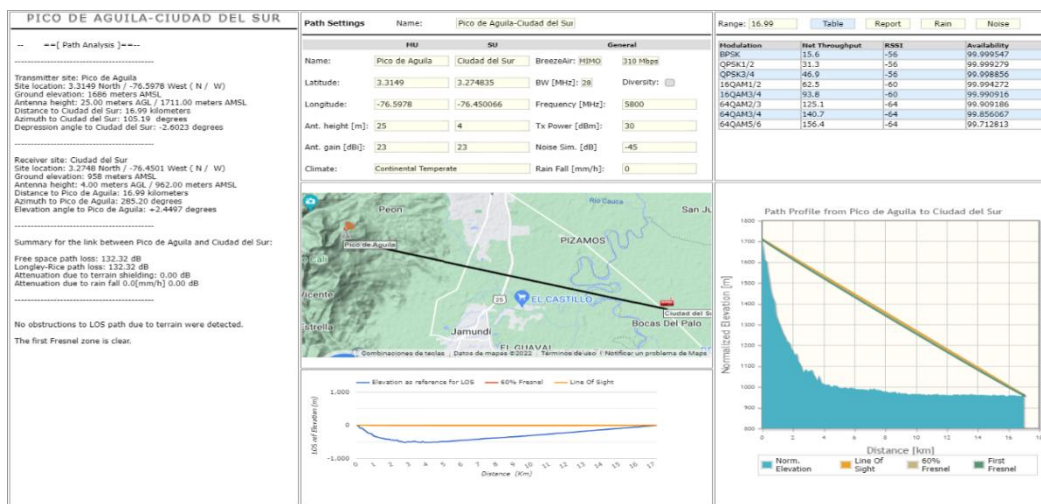
Perfil del enlace Pico de Águila Meléndez y zona de Fresnel



Nota. Plan de frecuencias / canalización del sistema. Presenta frecuencias asignadas y separaciones, útil para mitigar intermodulación e interferencia adyacente.

Figura 23

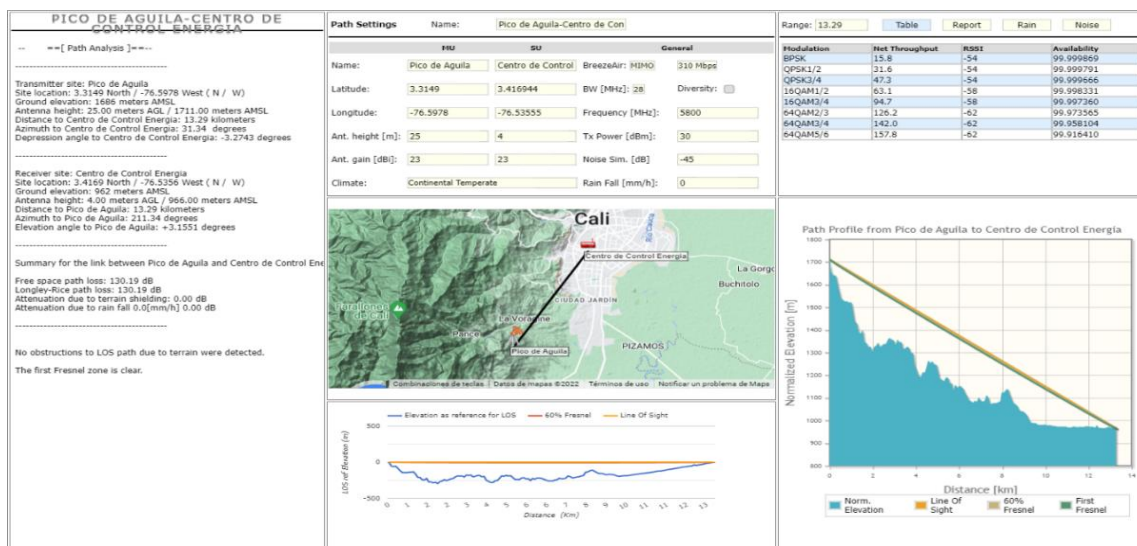
Perfil del enlace Pico de Águila Ciudad del Sur y zona de Fresnel



Nota. Desglose de pérdidas pasivas (feeder, jumpers, conectores) que impactan el RSL. Útil para control de materiales e instalación

Figura 24

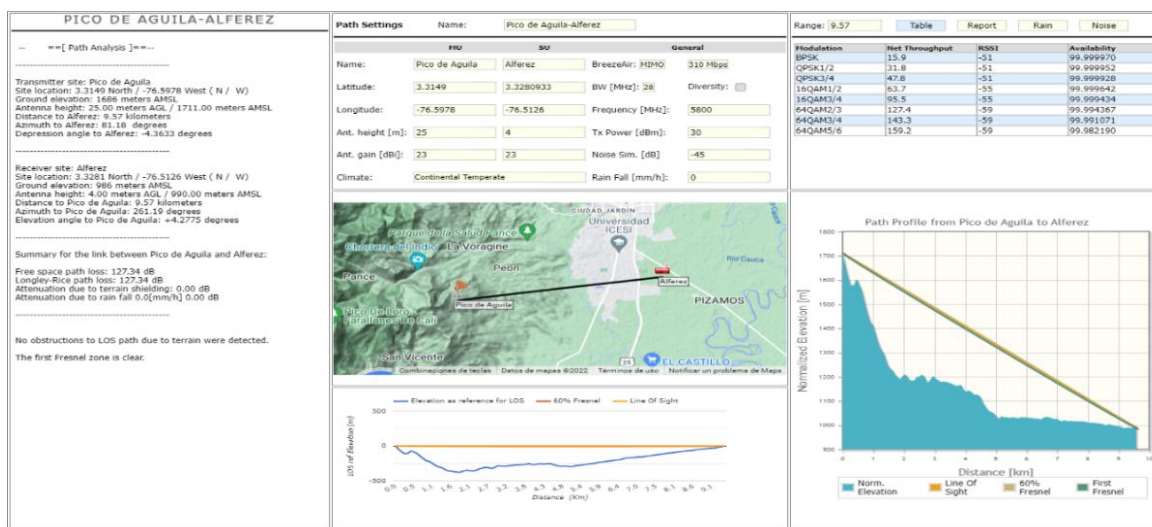
Perfil del enlace Pico de Águila Centro de Control Maestro y zona de Fresnel



Nota. Compara alturas actuales vs. requeridas para cumplir Fresnel. Insumo para ingeniería civil y costos.

Figura 25

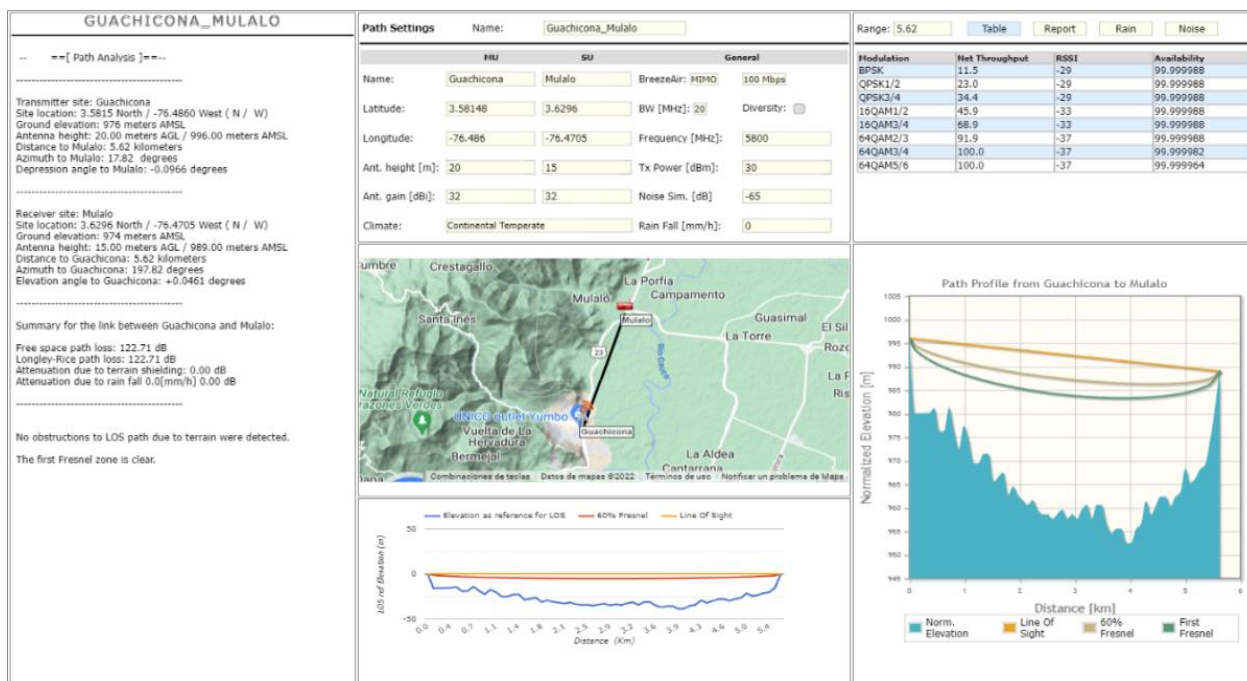
Perfil del enlace Pico de Águila Alférez y zona de Fresnel



Nota. Muestra el comportamiento con polarización cruzada para aumentar capacidad y reducir interferencias.

Figura 26

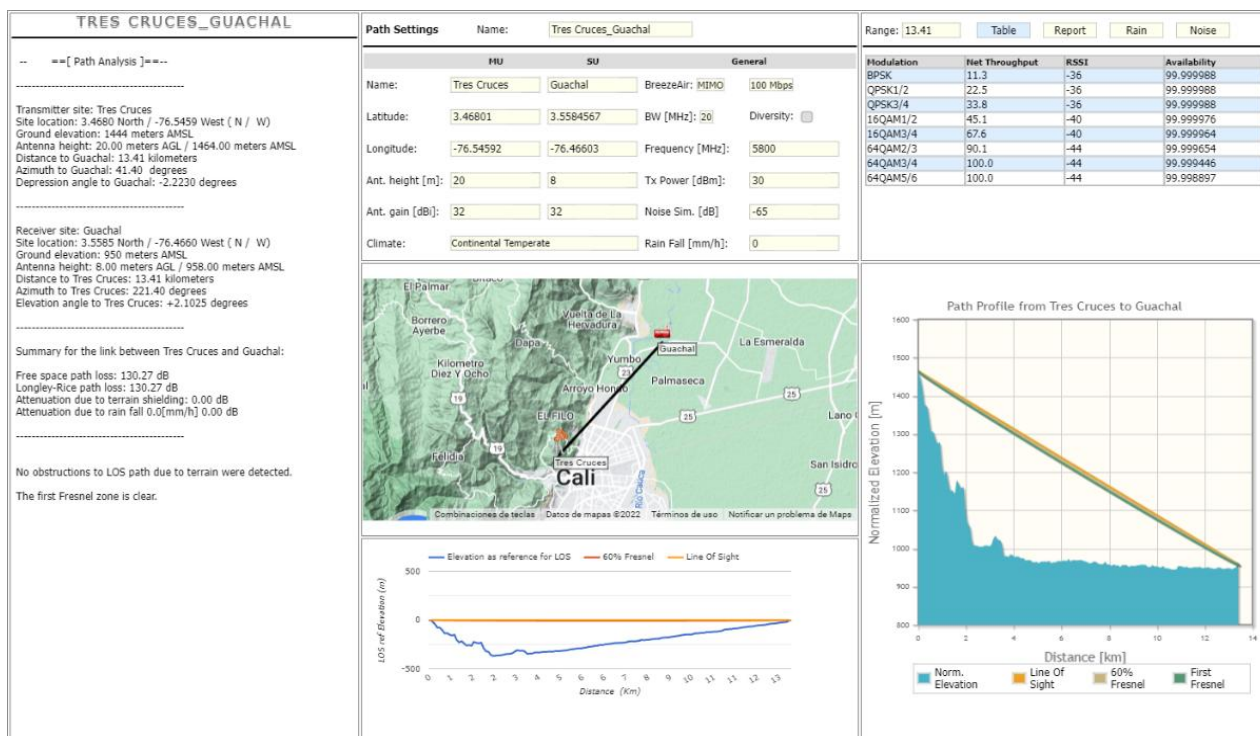
Perfil del enlace Guachicona Mulalo y zona de Fresnel



Nota. Evalúa la caída de RSL/CINR ante errores de apuntalamiento. Útil para definir tolerancias de instalación y mantenimiento.

Figura 27

Perfil del enlace Guachicona Guachal y zona de Fresnel



Nota. El gráfico muestra el relieve entre los sitios, las alturas de torre y la primera zona de Fresnel al 60%, criterio mínimo para línea de vista efectiva en radioenlaces. Sirve para verificar despeje y puntos de posible obstrucción a lo largo de la ruta simulada. Se presenta el RSL esperado con los parámetros de potencia, ganancias y pérdidas. Este valor se usa para calcular el margen de desvanecimiento frente al umbral del receptor.

Modelamiento del diseño lógico

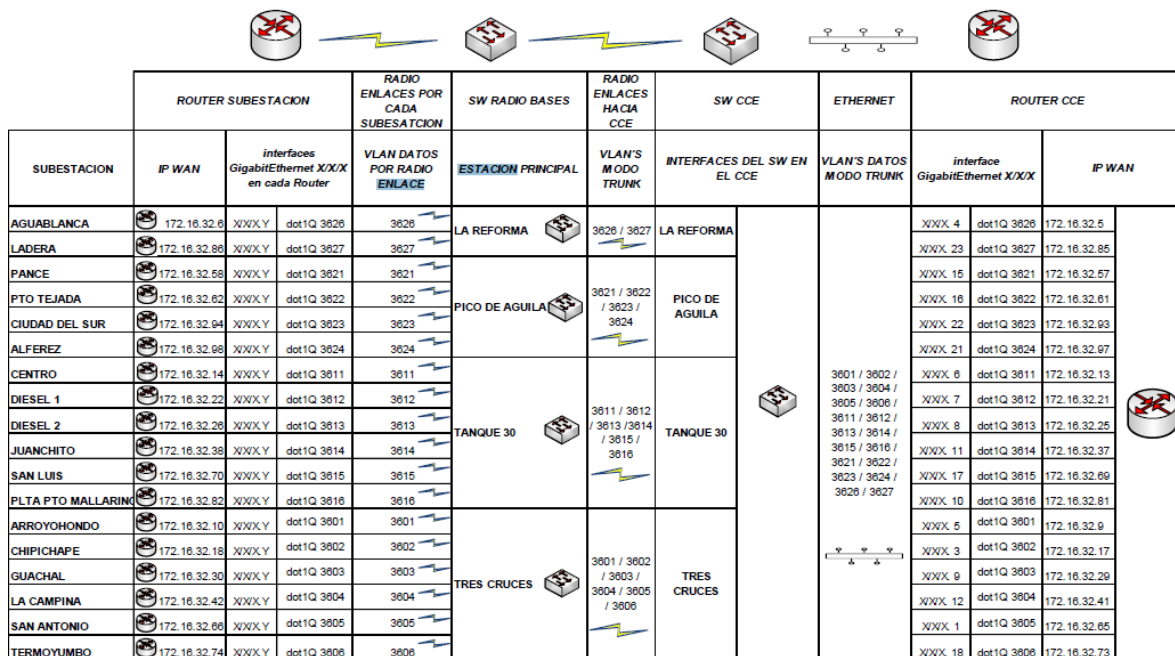
El diseño lógico de la red se implementó con el protocolo IEEE 802.1Q para la segmentación del tráfico. Específicamente, se definió un Enlace Lógico de Capa 2 (L2L) sobre la configuración de los radioenlaces. Esto es conocido como trunking, permite el transporte transparente de múltiples VLANs a través del mismo canal físico inalámbrico.

La segmentación se centró en la creación de dos VLANs principales , asegurando el aislamiento y la seguridad entre los diferentes segmentos:

VLAN de Gestión: Dedicada al tráfico de control, monitoreo y administración de los equipos de red.

VLAN de Servicio: Destinada al transporte del tráfico de datos del usuario final y la entrega del servicio.

Figura 28
Diagrama lógico



Fuente: elaboración propia

Características de los equipos utilizados.

Los siguientes cuadros muestran las especificaciones que deben cumplir obligatoriamente los equipos objeto del proyecto:

Tabla 7

Especificaciones enlaces troncales.

ITEM	ESPECIFICACIONES TECNICAS	REQUERIDO POR EMCALI
	ENLACES TRONCALES	PUNTO A PUNTO
1	Configuración Outdoor	PTP CAMBIUM RADIO PTP550E CONECTORIZADO
2	Rango de frecuencia de operación	4.9 GHz a 6.2 GHz
3	Capacidad neta	Para la banda no licenciada Mínimo 700 Mbps. Los radios ofertados deben ser entregados listos para <i>operar a la máxima capacidad (Mbps)</i> diseñada por el fabricante.
4	Servicios para transportar	Datos, VoIP, IPTV, Videovigilancia
5	Tráfico	La unidad debe soportar paquetes Multicast.
6	Antena	Externa
7	Modulación	BPSK/QPSK/16QAM/64QAM
8	Tipo de modulación	OFDM o Single Carrier
9	Tecnología Dúplex	TDD (Time División Dúplex)
10	Antenas para banda 5.X GHz para los equipos ofertados	Antena ALGCOM UHPX tipo disco, Rango de frecuencias de operación 4.9 - 6.425 GHz, Ángulo de media potencia 3.1° grados, 32 dBi,

		<p>dual polarización Doble (V y H o +/- 45° slant) shielded, Diámetro (3f) 0,9 m.</p> <p>Ganancia banda alta: 33.2 dBi</p> <p>Ganancia banda media: 32.5 dBi</p> <p>Ganancia banda baja: 30.0 dBi</p> <p>Las unidades deben ser entregadas con los herrajes necesarios para la instalación a pared, a torre a través de un mástil, el cual permita la alineación del enlace. Estos dispositivos deben permitir la alineación en azimut y en tilt. <i>Las antenas deben incluir la cantidad de pigtails necesarios para la conexión con el tipo de ODU ofertado. Longitud pigtail 70 cm.</i></p>
11	Modos de Operación Soportados	Master o Slave
12	Tipo de ambiente de trabajo	Intemperie IP67
13	Temperatura de Operación	-40 °C a +60 °C
14	Tamaño de canal	Dos independientes canales configurables como /20/40/80 Mhz
15	Potencia de transmisión	Igual o mayor a 27 dBm
16	Gestión	SNMP V2 y V3, web, telnet, NMS centralizado, NMS por la nube. Sobre el radio enlace (sobre el aire). En banda y/o fuera de banda.

17 Plataforma de Gestión

Gestionado por interface Web desde cualquier computador, sistema operativo e incluso Smartphones o Tablets.

Integrado con Google Maps que permita dibujar los perfiles de la red.

Soporte para clientes NMS de teléfonos inteligentes y tabletas.

Descubrimiento automático de la red.

Monitoreo y configuración de radioenlaces.

Notificaciones, Gestión e informes de alarmas.

Filtros de alarmas e histórico de alarmas.

Analizador de RF.

Analizador de tráfico.

Contadores de estado en tiempo real

Registros en tiempo real.

Históricos de los radios.

Generador de tráfico.

Esta plataforma debe ser suministrada sin costo alguno y a perpetuidad. La Plataforma de gestión debe ser ilimitada para los elementos de red añadidos y debe ser multiusuarios y mínimo 10 usuarios simultáneos. Puede ser alojado en la nube privada de EMCALI o del fabricante. No debe incluir compra de licencias

		por equipos (El número de equipos administrados debe ser ilimitado).
18	Seguridad de encriptación	128-bit AES 2 (dos) puertos 10/100/1000 (GbE), eléctricos (Datos+Entrada de PoE) y/o ópticos integrados en la misma unidad (ODU). Los módulos SFP deben ser suministrados con el equipo (ODU) y deben ser del tipo cobre
19	Interface Ethernet LAN	1000Base - T RJ45. Los 2 (dos) puertos ethernet deben estar integrados en la misma unidad (ODU). No se permiten que ciertas configuraciones u opciones estén en otras unidades diferentes a la unidad exterior (ODU).
20	QoS	CALIDAD DE SERVICIO - Mínimo tres (3) colas de prioridad - Soporte IEEE 802.11p - Soporte IP TOS / DiffServ - Soporte completo de voz - Limitación de tráfico (absoluto, relativo, mezclado) - Re-direccionado de Tráfico 802.1Q, 802.1P, QinQ, Vlan TAG / UNTAG.
21	VLAN	Adicionalmente debe soportar una VLAN ID específica solo para gestión de la unidad.
22	Máximo tamaño de trama soportado	1700 bytes
23	Visor de Espectro	Que sea visible a través del sistema de administración WEB del enlace, que no se

		interrumpa el enlace cuando se visualice el espectro.
24	Alcance	Mayor o igual 50 Km
25	Consumo de energía	Menor o igual a 30 vatios
26	Grado de protección IP	IP/67
27	Actualización (Upgrade)	Esta actualización se debe hacer por software.
	Adaptador de Poder (POE) AC-DC para la	Adaptador de Potencia sobre Ethernet PoE. Se
28	ODU ofertada.	debe incluir con la unidad de radio el adaptador de potencia recomendado por el fabricante para el modelo de radio ofertado.
29	Tipo de Link	Permitir realizar configuraciones 1+0 , 2+0 (Chanel Bonding) En el mismo equipo

Fuente: elaboración propia

Tabla 8

Especificaciones Enlaces acceso

ITEM	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ENLACES ACCESO	REQUERIDO POR EMCALI
1	Configuración Outdoor	Punto a Punto RADIO TELRAD BREEZE AIR 8000
2	Rango de frecuencia de operación	No licenciada de 5.X GHz
3	Capacidad neta	Para banda no licenciada Mínimo 310 Mbps. Los radios ofertados deben ser entregados listos para <i>operar a la capacidad contratada (Mbps)</i>
4	Modulación	BPSK/QPSK/16QAM/64QAM
5	Tipo de modulación	OFDM TDD (Time División Dúplex) y/o FDD
6	Tecnología Dúplex	Configurable y/o técnicas que combinen con la FDD. Antena ALGCOM UHPX tipo disco, Rango de frecuencias de operación 4.9 - 6.425 GHz, Ángulo de media potencia 5.8° grados, 30 dBi, dual polarización Doble (V y H o +/- 45° slant) shielded, Diámetro (2f) 0,6 m.
7	Antena (Externa) Ver Formularios de Cantidades y Precios	Ganancia banda alta: 30.5 dBi Ganancia banda media: 29.5 dBi Ganancia banda baja: 28.5 dBi Las unidades deben ser entregadas con los herrajes necesarios para la instalación a pared, a torre a través de un mástil, el cual permita la alineación del enlace. Estos dispositivos deben permitir la alineación en azimut y en tilt. <i>Las antenas deben</i>

ITEM	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ENLACES ACCESO	REQUERIDO POR EMCALI
		<i>incluir la cantidad de pigtails necesarios para la conexión con el tipo de ODU ofertado. Longitud pigtail 70 cm.</i>
8	Modos de Operación Soportados	MIMO 2x2 y modos de Diversidad ON, OFF y AUTO
9	Tipo de ambiente de trabajo	Intemperie IP67
10	Temperatura de Operación	-40 °C a 60 °
11	Tamaño de canal	La unidad debe soportar configuración de anchos de banda de canal mínimo de 3,5/5/7/10/14/20/28/40/50 MHz.
12	Potencia de transmisión	Hasta 30 dBm, configurables en pasos de 1 dB
13	Gestión	ViewAir NMS, SNMP V2 y V3, WEB, Telnet, Analizador de RF. Gestionado por interface Web desde cualquier computador, sistema operativo e incluso Smartphones o Tablets. Integrado con Google Maps que permita dibujar los perfiles de la red.
14	Plataforma de Gestión	Soporte para clientes NMS de teléfonos inteligentes y tabletas. Descubrimiento automático de la red. Monitoreo y configuración de radioenlaces. Notificaciones, Gestión e informes de alarmas. Filtros de alarmas e histórico de alarmas. Analizador de RF.

ITEM	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ENLACES ACCESO	REQUERIDO POR EMCALI
		<p>Analizador de tráfico.</p> <p>Contadores de estado en tiempo real</p> <p>Registros en tiempo real.</p> <p>Históricos de los radios.</p> <p>Generador de tráfico.</p> <p>Esta plataforma debe ser suministrada sin costo alguno y a perpetuidad. La Plataforma de gestión debe ser ilimitada para los elementos de red añadidos y debe ser multiusuarios y mínimo 10 usuarios simultáneos. Puede ser alojado en la nube privada de EMCALI o del fabricante. No debe incluir compra de licencias por equipos (El número de equipos administrados debe ser ilimitado).</p>
15	Seguridad	<p>128-bit AES y autenticación a nivel de MAC</p> <p><i>Dos (2) puertos 10/100/1000 (GbE), eléctricos (Datos+Entrada de PoE en ambos puertos) integrados en la misma unidad (ODU). Los 2 (dos) puertos ethernet deben estar integrados en la misma</i></p>
16	Interface Ethernet LAN	<p><i>unidad (ODU) y deben poder ser utilizados cada uno para dato y alimentación por separado. No se permiten que ciertas configuraciones u opciones estén en otras unidades diferentes a la unidad exterior (ODU).</i></p>
17	Configuración	<p>Los radios ofertados deben ser entregados listos para operar a la capacidad contratada de 310</p>

ITEM	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ENLACES ACCESO	REQUERIDO POR EMCALI
		<i>Mbps</i> . Esta configuración se debe hacer por software.
18	QoS	<p><i>CALIDAD DE SERVICIO</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Ocho (8) colas de prioridad - Soporte IEEE 802.1p - Soporte IP TOS - DSCP
19	VLAN	Transparent, VLAN filter, 802.1Q, 802.1P, QinQ, Vlan TAG / UNTAG. Adicionalmente debe soportar una VLAN ID específica solo para gestión de la unidad.
20	Soporte de Jumbo Frames y PPS	Soporte Jumbo Frame mínimo 3000 Bytes y 400.000 PPS
21	Visor de Espectro	Que sea visible a través del sistema de administración WEB del enlace, que no se interrumpa el enlace cuando se visualice el espectro.
22	Actualización (Upgrade)	Esta actualización se debe hacer por software.
23	Alcance	Mayor o igual 30 Km
24	Consumo de energía	Menor o igual a 7 vatios
25	Grado de protección IP	IP/67
26	Adaptador de Poder (POE) AC-DC para la ODU ofertada. Adaptador de Poder (POE) AC-DC para la ODU ofertada. Estos adaptadores deben cumplir con la norma Eléctrica Colombiana.	Adaptador de Potencia sobre Ethernet PoE. Se debe incluir con la unidad de radio el adaptador de potencia recomendado por el fabricante para el modelo de radio ofertado.

ITEM	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ENLACES ACCESO	REQUERIDO POR EMCALI
27	Safety standards / EMC	<p>Electric safety: CE (EMC Directive 2004/108/EC and Low Voltage Directive 2006/95/EC)</p> <p>UL/cUL recognized to UL 60950-1 and CSA C22.2 No. 60950-1</p> <p>UL/cUL recognized to UL 62368-1 and CSA C22.2 No. 62368-1</p> <p>UL/cUL listed to UL 508 and CSA C22.2 No. 107.1-01</p> <p>CB scheme to IEC 60950-1, LPS</p> <p>EMC/ Industry standards:</p> <p>FCC part 15B</p>

Fuente: elaboración propia

Tabla 9

Especificaciones switch

ITEM	ESPECIFICACIONES TECNICAS SWITCH Y FUDENTES DE PODER	REQUERIDO POR EMCALI
1	Switch CISCO 20 puertos (Se debe incluir Soporte de Fábrica 8X5XNBD por 1 (uno) año)	<ul style="list-style-type: none"> • Product number: IE-3100-18T2C-E • Sistema operativo: CISCO IOS • Total ports: 20 • 10/100/1000 Mbps RJ-45 ports (downlinks): 8 • 1G SFP fiber ports (uplinks): 0 • 1G combo ports (uplinks): 2 • Software license: Network Essentials • Removable storage: SD card • Alarms: 2 dry-contact alarm inputs • Console ports: 1 RS-232 (via RJ-45), 1 Micro USB • Power inputs: DC power inputs • Input Voltage Range: 12V to 48V nominal 9.6V to 60V absolute • Power consumption: 36.7W • Dimensions (H x W x D): 5.00 x 4.30 x 5.08 in (12.70 x 10.92 x 12.90 cm) • Weight: 2.8 lb (1.27 kg) • Mounting: DIN Rail • Soporte de Fábrica 8X5XNBD por 1 (uno) año
2	Switch CISCO 10 puertos (Se debe incluir Soporte de Fábrica 8X5XNBD por 1 (uno) año)	<ul style="list-style-type: none"> • Product number: IE-3100-8T2C-E • Sistema operativo: CISCO IOS • Total ports: 10 • 10/100/1000 Mbps RJ-45 ports (downlinks): 8

ITEM	ESPECIFICACIONES TECNICAS SWITCH Y FUDENTES DE PODER	REQUERIDO POR EMCALI
3	<p>Fuente de Alimentación CISCO</p> <p>(Se debe incluir Soporte de Fábrica 8X5XNBD por 1 (uno) año)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 1G SFP fiber ports (uplinks): 0 • 1G combo ports (uplinks): 2 • Software license: Network Essentials • Removable storage: SD card • Alarms: 2 dry-contact alarm inputs • Console ports: 1 RS-232 (via RJ-45), 1 Micro USB • Power inputs: DC power inputs • Input Voltage Range: 12V to 48V nominal 9.6V to 60V absolute • Power consumption: 17.7W • Dimensions (H x W x D): 5.00 x 3.00 x 4.33 in. (12.70 x 7.62 x 11.00 cm) • Weight: 1.9 lb (0.86 kg) • Mounting: DIN Rail • Soporte de Fábrica 8X5XNBD por 1 (uno) año <ul style="list-style-type: none"> • PWR-IE50W-AC-IEC • Product description: 50W AC to DC power supply. Entrada AC conector NEMA • Rated nominal input operating range: AC 100-240V/1.2A, 50-60Hz • Supported input voltage operating range: Supported input voltage operating range • Typical efficiency: Typical efficiency • Inrush current at 25C ambient: Inrush current at 25C ambient • Nominal output voltage / adjustment range: 24VDC / 24-28VDC, 2.1A • Max output power: 50W • Holdup time at 100% load: 20ms • Protections: Over voltage protection - Over current protection • Over temperature protection - Short circuit protection

ESPECIFICACIONES TECNICAS		REQUERIDO POR EMCALI
ITEM	SWITCH Y FUDENTES DE PODER	
		<ul style="list-style-type: none"> • Dimensions (W x H x D): 30 mm x 75 mm x 89.5 mm • 1.18 in x 2.95 in x 3.52 in • Weight: 0.39 lb (0.18 kg) • Soporte de Fábrica 8X5XNBD por 1 (uno) año)

Fuente: elaboración propia

Tabla 10

Especificaciones cables

ESPECIFICACIONES TECNICAS		REQUERIDO POR EMCALI
ITEM	CABLES, CONECTORES, ACCESORIOS Y ELEMENTOS DE MONTAJE	
1	Adaptador de Poder (POE) AC-DC para la ODU ofertada. Estos adaptadores deben cumplir con la norma Eléctrica Colombiana.	Adaptador de Potencia sobre Ethernet PoE. Se debe incluir con la unidad de radio el adaptador de potencia recomendado por el fabricante para el modelo de radio ofertado.
2	Protecciones tipo Outdoor contra descargas eléctricas.	Se debe ofertar el protector recomendado por el fabricante para el modelo de radio ofertado.
3	Pigtail (70 cm de longitud) Para ambas ODU ofertadas	Se utilizarán para las conexiones de las ODU a las antenas. Las unidades ODU deben incluir la cantidad de pigtails necesarios para la conexión de la ODU con el tipo de antena ofertada. Los pigtail deben ser de por lo menos 60 cm de longitud cumplir con el tipo de cable, impedancia, conectores y demás características técnicas para lograr la adecuada conexión entre los equipos ODU y antenas ofertadas.

ESPECIFICACIONES TECNICAS		
ITEM	CABLES, CONECTORES, ACCESORIOS Y ELEMENTOS DE MONTAJE	REQUERIDO POR EMCALI
		<i>Las antenas deben incluir la cantidad de pigtails necesarios para la conexión con el tipo de ODU ofertado.</i>
		Carrier Class
		Carrete de 1000 ft.
		Cable CAT5e, Shielded, Ethernet Support Up to 1 Gbps, Conductor Wire Gauge 24 AWG, Conductor Solid Bare Copper, Conductor Diameter 0.500 ± 0.005 mm, Insulation Type Solid PE, Insulation Thickness Avg. 0.295 mm Min. 0.29 mm, Insulation Diameter 1.16 ± 0.02 mm, Separation (Polyester Wrapping) Thick: 0.025 mm, Extent: 20 mm, Anti-Crosstalk Divider LDPE: 4.2*0.3 mm, Cable Shield (Aluminum Foil) Thick: 0.060 mm, Extent: 20 mm, ESD Drain Wire 0.4 TC, Rip Cord Yes, Secondary Cable Shield (Braid) 16*8*0.16AA Density: 95%, Jacket Material PE, Jacket Thickness Avg. 0.52 mm Min. 0.46 mm, Jacket Outer Diameter 6.8 ± 0.30 mm, Jacket Color Black, Reference Standard ISO/IEC 11801, TIA/EIA568B.2, Installation Temperature -20 to 60° C (-4 to 140° F), Storage Temperature -30 to 75° C (-22 to 167° F), Operation Temperature -40 to 80° C (-40 to 176° F).
4	Cable UTP (Carrier Class Carrete de 1000 ft.)	

ESPECIFICACIONES TECNICAS		
ITEM	CABLES, CONECTORES, ACCESORIOS Y ELEMENTOS DE MONTAJE	REQUERIDO POR EMCALI
		<p><i>El Cable se debe entregar con la hoja de especificaciones del fabricante.</i></p> <p><i>Nota: Una unidad de medida (Uni) corresponde a un rollo de 1000 ft. Ver Formulario de ítems y cantidades.</i></p>
5	Funciones hardware y/o software	<p>Todas las funciones hardware y/o software deben estar dentro de la unidad. No se permiten que ciertas configuraciones u opciones estén en otras unidades diferentes a la unidad exterior.</p>
6	Resistencia de la unidad contra descargas eléctricas.	<p>La unidad debe tener un tornillo de tierra al cual se pueda conectar la tierra con el cable adecuado para mejorar la resistencia de la unidad a descargas eléctricas. Especificar el cable recomendado para este aterrizaje.</p>
7	Protecciones de la unidad a descargas eléctricas.	<p>La unidad debe ser entregada con todos los dispositivos necesarios para brindar protección contra descargas eléctricas.</p>
8	Accesorios para las unidades ODU	<p>Las unidades de radio (ODU) deben ser entregadas con los herrajes necesarios para la instalación a pared, a torre a través de un mástil, el cual permita la alineación del enlace (caso de antena integrada). Estos dispositivos (herrajes) deben permitir la alineación en azimut y en tilt.</p>

ESPECIFICACIONES TECNICAS		
ITEM	CABLES, CONECTORES, ACCESORIOS Y ELEMENTOS DE MONTAJE	REQUERIDO POR EMCALI
9	Accesorios para las antenas	<p>Las antenas deben ser entregadas con los herrajes necesarios para la instalación a pared, a torre a través de un mástil, el cual permita la alineación del enlace. Estos dispositivos (herrajes) deben permitir la alineación en azimut y en tilt.</p> <p>Módulo SFP Cobre – Cable Cat5e – Par trenzado con blindaje</p> <p>Conector RJ45 blindado</p>
10	SFP (Cobre)	<p>Estándares Gigabit Ethernet - 1000BaseT</p> <p>Soporte velocidad de 1000 Mbps.</p> <p><i>Los módulos SFP deben ser suministrados con el equipo (ODU) y deben ser del tipo cobre 1000Base - T RJ45.</i></p> <p>Module type: SFP</p> <p>transmission distance: 15 km</p> <p>transmission medium: single-mode fiber</p> <p>transmission wavelength: 1310 nm</p>
11	SFP (Optical Transceiver Monomodo)	<p>Interface type: Dual LC interface</p> <p>Transmission rate: 1 Gbps</p> <p>Operating voltage: 3.3 v</p> <p>Case metal enclosure, for lower EMI</p> <p>Operating temperature range: -10°C to 70°C</p> <p>Compliant: CE, ROHS, FCC</p>

ESPECIFICACIONES TECNICAS		
ITEM	CABLES, CONECTORES, ACCESORIOS Y ELEMENTOS DE MONTAJE	REQUERIDO POR EMCALI
12	Fuente de Alimentación para los Switches	Las unidades deben ser entregadas con todos los elementos necesarios para la conexión al suministro de AC.
13	Conectores RJ45	Conector RJ45 blindado para uso con el tipo de cable solicitado. Ver especificaciones del Cable UTP solicitado. Nota: Una unidad de medida equivale a una bolsa con 100 unidades.

Fuente: elaboración propia

Despliegue de la Topología.

Se validó la robustez de la arquitectura seleccionada, se instaló y activó un segmento de prueba entre la Subestación de Energía Centro y el Nodo Tanque 30. Los resultados de esta fase de demostración que han sido satisfactorios. Desde su puesta en marcha, el enlace inalámbrico implementado ha demostrado una disponibilidad del 100% a nivel de radiofrecuencia (RF), sin registrar ninguna interrupción o caída del servicio durante el periodo de monitoreo, lo que confirma la viabilidad y la robustez del diseño propuesto. El resto de los equipos y componentes necesarios para completar la instalación de la red de contingencia han sido adquiridos y se encuentran almacenados en las bodegas de EMCALI, pendientes de los procesos internos de liberación para dar continuidad a la fase de despliegue total del proyecto.

Imagen 1.

Nodo tanque 30



Fuente: autor

Imagen 2.

Rack nodo tanque 30



Fuente: Autor

Imagen 3*Subestación energía centro*

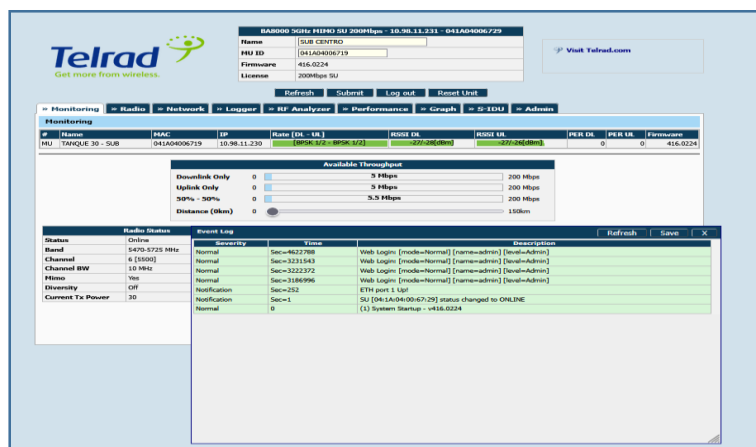
Fuente: Autor

Imagen 4*Rack Subestación centro*

Fuente: Autor

Figura 29

Enlace establecido



Fuente: elaboración propia

Estos son los niveles de potencia deseados para este enlace según datos de simulación.

Monitoreo y gestión de los enlaces

La empresa dispone de un sistema de gestión integral de su infraestructura de telecomunicaciones, que realiza un seguimiento continuo de las incidencias en los radioenlaces y notifica al área operativa cuando es precisa una intervención para corregir posibles errores. Este monitoreo opera las 24 horas del día, los 7 días de la semana.

El sistema de gestión es clave operar los radioenlaces de Telrad Management System (NMS). Es la plataforma centralizada que permite un control total sobre su infraestructura de radio.

Monitoreo del Enlace: Permite visualizar el estado y el rendimiento de cada radioenlace individual. Esto incluye:

Nivel de Señal (RSSI/RSRP): Verificación de la intensidad de la señal recibida en ambos extremos del enlace.

Calidad de la Señal (SINR/CINR): Indicadores cruciales de la calidad del enlace, que reflejan la relación señal-a-ruido e interferencia.

Rendimiento (Throughput): Monitoreo del tráfico de datos (subida y bajada) que pasa por el radioenlace en tiempo real.

Latencia y Jitter: Importante para servicios sensibles al tiempo como la voz y el video.

Estado del Enlace: Si el enlace está activo, caído, o experimentando problemas.

Configuración y Aprovisionamiento: A través del sistema , se pueden configurar de forma remota todos los parámetros de los equipos que conforman el radioenlace:

Frecuencias y anchos de canal.

Potencias de transmisión.

Perfiles de QoS (Calidad de Servicio) para priorizar el tráfico.

Parámetros de seguridad (cifrado, autenticación).

Aprovisionamiento de nuevos CPEs de manera "zero-touch" o con mínima intervención en sitio.

Gestión de Fallas y Alarmas: Si un radioenlace presenta una degradación o una falla, genera alarmas y eventos. Esto permite identificar rápidamente la ubicación del problema y comenzar la resolución de incidencias.

Análisis de Rendimiento y Tendencias: Recopila datos históricos de rendimiento, lo que permite a los ingenieros:

Identificar tendencias de uso y congestión.

Realizar planificación de capacidad.

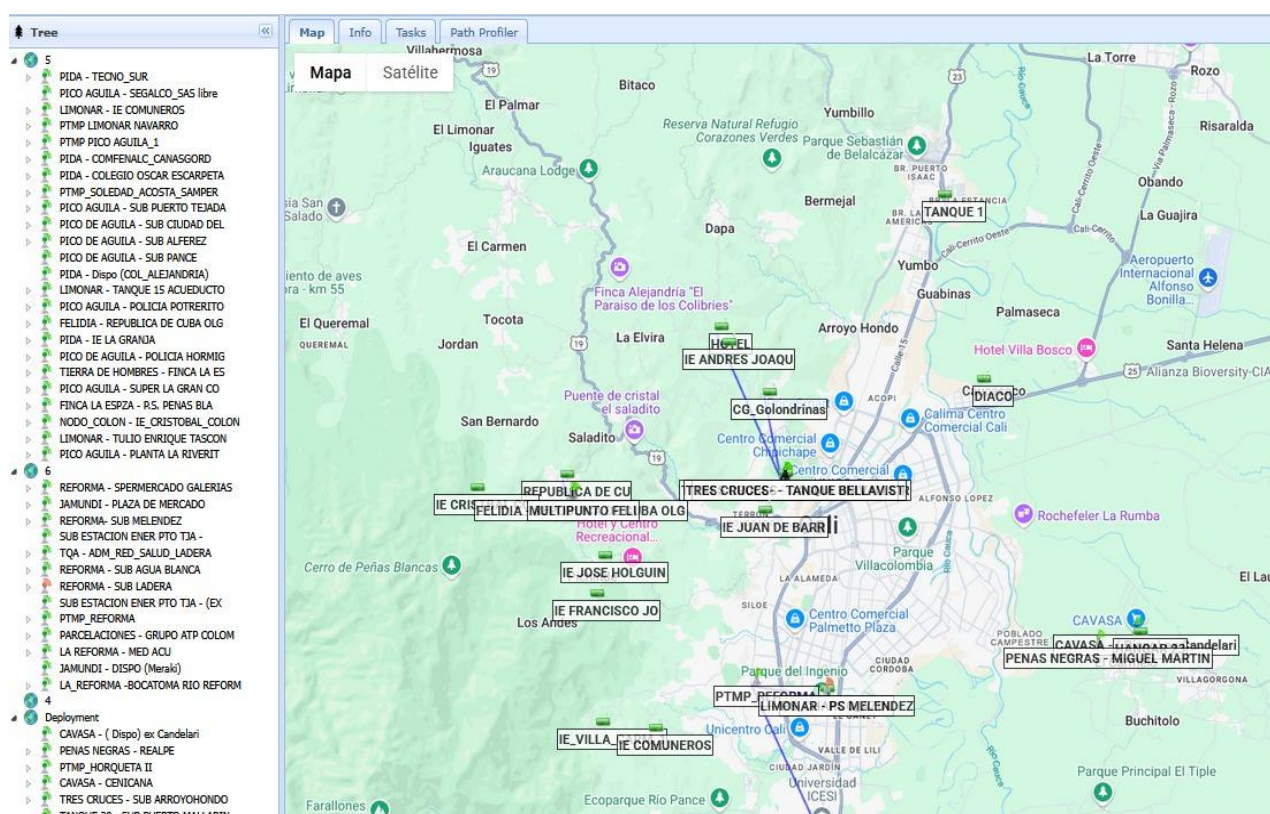
Optimizar la red para mejorar la eficiencia y la calidad del servicio a largo plazo.

Visibilidad Topológica y Geográfica: Puede mostrar los radioenlaces en un mapa o en un diagrama topológico, facilitando la visualización de la conectividad.

Mantenimiento Básico: Permite a los técnicos verificar el estado del enlace, reiniciar equipos y realizar configuraciones básicas sin necesidad de acceder a la interfaz web completa de BreezeVIEW desde una computadora.

Figura 30

Sistema de gestión de los radios marca Telrad



Fuente: Sistema de gestión de los radios enlaces utilizados en la red implementada.

Desde su puesta en marcha, el enlace inalámbrico implementado entre la Subestación de Energía Centro y el Nodo Tanque 30 ha demostrado una disponibilidad del 100% en los 4 meses que lleva el enlace, nivel de radiofrecuencia (RF), sin registrar ninguna interrupción o caída del servicio durante el periodo de monitoreo.

Conclusiones

Se analizó de los resultados y el desarrollo de la propuesta de diseño, se establecen las siguientes conclusiones que demuestran el cumplimiento de los objetivos y la viabilidad de la solución propuesta:

Se confirmó la Vulnerabilidad Crítica y el Incumplimiento Regulatorio: El diagnóstico inicial confirmó una vulnerabilidad crítica en la infraestructura de telecomunicaciones de fibra de EMCALI, afectando directamente a 25 subestaciones. Esta falla operacional, causada por obsolescencia y vandalismo, no solo incrementa el riesgo de interrupciones, sino que también dificulta el cumplimiento de los estándares de calidad y disponibilidad exigidos por el organismo regulador (CREG), validando la necesidad del sistema de contingencia.

Se diseñó la Arquitectura Óptima: El diseño del sistema de contingencia se formalizó bajo una topología física tipo estrella, con el Centro de Control de Energía (CCE) como nodo central. Además, el componente lógico fue diseñado con el estándar IEEE 802.1Q, lo que permite la segregación de VLAN. Esta segmentación es fundamental para garantizar la Calidad de Servicio (QoS) y la baja latencia (menor a 50 ms) requeridas por los sistemas de telecontrol, aislando el tráfico crítico de potenciales congestiones.

Se evidenció la viabilidad Técnica y Robustez del Enlace: Los resultados de las simulaciones y el cálculo del margen de desvanecimiento para los enlaces Punto a Punto (PTP) demostraron la viabilidad técnica de la solución inalámbrica. El diseño garantiza una disponibilidad mínima del 99.99% para las rutas más largas, lo cual supera los requisitos mínimos operacionales y asegura la robustez necesaria para un entorno de misión crítica.

Se confirmó mediante implementación Operativa de Prueba Piloto: El despliegue operativo del segmento de prueba entre la Subestación de Energía Centro y el Nodo Tanque 30 confirmó la solidez de la arquitectura seleccionada. La monitorización del enlace piloto reportó un 100% de disponibilidad a nivel de radiofrecuencia (RF) desde su puesta en marcha, sin interrupciones o caídas de servicio. Este resultado valida la robustez del diseño y la efectividad de la tecnología para mitigar las fallas de la infraestructura cableada.

Se establece una hoja de ruta para mitigación de riesgos: El proyecto culmina con el desarrollo del diseño técnico completo, que incluye especificaciones de equipos y la planificación financiera. Esta propuesta constituye la hoja de ruta definitiva para que EMCALI mitigue el riesgo operacional en sus subestaciones y consolide el fortalecimiento tecnológico necesario para la modernización de su gestión energética, independientemente de la pausa administrativa actual en la liberación de los equipos.

Recomendaciones

Se recomienda a EMCALI dar continuidad a las fases subsiguientes del proyecto de acuerdo con la hoja de ruta establecida, enfocándose en los siguientes aspectos estratégicos y técnicos:

Extender el Modelo Validado: Implementar inmediatamente el despliegue del diseño de arquitectura óptica y lógica (Estrella con segmentación 802.1Q) en las subestaciones restantes, replicando el éxito operativo y la disponibilidad del 100% demostrado en la prueba piloto (Centro - Tanque 30).

Auditoría Periódica: Establecer un protocolo de auditoría anual o semestral para verificar la Primera Zona de Fresnel de los enlaces más críticos. El crecimiento urbano o vegetativo puede comprometer el despeje y afectar el margen de desvanecimiento, lo cual impactaría directamente la disponibilidad y la Calidad de Servicio (QoS).

Plan de Contingencia de Nodos: Si bien el diseño es robusto, se recomienda desarrollar un plan de redundancia activa/pasiva (Hot Standby) para los nodos críticos centrales (especialmente el Centro de Control de Energía - CCE) para mitigar cualquier riesgo asociado a fallas de infraestructura local (energía o climatización) que no estén cubiertas por la robustez del radioenlace mismo.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Nacional del Espectro. (2020). *Resolución 105 de 2020 (y Anexos): Planeación y atribución del espectro; condiciones WAS/RLAN*. Obtenido de <https://www.ane.gov.co/>
- Agencia Nacional del Espectro. (2022). *Resolución 737 de 2022: Modifica la Resolución 105 de 2020 y actualiza el CNABF*. Obtenido de <https://www.ane.gov.co/>
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2022). *Informe de gestión del sistema eléctrico municipal*. Cali. Obtenido de <https://www.cali.gov.co>
- Anderson, L. (2020). *Comparative analysis of wireless technologies for IEC 61850 - Based substations*. Swedish Institute of Technology.
- Barreño, R., Báez, H., & Carvajal, J. (2025). Recomendaciones de ciberseguridad bajo la implementación de políticas de defensa en profundidad en las organizaciones: revisión sistemática de la literatura. *Información Tecnológica*, 36(3), 1-12.
- Barreño, R., Nuñez, W., Urrea, S., Osorio, H., & Acosta, N. (s.f.). Análisis técnico basado en estándares internacionales del Data Center de apoyo a la gestión tecnológica y de formación por competencias en el CEET del SENA Distrito Capital. Obtenido de <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749.12267>
- Barreño-Gutiérrez, R. (2023). *Algoritmos de machine learning aplicados al sector salud: una realidad para la toma de decisiones desde la analítica de datos* (Vol. 4). UCompensar: La academia motora en la transformación digital y automatización de la industria.
- Barreño-Gutiérrez, R. (2023). *Migración a la nube en Pymes y Mipymes: una revisión basada en buenas prácticas desde la gestión TI*. (Vol. 1). UCompensar: La academia motora en la transformación digital y automatización de la industria.

- Barreño-Gutiérrez, R. (2024). *Explorando el Universo IPv6: para la innovación de un mundo interconectado. 1a ed.* Ediciones de la U.
- Barreño-Gutiérrez, R., & Lengerke, O. (2014). *Voto electrónico con SSL/TLS e IPSEC.*
- Barreño-Gutiérrez, R., Barbosa, N., Riaño, J., Guevara, Z., Solórzano, J., García, S., & Tapias. (2023). *UCompensar: La academia motora en la transformación digital y automatización de la industria 4.0.*
- Brown, M., Green, J., & White, A. (2021). Hurricane resilience using hybrid telecom infrastructure: The case of Jamaica Public Service. *International Journal of Electrical Systems, 14(3)*, 211-225.
- Cambium Networks. (2024). *Radio planning tools and wireless solutions for utility networks.* Obtenido de <https://www.cambiumnetworks.com>
- Comision de Regulación de Energía y Gas - CREG. (s.f.). *Regulación para calidad del servicio eléctrico en Colombia.* Obtenido de <https://www.creg.gov.co>
- Comisión Federal de Electricidad [CFE]. (2020). *Informe anual de modernización del sistema eléctrico nacional.* Obtenido de <https://www.cfe.mx>
- Concepto de Red inalámbrica. (s.f.). *Qué es, tipos, ventajas, desventajas y ejemplos.* Obtenido de <https://concepto.de/red-inalambrica/>
- Delmastro, F., & Vignati, A. (2022). Wireless communication planning with LINKPlanner and real-time topology simulations. *Telecom Journal, 29(1)*, 45-61.
- Empresa Eléctrica de Cochabamba. (2017). *Informe de transición a red IP/MPLS para subestaciones eléctricas.* Cochabamba: ELFEC.
- Empresa Eléctrica Quito. (2017). *Modernización de subestaciones eléctricas mediante enlaces inalámbricos.* Quito: EEQ.

- Enhanced Reader. (2022). *Elementos de red para sistemas de comunicación inalámbrica*.
Obtenido de <https://www.enhancedreader.com>
- ETSI. (2024). *Harmonisedn Standard for Access to radio spectrum EN 301 893 V2 2.1 (2024-11): 5GHz WAS/RLAN*. Obtenido de <https://www.etsi.org>
- Federal Communications Commission. (2025). *General technical requirements (U-NII 5 GHz) 47 CFR 15.407*. Obtenido de <https://www.ecfr.gov/>
- García, M., & Rodríguez, P. (2024). Modelamiento de enlaces inalámbricos en áreas urbanas para subestaciones. *Revista Técnica de Ingeniería y Redes*, 12(1), 34-50.
- Gutiérrez, R. (2022). Machine Learning predictivo a partir de la analítica y de modelos de inteligencia artificial. Un caso de estudio. *Ingeniería y Desarrollo en la Nueva Era*, 759-767.
- IEEE. (2021). *Standard for wireless communication in mission - critical infrastructure*. IEEE Press.
- International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. (2005). *Recommendation ITU-R P.838-3: Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*.
Obtenido de <https://www.itu.int/>
- International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. (2017). *Recommendation ITU-R P. 837-7: Characteristics of precipitation for propagation modeling*. Obtenido de <https://www.itu.int/>
- International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. (2024). *Recommendation ITU-R P.525-5: Calculation of free-space attenuation*. Obtenido de <https://www.itu.int/>

- International Telecommunication Union Radiocommunication Sector. (2025). *Recommendation ITU - R P. 530-19: Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line - of-sight systems*. Obtenido de <https://www.itu.int/>
- ITU. (2020). *Use of 5 GHz band for wireless access systems including radio local area networks (WAS/RLANs)*. Ginebra: International Telecommunication Union.
- Martínez, D. (2018). Análisis de la comunicación inalámbrica en la automatización de subestaciones eléctricas. *Ingeniería y Tecnología*, 18(2), 95-108.
- Ñaupas, A., romero, C., & Torres, J. (2013). *Metodología de la investigación científica y tecnológica*. Lima: Editorial Universitaria.
- OECD. (2018). *Fostering innovation in the energy sector: Applied research insights*. OECD iLibrary.
- Rodríguez, J., & Pérez, L. (2021). Diseño de redes inalámbricas de alta disponibilidad para entornos críticos. *Revista de Telecomunicaciones Aplicadas*, 17(4), 83-98.
- Rodríguez, J., & Pérez, L. (2021). Diseño de redes inalámbricas de alta disponibilidad para entornos críticos. *Revista de Telecomunicaciones Aplicadas*, 17(4), 83-98.
- Romo, K. (2013). *Apoyo profesional en el diseño de una red de comunicaciones para las subestaciones eléctricas de CEDENAR S.A. E.S.P.* Obtenido de (Trabajo de grado) Universidad de Nariño: <https://www.google.com/search?q=romo+cedenar+tesis>
- SISTELEC. (s.f.). *Radioenlaces: guía completa*. Obtenido de <https://www.sistelec.es/blog/radioenlaces-guia-completa>
- Smith, R., & Johnson, H. (2019). Wireless transmission of IEC 61850 GOOSE messages using microwave links. *Electric Power Systems Research*, 170, 264-271.

- Suárez, J., Córdoba, S., Mariño, D., Gutiérrez, R., & Soto, J. (2022). Impacto de la implementación de una plataforma como servicio para apoyar procesos de formación empresarial mediante la modalidad MOOC. *Ingeniería y Desarrollo en la Nueva Era*, 791-799.
- Universidad Autónoma de Occidente. (2021). *Informe Técnico sobre enlaces inalámbricos aplicados a subestaciones de EMCALI*. Cali: UAO.
- Urrea, S., Núñez, W., Gutiérrez, R., & Osorio, H. (2014). Gestión de conocimiento soportado en TIC para entidades educativas de formación por competencias SENA–CEET. VI Congreso Internacional de Formación y Gestión del Talento Humano.
- Urrea, S., Núñez, W., Gutiérrez, R., & Osorio, H. (s.f.). Gestión de conocimiento soportado en TIC para entidades educativas de formación por competencias SENA - CEET. In VI Congreso Internacional de Formación y Gestión del Talento Humano. *Enfoques y Modelos para la formación, la innovación y la*, 392.
- Valencia, L. (2024). *Modernización de la subestación Meléndez mediante radioenlaces*. Cali: EMCALI.
- Violeta, S., & Raul, B. (2021). *Una mirada a las historias clínicas digitales, la calidad del dato, sus estándares, aspectos de ciberseguridad y su interoperabilidad en Colombia* (Vol. 1). Libro: Seguridad en la administración y calidad de los datos; estudio de casos por contextos.