UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

"ANÁLISIS TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE FTTR EN ISPS PARA MITIGAR LAS LIMITACIONES DE COBERTURA EN REDES WIFI 6"

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Telecomunicaciones

Línea de investigación: Gestión, producción, productividad, innovación y desarrollo socioeconómico

AUTOR:

Justin David Gudiño Pijal

DIRECTOR:

Msc. Carlos Alberto Vásquez Ayala

Ibarra, 2026

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO	
APELLIDOS Y NOMBRES:	JUSTIN DAVID GUDIÑO PIJAL

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	"ANÁLISIS TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE FTTR EN ISPS PARA MITIGAR LAS LIMITACIONES DE COBERTURA EN REDES WIFI 6"
AUTOR (ES):	JUSTIN DAVID GUDIÑO PIJAL
FECHA: DD/MM/AAAA	4/09/2026
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	■ **PREGRADO** □ **POSGRADO**
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
DIRECTOR /ASESOR:	MSc. CARLOS ALBERTO VÁSQUEZ AYALA MSc. HENRY PATRICIO FARINANGO ENDARA

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 4 días del mes de septiembre de 2026

EL AUTOR:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JUSTIN DAVID GUDIÑO PIJAL

(Firma).....
Nombre: Justin David Gudiño Pijal

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 4 de septiembre de 2026

MSC. CARLOS ALBERTO VÁSQUEZ AYALA

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
CARLOS ALBERTO VASQUEZ AYALA

(f)……

Msc. Vásquez Ayala Carlos Alberto

C.C.: 1002424982

DEDICATORIA

"La fuerza que nos proyecta hacia adelante,

proviene de lo que soltamos en el camino."

- *Tercera ley de Newton*

Quiero dedicar este trabajo a mi familia, quienes han sido el motor principal detrás de cada uno de mis pasos. Sin su apoyo incondicional, las metas que hoy alcanzo habrían sido inalcanzables. Ya que las palabras me menudo resultan insuficientes para expresar cuanto los quiero, espero que el esfuerzo plasmado en estas páginas sirva como el mejor testimonio de mi cariño hacia ustedes.

Justin David Gudiño Pijal

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ponerme donde estoy, y darme las oportunidades que he tenido.

A mi mamá, por sus cuidados y consejos que pueden pesar, pero siempre tienen la mejor intención.

A mi papá, que siempre que lo necesito brinda su ayuda sin dudar, y con una sonrisa en el rostro.

A mi tía Lore, que ha sido mi soporte cuando más la necesito, una segunda madre que no permite que nada nos falte, y siempre nos da más de lo que jamás podremos retribuir.

A mi hermana Estefy, mi mayor confidente, porque ambos sabemos que siempre podemos contar con el otro para lo que sea.

A todos mis tíos, tías y primos, yo sé que no importa si hay discusiones, en el fondo somos una familia que ha pasado por mucho y se sigue queriendo, y esto no es más que otra prueba que vamos a superar, porque hay dos viejitos que nos cuidan desde el cielo.

Y a nuestros compañeros de 4 patas, que tienen un cariño incondicional y siempre traen alegría al hogar.

Para finalizar, quiero agradecer a mi director de trabajo de titulación, MSc. Carlos Vásquez, a mi asesor, MSc. Henry Farinango, por su ayuda, consejos y apoyo en todo momento, también a mi profesor de la materia de Titulación 1 y 2, MSc. Jaime Michilena, por aportar cada semana haciendo seguimiento, y preocuparse por cada uno de sus estudiantes, sin ustedes nada de esto habría sido posible.

Justin David Gudiño Pijal

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo de integración curricular presenta un análisis técnico exhaustivo para la implementación de la tecnología de Fibra hasta la Habitación, conocida como FTTR, enfocada en Proveedores de Servicios de Internet. El objetivo principal radica en diseñar un modelo técnico que mitigue las limitaciones físicas de propagación y cobertura inherentes a las redes inalámbricas de sexta generación operando en la banda de 5 GHz. La metodología adoptada sigue un enfoque descendente que abarca desde la caracterización teórica y normativa hasta la ejecución de pruebas de campo y modelado predictivo digital. Mediante la plataforma de simulación Ruijie Reyee Cloud, debidamente calibrada con métricas empíricas para reflejar la atenuación real de obstáculos como adobe, bloque, madera y vidrio, se evaluaron cinco escenarios arquitectónicos de complejidad progresiva: un departamento pequeño, una residencia de dos plantas, una casa patrimonial, oficinas corporativas y un complejo hotelero tipo glamping. Los resultados demuestran que la arquitectura óptica distribuida supera contundentemente a los despliegues centralizados tradicionales, cuadriplicando la calidad del servicio en entornos de alta atenuación estructural al eliminar las zonas oscuras y garantizar un ancho de banda Gigabit simétrico. En conclusión, la implementación de esta tecnología resulta altamente factible y necesaria para edificaciones multinivel y proyectos de gran extensión, optimizando la experiencia del usuario final y reduciendo los costos operativos del proveedor.

Palabras clave: Arquitectura distribuida, Atenuación estructural, Fibra hasta la habitación, Mapas de calor predictivos, Redes inalámbricas.

ABSTRACT

This curricular integration work presents a comprehensive technical analysis for the implementation of Fiber to the Room technology, known as FTTR, focused on Internet Service Providers. The main objective is to design a technical model that mitigates the physical propagation and coverage limitations inherent to sixth-generation wireless networks operating in the 5 GHz band. The adopted methodology follows a top-down approach that ranges from theoretical and regulatory characterization to the execution of field tests and digital predictive modeling. Through the Ruijie Reyee Cloud simulation platform, properly calibrated with empirical metrics to reflect the real attenuation of obstacles such as adobe, block, wood, and glass, five architectural scenarios of progressive complexity were evaluated: a small apartment, a two-story residence, a heritage house, corporate offices, and a glamping hotel complex. The results demonstrate that the distributed optical architecture overwhelmingly outperforms traditional centralized deployments, quadrupling the quality of service in high structural attenuation environments by eliminating dead zones and guaranteeing a symmetrical Gigabit bandwidth. In conclusion, the implementation of this technology is highly feasible and necessary for multi-level buildings and large-scale projects, optimizing the end-user experience and reducing the operational costs of the provider.

Keywords: Distributed architecture, Fiber to the Room, Predictive heatmaps, Structural attenuation, Wireless networks.

LISTA DE SIGLAS

AP. Access Point o Punto de Acceso

ARCOTEL. Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones

BOM. Bill of Materials o Lista de Materiales

BSSID. Basic Service Set Identifier o Identificador de Conjunto de Servicios Básico

CAD. Computer Aided Design o Diseño Asistido por Computadora

CTO. Caja de terminación óptica

DHCP. Dynamic Host Configuration Protocol o Protocolo de Configuración Dinámica de Host

FSPL. Free Space Path Loss o Pérdida por Trayectoria en el Espacio Libre

FTTB. Fiber to the Building o Fibra hasta el Edificio

FTTH. Fiber to the Home o Fibra hasta el Hogar

FTTR. Fiber to the Room o Fibra hasta la Habitación

GHz. Gigahertz o Gigahercios

GPON. Gigabit Capable Passive Optical Network o Red Óptica Pasiva con Capacidad Gigabit

HTB. Hierarchical Token Bucket o Cubo de Tokens Jerárquico

IEEE. Institute of Electrical and Electronics Engineers o Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

IP. Internet Protocol o Protocolo de Internet

ISP. Internet Service Provider o Proveedor de Servicios de Internet

ITU. International Telecommunication Union o Unión Internacional de Telecomunicaciones

LAN. Local Area Network o Red de Área Local

LOS. Line of Sight o Línea de Vista

MAC. Media Access Control o Control de Acceso al Medio

MIMO. Multiple Input Multiple Output o Múltiple Entrada Múltiple Salida

MINTEL. Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información

MLO. Multi-Link Operation u Operación Multienlace

NAT. Network Address Translation o Traducción de Direcciones de Red

NLOS. Non Line of Sight o Sin Línea de Vista

ODS. Objetivos de Desarrollo Sostenible

OFDMA. Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales

OLT. Optical Line Terminal o Terminal de Línea Óptica

OMCI. ONT Management and Control Interface o Interfaz de Control y Gestión de ONT

ONT. Optical Network Terminal o Terminal de Red Óptica

ONU. Optical Network Unit o Unidad de Red Óptica

OPM. Optical Power Meter o Medidor de Potencia Óptica

ORL. Optical Return Loss o Pérdida de Retorno Óptico

PCQ. Per Connection Queue o Cola por Conexión

PPPoE. Point to Point Protocol over Ethernet o Protocolo Punto a Punto sobre Ethernet

QAM. Quadrature Amplitude Modulation o Modulación de Amplitud en Cuadratura

QoE. Quality of Experience o Calidad de Experiencia

QoS. Quality of Service o Calidad de Servicio

RF. Radiofrecuencia

RSSI. Received Signal Strength Indicator o Indicador de Fuerza de Señal Recibida

SSID. Service Set Identifier o Identificador de Conjunto de Servicios

UTP. Unshielded Twisted Pair o Par Trenzado No Blindado

VFL. Visual Fault Locator o Localizador Visual de Fallas

VLAN. Virtual Local Area Network o Red de Área Local Virtual

WAN. Wide Area Network o Red de Área Amplia

WDM. Wavelength Division Multiplexing o Multiplexación por División de Longitud de Onda

WiFi. Wireless Fidelity o Fidelidad Inalámbrica

LISTA DE CONTENIDOS

1. Capítulo I: Antecedentes 25

1.1 Tema 25

1.2 Problema 25

1.3 Objetivos 28

1.3.1. Objetivo General 28

1.3.2. Objetivos Específicos 28

1.4 Alcance 28

1.5 Justificación 31

2. Capítulo II: Estado del Arte 33

2.1 Fundamentos de Redes y Comunicaciones 33

2.1.1. Redes cableadas e inalámbricas 34

2.1.2. Proveedores de Servicios de Internet (ISP) 35

2.1.3. Internet y conectividad de última milla 35

2.2 Comunicaciones Ópticas 37

2.2.1. Principios de transmisión óptica 38

2.2.2. Arquitecturas de acceso FTTH y FTTR 39

2.2.3. Gestión de splitters ópticos en redes FTTR 40

2.3 Comunicaciones Inalámbricas 41

2.3.1. Principios de radiofrecuencia 42

2.3.2. Ley del cuadrado inverso y atenuación 43

2.4 Estándares inalámbricos....45
2.4.1. Estándares IEEE 802.11....46
2.4.2. WiFi 5, WiFi 6, WiFi 6E y WiFi 7....47
2.4.3. Rol de la WiFi Alliance....48
2.4.4. Tendencias hacia futuras generaciones WiFi....49
2.5 Integración FTTR y WiFi....50
2.5.1. Limitaciones de WiFi en interiores....51
2.5.2. Ventajas técnicas de FTTR....52
2.5.3. Implementación de FTTR sobre redes FTTH....53
2.6 Marco Legal....54
2.6.1. Regulación del espectro radioeléctrico y uso de bandas WiFi....54
2.6.2. Normativas para la instalación de redes FTTx....55
2.6.3. Legislación sobre calidad del servicio en ISPs y derechos del usuario....56
3. Capítulo III: Marco Metodológico....58
3.1 Metodología....58
3.2 Recomendaciones técnicas de instalación....60
3.2.1. Medio de transmisión óptico....61
3.2.2. Métodos de despliegue....64
3.2.3. Técnicas de terminación y conexión....66
3.2.4. Recomendación de equipos terminales de la red óptica....70
3.2.5. Posicionamiento estratégico de las ONT....73

3.2.6. Seguridad física personal 75

3.2.7. Etiquetado y Ordenamiento 77

3.2.8. Validación del Presupuesto Óptico 79

3.2.9. Planta Externa a Planta Interna: Medio Físico y Despliegue Doméstico 80

3.2.10. Resumen de las recomendaciones técnicas de instalación 82

3.3 Mecanismos de distribución física y lógica de la red FTTR en el inmueble 84

3.3.1. Mecanismos de Distribución Física (Planta Interna) 84

3.3.2. Mecanismos de Distribución Lógica (Gestión del Servicio) 86

3.3.3. Arquitectura Alternativa de Red Óptica Distribuida (FTTR Residencial) 88

3.3.4. Resumen de los medios de distribución física y lógica FTTR 89

3.4 Determinación y análisis del entorno de pruebas y metodología de experimentación 91

3.4.1. Equipamiento técnico para pruebas de campo 91

3.4.2. Herramientas de medición, análisis y software de simulación 94

3.4.3. Parámetros de censado 95

3.5 Procedimiento de obtención e instalación del ecosistema de software 96

3.5.1. Adquisición de herramientas en el repositorio oficial 96

3.5.2. Adquisición y Requerimientos de WiFi Analyzer 97

3.5.3. Adquisición y Requerimientos de NetSpot 99

3.5.4. Configuración de privacidad y servicios de red 101

3.5.5. Registro y acceso a la plataforma de simulación Ruijie Reyee 102

3.6 Familiarización con el entorno de software de medición y simulación.....105

3.6.1. Diagnóstico de detalles técnicos (WiFi Analyzer).....105

3.6.2. Medición, tabulación y graficación de datos (NetSpot).....109

3.6.3. Preparación del entorno de simulación de mapas de calor 114

3.7 Pruebas experimentales controladas 123

3.7.1. Tipos de entornos de pruebas.....123

3.7.2. Pruebas de atenuación por distancia en línea de vista (LOS) 124

3.7.3. Atenuación por obstáculos inmuebles 140

3.8 Pruebas de simulaciones experimentales controladas.....155

3.8.1. Calibración de potencia del router simulado 161

3.8.2. Pruebas de atenuación por distancia en línea de vista (LOS) 165

3.8.3. Atenuación por obstáculos inmuebles 173

3.8.4. Calibración de atenuación de objetos inmuebles.....178

3.9 Comparativa de costos aproximados de instalación en el inmueble.....180

4. Capítulo IV: Validación y Demostración de Factibilidad.....182

4.1 Escenarios de simulación para medir la factibilidad de FTTR.....182

4.2 Simulación de caso práctico en departamento pequeño 183

4.2.1. Diagnóstico de Cobertura en Arquitectura Centralizada 186

4.2.2. Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida 187

4.2.3. Resultados de las simulaciones.....188

4.3 Simulación de caso práctico en casa residencial.....190

4.3.1. Diagnóstico de Cobertura en Arquitectura Centralizada 194

4.3.2. Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida 196

4.3.3. Resultados de las simulaciones.....199

4.4 Simulación de caso práctico en casa histórica 201

4.4.1. Diagnóstico de Cobertura en Arquitectura Centralizada 204

4.4.2. Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida 205

4.4.3. Resultados de las simulaciones.....207

4.5 Simulación de caso práctico en oficina corporativa 209

4.5.1. Diagnóstico de Cobertura en Arquitectura Centralizada 212

4.5.2. Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida 213

4.5.3. Resultados de las simulaciones.....214

4.6 Simulación de caso práctico en hotelería de cabañas o glamping 216

4.6.1. Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida 219

4.6.2. Resultados de las simulaciones.....221

4.7 Análisis de resultados y validación de la implementación de FTTR.....223

5. Conclusiones 228

6. Recomendaciones 229

7. Bibliografía 230

8. Anexos 240

8.1 Tabulación de resultados en pruebas experimentales controladas. 240

8.2 Modelo Técnico para la implementación de tecnología FTTR.....250

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 *Tabla comparativa de tecnologías Wi-Fi.* 47

Tabla 2 *Tabla comparativa de estándares de fibra óptica en FTTH y FTTR.* 63

Tabla 3 *Características técnicas y parámetros ópticos de los equipos Huawei OptiXstar F30.* 72

Tabla 4 *Componentes físicos de la red interna (Planta Interna).* 82

Tabla 5 *Resumen de medios de distribución física y lógica para redes FTTR.* 90

Tabla 6 *Resultados de las mediciones de potencia y atenuación por distancia (LOS).* 139

Tabla 7 *Resultados de las mediciones de atenuación por obstáculos inmuebles varios.* 154

Tabla 8 *Resultados de las mediciones de potencia y atenuación por distancia en simulación por defecto.* 160

Tabla 9 *Comparación entre los resultados de las mediciones reales controladas y simuladas.* 161

Tabla 10 Resultados de las mediciones de potencia y atenuación por distancia en simulación con boceto.....171

Tabla 11 *Resultados de la simulación de mediciones de atenuación por obstáculos inmuebles varios.* 176

Tabla 12 *Resultados de las mediciones de atenuación por obstáculos inmuebles varios.* 178

Tabla 13 *Tabla de resultados de las simulaciones de cobertura en el departamento pequeño.* 188

Tabla 14 *Tabla de resultados de las simulaciones de cobertura en casa residencial.* 199

Tabla 15 *Tabla de resultados de las simulaciones de cobertura en casa histórica.* ..207

Tabla 16 *Tabla de resultados de las simulaciones de cobertura en oficina corporativa.* 214

Tabla 17 *Tabla de resultados de las simulaciones de cobertura en el hotel de glamping.* 221

Tabla 18 *Tabla de validación de factibilidad de las simulaciones de diferentes escenarios.* 223

Tabla 19 Tabulación de resultados de la *Figura 59.* 240

Tabla 20 Tabulación de resultados de la *Figura 62.* 241

Tabla 21 *Tabulación de resultados de la Figura 65.*.....242

Tabla 22 *Tabulación de resultados de la Figura 68.*.....243

Tabla 23 *Tabulación de resultados de la Figura 73*.....245

Tabla 24 *Tabulación de resultados de la Figura 76.*.....246

Tabla 25 *Tabulación de resultados de la Figura 79.*.....247

Tabla 26 *Tabulación de resultados de la Figura 82.*.....248

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 *Diagrama de Ishikawa.* 27

Figura 2 *Metodología en cascada.* 29

Figura 3 *Diagrama de la arquitectura.* 31

Figura 4 *Representación de la última milla en una red WAN.* 36

Figura 5 *Efectos ópticos en la incidencia de luz.* 38

Figura 6 *Ley del cuadrado inverso.* 44

Figura 7 *Mapa de calor de cobertura WiFi.* 51

Figura 8 *Fases de la metodología Top-Down.* 59

Figura 9 *Gráfica de atenuación por curvatura de fibra G.657.A.* 62

Figura 10 *Gráfica de atenuación por curvatura de fibra G.657.B3.* 62

Figura 11 *Hilo de fibra óptica invisible con conector SC UPC.* 64

Figura 12 *Bobina de fibra óptica invisible adherida térmicamente al rodapié.* 65

Figura 13 *Cableado eléctrico interno del inmueble con tubería PVC.* 66

Figura 14 *Representación de la pérdida por retorno debido a suciedad en la unión de la fibra.* 67

Figura 15 *Comparación del conector UPC y APC respecto a la pérdida por retorno.* 68

Figura 16 *Herramientas de limpieza de conectores y terminales de fibra óptica.* 69

Figura 17 *Roseta de pared para la conexión del cuarto.* 70

Figura 18 *Master ONT Huawei OptiXstar V163.* 71

Figura 19 *Salve ONT Huawei OptiXstar K153.* 72

Figura 20 *Funcionamiento de la tecnología 802.11k/v/r.* 75

Figura 21 *Adaptadores de terminaciones ópticas con obturador Auto-shutter.* 76

Figura 22 *Símbolo internacional de radiación laser.* 77

Figura 23 *Etiquetas sugeridas para el reconocimiento de la fibra óptica.* 78

Figura 24 *Dispositivo Visual Fault Locator VFL 10mW para Fibra Óptica.* 80

Figura 25 *Roseta o caja de terminación óptica interna de 8 puertos.* 88

Figura 26 *Dispositivo Router inalámbrico Wi-Fi 6.* 92

Figura 27 *Equipo portátil Windows compatible con Wi-Fi 6.* 93

Figura 28 *Tarjeta de red compatible con Wi-Fi 6.* 94

Figura 29 *Búsqueda y acceso a la aplicación de Microsoft Store.* 97

Figura 30 *Interfaz de la aplicación WiFi Analyzer en la tienda oficial.* 98

Figura 31 *Detalles técnicos y requisitos del sistema para WiFi Analyzer.* 99

Figura 32 *Página de descarga y capturas de interfaz de NetSpot.* 100

Figura 33 *Especificaciones de instalación y permisos de NetSpot.* 101

Figura 34 *Permisos de ubicación de las herramientas de medición.* 102

Figura 35 *Pantalla de inicio de sesión de Ruijie Cloud.* 103

Figura 36 *Formulario de registro de usuario en la plataforma de simulación.* 104

Figura 37 *Panel principal de Ruijie Cloud para la selección de la herramienta de mapas de calor.* 105

Figura 38 *Panel de información detallada de la red activa en WiFi Analyzer.* 106

Figura 39 *Análisis espectral de la banda de 2.4 GHz.* 107

Figura 40 *Listado tabular de redes circundantes detectadas.* 108

Figura 41 *Espectro de canales en la banda de 5 GHz.* 109

Figura 42 *Tabla maestra de descubrimiento y métricas en NetSpot.* 110

Figura 43 *Gráfica cronológica de estabilidad de señal (RSSI).* 111

Figura 44 *Registro histórico de datos tabulares por SSID.* 112

Figura 45 *Gráfica de ocupación de canales en 2.4 GHz según NetSpot.* 113

Figura 46 *Análisis de canales y potencia en la banda de 5 GHz.* 114

Figura 47 *Dashboard principal de Ruijie Cloud.* 115

Figura 48 *Creación de proyecto de simulación interna.* 116

Figura 49 *Selección del escenario residencial.* 117

Figura 50 *Interfaz de carga de planos digitales.* 118

Figura 51 *Confirmación y validación de planta.* 119

Figura 52 *Catálogo de dispositivos WiFi 6.* 120

Figura 53 *Configuración de parámetros de nodo.* 121

Figura 54 *Librería de materiales y atenuación de muros.* 122

Figura 55 *Diagrama de topología lógica.* 123

Figura 56 *Punto de referencia inicial para la medición de distancia con el router WiFi 6.* 125

Figura 57 *Medición a 0 metros de distancia con el router WiFi 6.* 126

Figura 58 *Gráfica de resultados de prueba a 0 metros de distancia.* 127

Figura 59 *Tabla de resultados de prueba a 0 metros de distancia* 128

Figura 60 *Medición a un metro de distancia con el router WiFi 6.* 130

Figura 61 *Gráfica de resultados de prueba a un metro de distancia.* 131

Figura 62 *Tabla de resultados de prueba a un metro de distancia.* 132

Figura 63 *Medición a dos metros de distancia con el router WiFi 6.* 134

Figura 64 *Gráfica de resultados de prueba a dos metros de distancia.* 135

Figura 65 *Tabla de resultados de prueba a dos metros de distancia.* 136

Figura 66 *Medición a tres metros de distancia con el router WiFi 6.* 137

Figura 67 *Gráfica de resultados de prueba a tres metros de distancia.* 138

Figura 68 *Tabla de resultados de prueba a tres metros de distancia.* 139

Figura 69 *Graficación de los resultados de las mediciones de potencia y atenuación.* 140

Figura 70 *Medición de pared de adobe de 50cm.* 141

Figura 71 *Medición de atenuación de pared de adobe.* 142

Figura 72 *Gráfica de resultados de prueba con pared de adobe.* 143

Figura 73 *Tabla de resultados de prueba con pared de adobe.* 144

Figura 74 *Medición de atenuación de pared de bloque.* 145

Figura 75 *Gráfica de resultados de prueba con pared de bloque.* 146

Figura 76 *Tabla de resultados de prueba con pared de bloque.* 147

Figura 77 *Medición de atenuación de ventana de vidrio.* 148

Figura 78 *Gráfica de resultados de prueba con ventana de vidrio.* 149

Figura 79 *Tabla de resultados de prueba con ventana de vidrio.* 150

Figura 80 *Medición de atenuación de puerta de madera.* 151

Figura 81 *Gráfica de resultados de prueba con pared o puerta de madera.* 152

Figura 82 *Tabla de resultados de prueba con pared o puerta de madera.* 153

Figura 83 *Graficación de las mediciones de atenuación por obstáculos inmuebles.* 155

Figura 84 *Configuración por defecto del RG-RAP2260.* 156

Figura 85 *Medición a 0 metros de distancia en simulación por defecto.* 157

Figura 86 *Medición a un metro de distancia en simulación por defecto.* 158

Figura 87 *Medición a dos metros de distancia en simulación por defecto.* 159

Figura 88 *Medición a tres metros de distancia en simulación por defecto.* 159

Figura 89 *Graficación de los resultados de potencia y atenuación del simulador por defecto.* 161

Figura 90 *Graficación de los resultados de las mediciones reales controladas y simuladas.* 163

Figura 91 *Calibración de la potencia en el router del simulador Ruijie.* 164

Figura 92 *Boceto del área de pruebas experimentales en SketchUp.* 165

Figura 93 *Importación del boceto al software de simulación Ruijie.* 166

Figura 94 *Ajuste de paredes y router del boceto importado al simulador de Ruijie.* 167

Figura 95 *Medición a 0 metros de distancia en simulación calibrada.* 168

Figura 96 *Medición a un metro de distancia en simulación calibrada.* 169

Figura 97 *Medición a dos metros de distancia en simulación calibrada.* 170

Figura 98 *Medición a tres metros de distancia en simulación calibrada.* 171

Figura 99 *Graficación de los resultados de las mediciones reales controladas y simuladas.* 172

Figura 100 *Medición de atenuación con pared gruesa por defecto.* 173

Figura 101 *Medición de atenuación con pared de bloque por defecto.* 174

Figura 102 *Medición de atenuación con ventana de vidrio por defecto.* 175

Figura 103 *Medición de atenuación con pared de madera por defecto.* 176

Figura 104 *Graficación de las mediciones de atenuación por obstáculos inmuebles.* 177

Figura 105 *Graficación de los resultados de las atenuaciones reales controladas y simuladas.* 179

Figura 106 *Gráfica de barras de precios aproximados de instalación FTTx.* 180

Figura 107 *Plano arquitectónico de un departamento pequeño.* 183

Figura 108 *Creación de las paredes del departamento pequeño en Ruijie.* 184

Figura 109 *Configuración de los equipos simulados para el departamento pequeño.* 185

Figura 110 *Cobertura de un AP con arquitectura centralizada.* 186

Figura 111 *Cobertura multi AP de una arquitectura distribuida.* 187

Figura 112 *Grafico de barras de los resultados de la simulación del departamento pequeño.* 189

Figura 113 *Plano arquitectónico de una casa de dos pisos.* 190

Figura 114 *Creación de las paredes de la planta baja en Ruijie.* 191

Figura 115 *Creación de las paredes de la planta baja en Ruijie.* 192

Figura 116 *Configuración de los equipos simulados para la casa de dos pisos.* 193

Figura 117 *Cobertura de un APs con arquitectura centralizada.* 194

Figura 118 *Cobertura de un APs con arquitectura centralizada.* 195

Figura 119 *Cobertura multi AP de una arquitectura distribuida.* 197

Figura 120 *Cobertura multi AP de una arquitectura distribuida.* 198

Figura 121 *Grafico de barras de los resultados de la simulación de la casa residencial.* 200

Figura 122 *Plano arquitectónico de una casa histórica con paredes de adobe.* 202

Figura 123 *Creación de las paredes de la casa histórica en Ruijie.* 203

Figura 124 *Configuración de los equipos simulados para la casa histórica.* 204

Figura 125 *Cobertura de un AP con arquitectura centralizada.* 205

Figura 126 *Cobertura multi AP de una arquitectura distribuida.* 206

Figura 127 *Grafico de barras de los resultados de la simulación de la casa histórica.* 208

Figura 128 *Plano arquitectónico de un entorno empresarial provisto por Ruijie.* 209

Figura 129 *Creación de las paredes del inmueble empresarial.* 210

Figura 130 *Configuración de los equipos simulados para el entorno empresarial...* 211

Figura 131 *Cobertura de un AP con arquitectura centralizada.* 212

Figura 132 *Cobertura multi AP de una arquitectura distribuida.* 213

Figura 133 *Grafico de barras de los resultados de la simulación de la oficina corporativa.* 215

Figura 134 *Vista satelital del terreno de un hotel de glamping.* 216

Figura 135 *Plano arquitectónico de un terreno usado para hotel de glamping.* 217

Figura 136 *Creación de las paredes de la cabaña de glamping.* 218

Figura 137 *Configuración de los equipos simulados para la cabaña de glamping.* .219

Figura 138 *Cobertura multi AP de una arquitectura distribuida.* 220

Figura 139 *Grafico de barras de los resultados de la simulación del hotel de glamping.* 222

Figura 140 *Grafica de la validación de factibilidad de las simulaciones de diferentes escenarios.* 226

1. Capítulo I: Antecedentes

1.1 Tema

Análisis técnico para la implementación de FTTR en ISPs para mitigar las limitaciones de cobertura en redes WiFi 6.

1.2 Problema

La tecnología WiFi 5 presenta un avance significativo en redes inalámbricas, debido a su capacidad para manejar mayores anchos de banda, sin embargo, se ve cada vez más limitado por las exigencias actuales, con el crecimiento de los servicios de streaming de audio y vídeo que usan altas resoluciones, esto significa un consumo de ancho de banda elevado por dispositivo, además, en entornos con múltiples obstáculos físicos, interferencias electromagnéticas o áreas extensas. Estos factores se traducen en una experiencia pobre para el usuario final.

La tecnología WiFi 6 viene con desafíos más notorios, como el alcance y la penetración de obstáculos físicos, ya que, si bien logra aprovechar de manera más eficiente el uso del espectro, con frecuencias de 5 GHz, este aumento en la frecuencia es el motivo por el cual tiene todavía menos alcance en inmuebles domésticos.

Existe una tendencia generalizada de una actualización paulatina hacia las versiones más actuales de WiFi en el país, la demanda de conectividad de alta velocidad es cada vez mayor (Cope, 2021), y el desarrollo periódico de nuevas tecnologías con mejoras sustanciales en sus características inalámbricas no va a parar, como 802.11be, anunciado por WiFi Alliance el pasado 9 de enero del 2024 (Aguilar, 2025), son motivos clave, hay una necesidad no de solo aumentar el ancho de banda de los planes de los ISP constantemente, sino de asegurar que la velocidad anunciada sea la percibida por el usuario final.

El uso de equipos no adecuados para manejar las altas velocidades que se contratan por proveedores de servicio de internet es una de las causas por la que los usuarios finales presentan malestar o inconformidad por el bajo rendimiento de su conexión a internet, frente a la velocidad teórica ofrecida por el proveedor.

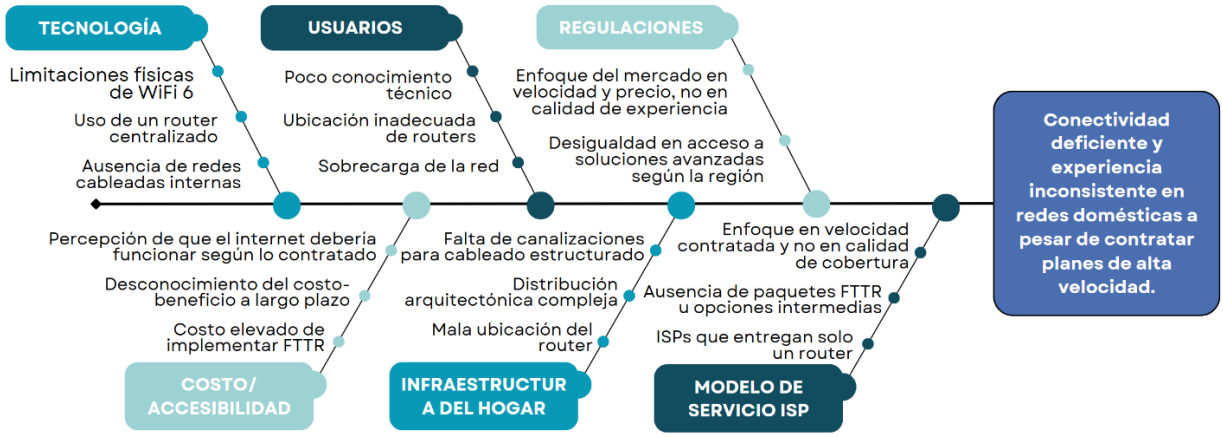
Las limitaciones inherentes a la propagación de ondas de radio dificultan una cobertura homogénea en interiores, especialmente en construcciones con muros gruesos o distribución irregular de habitaciones, situación recurrente en inmuebles considerados patrimonio en el país y la realidad de muchos ecuatorianos (Sánchez, 2025). Esta contradicción entre el alto rendimiento teórico de WiFi 6 y sus resultados reales en condiciones residenciales o comerciales plantea la necesidad de soluciones que garanticen calidad de servicio.

FTTR, o Fiber To The Room, se presenta como una tecnología innovadora que redefine el concepto de conectividad en el hogar y entornos empresariales. A diferencia de las soluciones tradicionales en las que la señal WiFi se distribuye desde un único punto, y en algunos casos, se ramifica a extensores de red de forma inalámbrica, o alámbrica en el mejor de los casos, pero que de todas formas se ve afectada por obstáculos físicos, interferencias y la degradación de la señal con la distancia (Delgado, 2024). FTTR propone una red de fibra óptica que llega directamente a cada habitación o área clave del inmueble. Esta arquitectura permite mitigar las principales limitaciones que enfrentan los usuarios al adoptar routers con tecnología WiFi 6 o superior, como la pérdida de velocidad en zonas alejadas, la congestión del canal inalámbrico o la inestabilidad en la cobertura. Al garantizar conexiones de alta velocidad con latencia mínima en cada punto de acceso, debido a la adopción de medios ópticos para la transmisión de la información, FTTR no solo maximiza el rendimiento de los dispositivos compatibles con WiFi de última generación, sino que también extiende su funcionalidad de manera uniforme y predecible, superando así las restricciones del entorno físico y los límites de las redes FTTH

convencionales, a continuación, en la Figura 1 se presenta el diagrama de Ishikawa de la problemática planteada.

Figura 1

Diagrama de Ishikawa.



Nota: En la figura se puede observar el diagrama de Ishikawa correspondiente al tema del trabajo de titulación, con sus causalidades, problemas, y efecto. Autoría propia.

Se puede apreciar los principales obstáculos relacionados con los problemas de conectividad que puede presentar cualquier persona que tenga contratado un servicio de conexión a internet, y utilice tecnología WiFi para acceder a la red, sin limitarnos a WiFi 6, ya que los problemas de conexión se pueden dar incluso con frecuencias de 2.4GHz.

1.3 Objetivos

1.3.1. *Objetivo General*

Diseñar un modelo técnico para la implementación de tecnología FTTR en proveedores de servicios de internet, que permita la mitigación de las limitaciones de cobertura de WiFi 6, y escalable a sus futuras generaciones.

1.3.2. *Objetivos Específicos*

- Levantar información para establecer los criterios técnicos de la viabilidad de la implementación de redes FTTR en hogares y empresas, considerando diferentes topologías, componentes, métodos de instalación y requerimientos de los ISP.
- Identificar las limitaciones técnicas y físicas de la tecnología WiFi 6 con FTTR en entornos residenciales y empresariales, mediante pruebas controladas y revisión bibliográfica.
- Diseñar el modelo técnico de implementación de FTTR para el usuario final, acompañado de recomendaciones que faciliten su adopción en el corto y mediano plazo.
- Establecer una validación del modelo técnico de implementación de FTTR mediante escenarios simulados y criterios de factibilidad técnica y operativa para ISPs emergentes.

1.4 Alcance

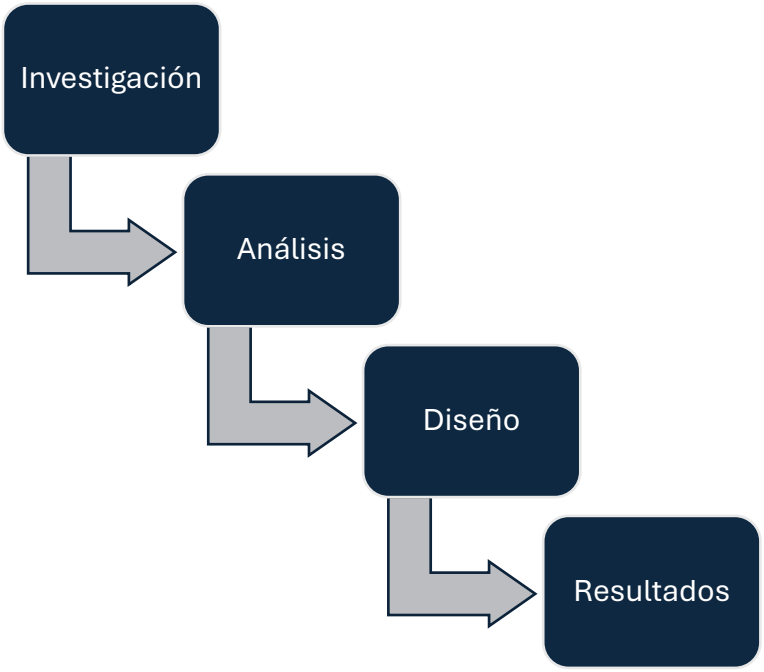
El presente trabajo tiene como objetivo analizar técnicamente la viabilidad de implementar la tecnología FTTR en proveedores de servicios de Internet como una solución efectiva a las limitaciones de cobertura presentes en redes WiFi 6 (López, 2020).

El estudio se limitará a entornos residenciales y empresariales, considerando casas unifamiliares de dos plantas, y oficinas de medianas empresas. No se abordará la implementación física ni el despliegue comercial a gran escala, sino que se enfocará en la validación técnica del concepto.

Para el desarrollo del análisis se utilizará un modelo lineal y secuencial, dividida en cuatro fases utilizando una metodología en cascada, descritas a continuación en la Figura 2.

Figura 2

Metodología en cascada.



Nota: La presente figura representa la metodología que se va a seguir en 4 fases de desarrollo, para la culminación del trabajo de grado. Autoría propia.

En la fase inicial, se recopilará información técnica de fuentes bibliográficas, artículos científicos, normas y casos de estudio que aborden los principios técnicos de la tecnología FTTR y sus componentes, para la implementación en ISPs del país, buscando que sea una adopción compatible e idónea para los nuevos proveedores de servicio de internet. Por otro lado, la tecnología FTTR extiende la fibra óptica hasta cada habitación, proporcionando una solución efectiva para mejorar la cobertura y la estabilidad de la red en interiores (Bonelinks, 2023).

En la segunda fase, se identificará las limitaciones de las redes WiFi 6 con FTTR, mediante pruebas controladas en entornos reales, y revisiones bibliográficas sobre el tema, ya que por sí sola esta tecnología inalámbrica, que, aunque ofrecen mejoras significativas en

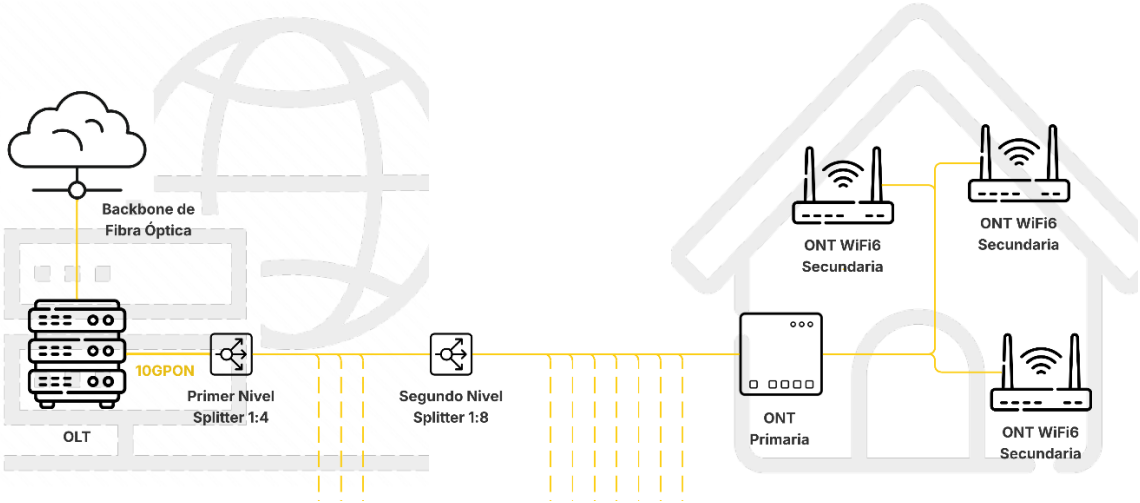
velocidad y eficiencia, presenta limitaciones en la cobertura, especialmente en entornos residenciales con múltiples obstáculos físicos (Utkarsh Singh, 2023). Estas restricciones afectan la calidad de la conexión y la experiencia del usuario. La integración de FTTR con tecnologías como XGS-PON permite alcanzar velocidades simétricas de hasta 10 Gbps, mejorando significativamente el rendimiento de la red (Larry FS, 2024a).

En la tercera fase, se diseñará un modelo técnico de implementación FTTR que contemple desde la distribución de puntos de acceso ópticos en interiores hasta la selección de equipos activos y pasivos, procurando una cobertura total sin pérdida de rendimiento, facilitando así la adopción de la tecnología, por parte de ISPs, y usuarios finales por medio de los ISPs. El modelo incluirá esquemas de integración con redes existentes GPON y XGS-PON, considerando también la arquitectura física de las edificaciones y las condiciones operativas de ISPs emergentes. Se desarrollarán guías prácticas y recomendaciones técnicas que permitan a los proveedores adoptar la tecnología FTTR de forma escalable y eficiente en entornos reales.

En la cuarta fase, se realizará una validación integral del modelo técnico de implementación FTTR, mediante escenarios simulados que reflejen condiciones reales de operación en hogares y pequeñas empresas. Se evaluarán indicadores de desempeño como cobertura, latencia, estabilidad y velocidad efectiva, contrastando estos resultados con redes tradicionales WiFi 6 o cableado Ethernet. Adicionalmente, se aplicarán criterios de factibilidad técnica y operativa orientados a ISPs emergentes, considerando facilidad de instalación, compatibilidad con infraestructuras GPON/XGS-PON existentes y su escalabilidad.

Figura 3

Diagrama de la arquitectura.



Nota: En la figura se puede observar los aspectos fundamentales en los que se centra el proyecto, la red de distribución de FTTR. Autoría propia.

La Figura 3 muestra el diagrama de arquitectura de la tecnología FTTR implementada en una red comprendida desde un ISP hasta el usuario final, donde la fibra óptica se ramifica desde la ONT primaria, hacia las distintas ONT que se ubican en puntos estratégicos del inmueble, abarcando así todos los puntos necesarios para una correcta distribución de la señal de WiFi 6a.

1.5 Justificación

El incremento de dispositivos conectados y el crecimiento de la demanda de contenidos digitales han puesto en evidencia las limitaciones de cobertura, estabilidad y rendimiento de las redes inalámbricas actuales (UNCTAD, 2024), incluso con tecnologías como WiFi 6. En entornos residenciales, estos problemas afectan directamente la experiencia del usuario y la calidad del servicio que ofrecen los proveedores de Internet.

La tecnología FTTR representa una evolución del modelo FTTH, al extender la fibra óptica hasta cada habitación del hogar, lo cual garantiza una transmisión de datos más estable

y de mayor velocidad (Tecnorep, 2024). Esta solución permite reducir las pérdidas de señal asociadas a interferencias, obstáculos físicos y limitaciones propias del espectro inalámbrico.

Este proyecto se justifica al ofrecer a los ISPs una alternativa técnica viable para mejorar la calidad del servicio en redes domésticas, mediante una propuesta de red FTTR que responda a las condiciones actuales del mercado. Además, se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 9, que promueve la infraestructura resiliente, la industrialización sostenible y la innovación tecnológica (Pacto Mundial ONU, 2023).

De acuerdo con el Plan Nacional de Desarrollo 2021–2025, específicamente el Eje 1 (Económico y Generación de Empleo), se establece como objetivo el fortalecimiento del sector de telecomunicaciones mediante la modernización de infraestructuras y servicios (Secretaría Nacional de Planificación, 2021). FTTR responde a esta directriz al ofrecer una arquitectura escalable, de alta eficiencia y preparada para soportar futuras generaciones de WiFi.

Al analizar técnicamente esta tecnología desde la perspectiva del análisis, diseño, y la viabilidad de implementación, se generará conocimiento técnico aplicable para ISPs locales, aportando así al desarrollo del sector y a una mejor calidad de conectividad en los hogares.

2. Capítulo II: Estado del Arte

Este capítulo presenta una revisión teórica exhaustiva de los principales conceptos tecnológicos y científicos que sustentan el desarrollo del presente trabajo de grado. La información recopilada permite establecer los fundamentos necesarios para comprender las limitaciones de cobertura presentes en redes WiFi 6, y cómo la tecnología FTTR puede representar una alternativa técnica viable para mejorar la conectividad en entornos residenciales y empresariales, especialmente para proveedores de servicios de Internet emergentes. Se abordarán los principios generales de las redes cableadas e inalámbricas, comenzando con una descripción de los sistemas de comunicaciones ópticas y de radiofrecuencia, se explorarán los conceptos de Internet y los servicios que ofrecen los ISPs, junto con los medios físicos utilizados en la transmisión de datos como el cable coaxial y la fibra óptica. Con esta base, se estudiarán en detalle las tecnologías FTTH y FTTR, sus arquitecturas, componentes y ventajas técnicas, comparando su evolución y aplicabilidad en escenarios reales. En la parte final del capítulo, se examinarán los estándares WiFi, desde WiFi 5 hasta las proyecciones de futuras generaciones como WiFi 7, haciendo énfasis en las mejoras de rendimiento, eficiencia espectral, y número de dispositivos soportados, así como las limitaciones que persisten en términos de cobertura. Asimismo, se introduce el papel de la WiFi Alliance en la estandarización y adopción global de estas tecnologías.

2.1 Fundamentos de Redes y Comunicaciones

Las redes cableadas son la base de la interconexión digital, caracterizadas por su estabilidad y baja susceptibilidad a interferencias, lo que asegura un flujo de datos confiable (Stallings, 2020). Aunque el par trenzado y el coaxial fueron comunes, la creciente demanda de velocidad ha posicionado a la fibra óptica como el medio dominante. La fibra permite altas velocidades y mayores distancias sin degradación de la señal, siendo fundamental para tecnologías como FTTH, XGS-PON y FTTR.

El diseño de estas redes es complejo, abarcando desde la topología hasta la gestión de energía, y cualquier modificación suele requerir intervención física. Las conexiones cableadas son preferidas en entornos empresariales para servidores y equipos de alta demanda, y en hogares para dispositivos que requieren baja latencia como Smart TVs o consolas de videojuegos. La tendencia actual es hacia arquitecturas convergentes donde la fibra se integra cada vez más cerca del usuario, combinándose con soluciones inalámbricas para aprovechar la robustez física y la flexibilidad (Zeng & Li, 2019).

2.1.1. *Redes cableadas e inalámbricas*

Las redes de datos, esenciales para el intercambio de información digital, se dividen en cableadas e inalámbricas. Aunque cumplen funciones similares, se diferencian en su medio de transmisión, instalación, rendimiento y mantenimiento (Tanenbaum & Wetherall, 2010).

Las redes cableadas usan medios físicos como cobre o fibra óptica. Son valoradas por su estabilidad, baja latencia y mayor ancho de banda. Su diseño y modificaciones suelen requerir intervención física. Las redes inalámbricas, por otro lado, transmiten datos mediante ondas de radiofrecuencia. Ofrecen flexibilidad y facilidad de instalación, siendo el estándar Wi-Fi (IEEE 802.11) el más extendido.

La calidad del servicio (QoS) es más predecible en redes cableadas, mientras que en las inalámbricas puede fluctuar por interferencias o congestión. En cuanto a seguridad, las redes cableadas son menos vulnerables a accesos no autorizados externos, a diferencia de las inalámbricas que requieren medidas de seguridad robustas como el cifrado WPA3.

En términos de movilidad y escalabilidad, las redes inalámbricas destacan al permitir conexiones desde diversos puntos. Sin embargo, una alta densidad de dispositivos puede causar congestión y latencia (Kurose & Ross, 2021).

2.1.2. *Proveedores de Servicios de Internet (ISP)*

Los ISP son fundamentales para el acceso digital global, ofreciendo conectividad y servicios adicionales como telefonía o alojamiento web (Barros & Gutiérrez, 2021). Su operación se basa en una infraestructura de red robusta, desde el backbone hasta la última milla, donde la calidad depende de la eficiencia en la distribución de capacidad y el mantenimiento.

Los ISP regionales enfrentan una dura competencia y deben adoptar soluciones eficientes y escalables como FTTH o FTTR para diferenciarse a través de la calidad y cobertura.

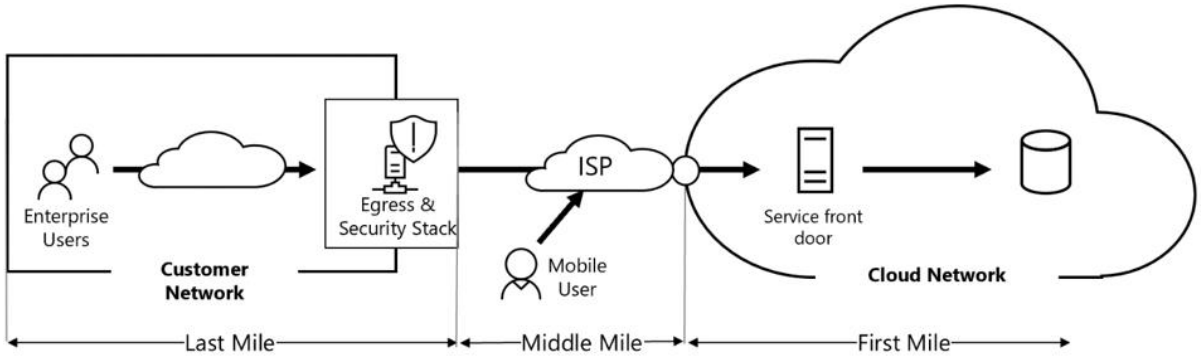
Regulatoriamente, los ISP deben cumplir normativas sobre neutralidad de red y protección de datos, con entidades como ARCOTEL en Ecuador supervisando aspectos técnicos y comerciales (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), 2024). Económicamente, buscan reducir costos operativos mediante tecnologías pasivas, redes convergentes y herramientas de monitoreo para optimizar el rendimiento.

2.1.3. *Internet y conectividad de última milla*

La conectividad a Internet es un pilar esencial de la sociedad digital, operando a través de una red jerárquica que permite la transmisión de datos desde servidores remotos hasta los usuarios. Dentro de esta arquitectura, el concepto de "última milla" se refiere al tramo final de conexión que une la infraestructura del proveedor de servicios de Internet con el cliente (Stallings, 2020). Este segmento puede utilizar diversas tecnologías como par trenzado, cable coaxial, fibra óptica o enlaces inalámbricos, dependiendo de la infraestructura existente y el entorno geográfico. En la mayoría de caso que se habla de última milla, se refiere a una red WAN, la cual se representa en la Figura 4, además de la milla inicial, y milla intermedia.

Figura 4

Representación de la última milla en una red WAN.



Nota: Se muestra en tres partes la topología de una red WAN, específicamente la sección de Last Mile (Ultima milla), donde se hace la conexión final hacia el inmueble. Obtenido de: (Microsoft, 2024).

La importancia de la última milla es crucial porque representa el punto más crítico para determinar la velocidad real, latencia, pérdida de paquetes y estabilidad del servicio. A pesar de los avances en las redes troncales y metropolitanas, la calidad de la experiencia del usuario depende en gran medida de la eficiencia de este tramo final. Estudios demuestran que las limitaciones en la última milla son responsables de las discrepancias entre el ancho de banda contratado y el percibido, especialmente en áreas urbanas densas o rurales con infraestructura limitada. Estas limitaciones han impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías de acceso como FTTH, DOCSIS 4.0, redes inalámbricas fijas 5G.

El despliegue eficiente de la última milla es una prioridad para los ISP que buscan ofrecer servicios competitivos y estables. En América Latina, los desafíos incluyen altos costos de instalación, permisos municipales complejos, interferencias electromagnéticas en zonas urbanas saturadas y dificultades topográficas en áreas rurales. Para superar estos obstáculos, las estrategias actuales se enfocan en modelos mixtos, combinando redes troncales de fibra óptica con nodos intermedios inalámbricos o tecnologías de acceso compartido (Zeng & Li, 2019).

2.2 Comunicaciones Ópticas

Las comunicaciones ópticas han transformado las telecomunicaciones modernas, permitiendo la transmisión de vastos volúmenes de datos a largas distancias con mínima pérdida y alta inmunidad a interferencias electromagnéticas. A diferencia de los medios de cobre convencionales, estas comunicaciones utilizan luz como medio de transmisión a través de fibras de vidrio o plástico. Esta tecnología ha sido crucial para el desarrollo de infraestructuras de red de alta capacidad, incluyendo enlaces troncales internacionales, redes metropolitanas y, cada vez más, redes de acceso para el usuario final (Agrawal, 2021).

El fundamento físico de las comunicaciones ópticas es la reflexión interna total, que guía el haz de luz a lo largo de la fibra con una atenuación mínima. Las fibras ópticas se clasifican principalmente en monomodo (para largas distancias y alta velocidad) y multimodo (para distancias cortas y aplicaciones internas). La luz es generada por diodos láser o LEDs, típicamente en longitudes de onda entre 850 nm y 1550 nm, donde la fibra exhibe mínima absorción y dispersión. Adicionalmente a sus ventajas en velocidad y capacidad, las fibras ópticas ofrecen un alto grado de seguridad, ya que interceptar la señal es difícil sin afectar físicamente el medio (Keiser, 2022).

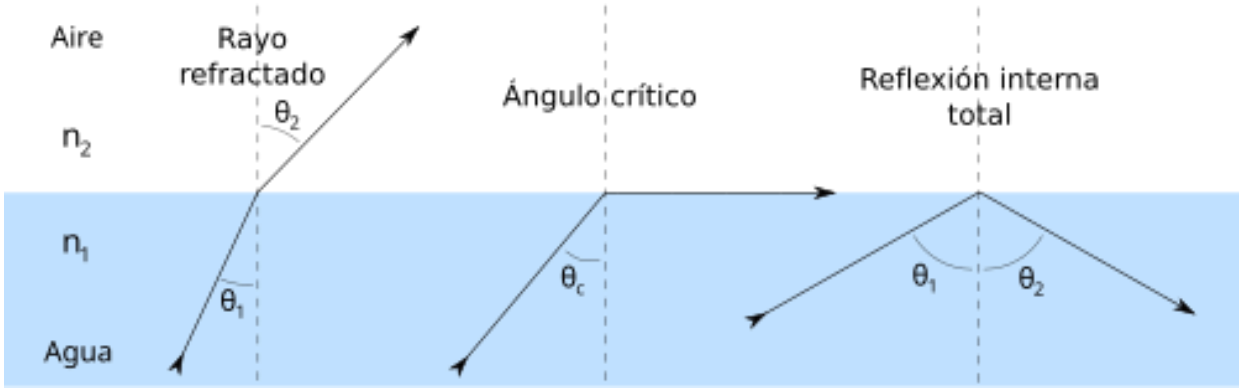
Las comunicaciones ópticas permiten la escalabilidad sin necesidad de reemplazar el medio físico, un aspecto vital ante el crecimiento constante del tráfico de datos generado por servicios modernos como videoconferencias, juegos en línea y transmisión 4K/8K. Esto las convierte en la opción preferida frente a tecnologías con limitaciones físicas y espectrales como ADSL o HFC, consolidando las comunicaciones ópticas no solo como una solución de alto rendimiento, sino también como una base tecnológica robusta para futuras innovaciones en redes de acceso y distribución.

2.2.1. *Principios de transmisión óptica*

La transmisión óptica se basa en la propagación de luz a través de una fibra dieléctrica. Este proceso fundamental se rige por el fenómeno de la reflexión interna total, donde la luz se mantiene confinada dentro del núcleo de la fibra debido a la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento, asegurando así mínimas pérdidas a lo largo de la propagación (Saleh & Teich, 2019), dicho de los efectos físicos que se presentan dentro de este medio, en la Figura 5 se representan los efectos ópticos en la incidencia de luz.

Figura 5

Efectos ópticos en la incidencia de luz.



Nota: Se puede ver el efecto del Angulo de incidencia de la luz cuando este pasa de medio a otro, y comprender de mejor manera como la luz viaja dentro de la fibra óptica. Obtenido de: (Jorge García, 2012).

La eficiencia de la transmisión óptica está determinada por varios parámetros físicos. La atenuación se refiere a la pérdida de potencia óptica con la distancia, causada por la absorción del material, la dispersión Rayleigh e imperfecciones de la fibra. La dispersión cromática ocurre cuando diferentes longitudes de onda dentro de la misma señal viajan a velocidades distintas, provocando una distorsión temporal que limita la capacidad de transmisión en sistemas de alta velocidad. Adicionalmente, en fibras multimodo, la dispersión modal surge porque los diferentes modos de propagación llegan en tiempos distintos, lo que reduce la fidelidad de la señal en largas distancias (Hecht, 2019).

Los sistemas ópticos modernos incorporan tecnologías avanzadas para maximizar la eficiencia del enlace. Los amplificadores ópticos, como los basados en erbio, permiten regenerar la señal directamente en formato óptico, extendiendo significativamente la distancia de transmisión. La multiplexación por división de longitud de onda (WDM) posibilita el envío de múltiples señales simultáneamente por una misma fibra, cada una en una longitud de onda distinta, incrementando exponencialmente la capacidad sin necesidad de desplegar nuevas fibras físicas. Estos principios y tecnologías han consolidado la fibra óptica como el estándar para redes de alta capacidad, desde los enlaces troncales hasta las conexiones finales al usuario.

2.2.2. *Arquitecturas de acceso FTTH y FTTR*

Históricamente, el cable coaxial dominó las telecomunicaciones por su uso de señales eléctricas y costo inicial bajo. Sin embargo, su ancho de banda limitado y la degradación de señal con la distancia requerían amplificadores.

En contraste, la fibra óptica transmite datos mediante pulsos de luz, ofreciendo mayor velocidad, menor latencia y alta inmunidad a interferencias a grandes distancias sin degradación. Esto la hace superior al coaxial (Keiser, 2022).

Aunque la fibra implica una mayor inversión inicial, su escalabilidad, durabilidad y eficiencia energética para tecnologías como XGS-PON y FTTR la convierten en el medio preferido para redes modernas. Su adopción reemplaza progresivamente al coaxial para mejorar la calidad y cerrar brechas de conectividad (Stallings, 2020).

Existen dos topologías principales: punto a punto (fibra dedicada por usuario, más costosa) y punto a multipunto mediante GPON. GPON es la más común, usando splitters pasivos para compartir una fibra entre varios usuarios, reduciendo costos sin sacrificar calidad para usos residenciales. GPON ofrece velocidades de hasta 2.5 Gbps de descarga, y su evolución, XGS-PON, alcanza los 10 Gbps (Minolli, 2020).

La implementación de FTTH implica una planificación detallada y enfrenta el desafío del costo inicial, especialmente en zonas de baja densidad. Sin embargo, FTTH se ha consolidado como la solución de acceso preferida por su robustez y escalabilidad.

FTTR representa un avance en las redes de acceso óptico, extendiendo la fibra óptica directamente a cada habitación o zona clave de un inmueble. Esta arquitectura aborda las limitaciones de cobertura, interferencia y velocidad de las redes Wi-Fi, incluso en sus versiones más recientes (Delgado, 2024). Mientras que FTTH lleva la fibra hasta la entrada del hogar, FTTR garantiza una continuidad óptica completa dentro del mismo, eliminando los cuellos de botella que surgen al convertir la señal de óptica a inalámbrica. Esto asegura que cada espacio reciba una señal óptima, ideal para hogares con múltiples dispositivos y altas demandas de ancho de banda.

El funcionamiento de FTTR implica la instalación de múltiples terminales ópticas distribuidas por la casa, interconectadas a través de una red de fibra interna. Estas terminales actúan como puntos de acceso Wi-Fi o nodos de red cableada, alimentados por un nodo principal conectado a la red FTTH externa (Huawei, 2023). En configuraciones avanzadas, puede integrarse con tecnologías XGS-PON para ofrecer hasta 10 Gbps por usuario en escenarios de uso simultáneo.

2.2.3. *Gestión de splitters ópticos en redes FTTR*

El uso de splitters ópticos es un elemento fundamental en las redes de acceso basadas en fibra, ya que permite la distribución pasiva de la señal óptica desde un único hilo de fibra hacia múltiples terminales sin requerir alimentación eléctrica ni elementos activos intermedios. En entornos FTTR, el concepto de splitteo se extiende hacia la red interna del inmueble, lo que introduce nuevos criterios de diseño y dimensionamiento.

En redes FTTR, los splitters pueden ubicarse tanto en puntos de concentración cercanos al usuario como dentro de la propia vivienda, permitiendo dividir la señal óptica hacia distintas

habitaciones o zonas (Chanclou & others, 2022). Este enfoque facilita una continuidad óptica completa desde la red del operador hasta cada terminal interior, manteniendo las ventajas de baja latencia y alta estabilidad propias de la fibra. La selección del ratio de split, como 1:2, 1:4, 1:8 u 1:16, depende directamente del presupuesto óptico disponible, la tecnología PON utilizada y los requisitos de ancho de banda por habitación.

Cada proceso de splitteo introduce pérdidas ópticas acumulativas, las cuales deben ser cuidadosamente consideradas durante la planificación de la red FTTR. Estas pérdidas incluyen no solo la atenuación inherente al splitter, sino también las asociadas a conectores, empalmes y curvaturas de la fibra en planta interior, por esto, es común limitar los niveles de split o adoptar arquitecturas híbridas que combinan splitters de baja relación con enlaces punto a punto en el interior de la vivienda (Technologies, 2023b).

Desde el punto de vista operativo, la gestión de splitters en FTTR requiere una adecuada supervisión del presupuesto óptico y una correcta provisión de servicios mediante mecanismos de gestión como OMCI, que es un protocolo clave en redes GPON que permite a la OLT en la central controlar, configurar y supervisar de forma remota las ONT/ONU. Permitiendo identificar problemas en la red interna.

2.3 Comunicaciones Inalámbricas

Las comunicaciones inalámbricas abarcan tecnologías que permiten la transmisión de información sin medios físicos, utilizando ondas electromagnéticas (radio, microondas, infrarrojas) para conectar dispositivos de manera dinámica y flexible. Son cruciales para expandir el acceso digital en áreas urbanas y rurales debido a su capacidad de cobertura y menor infraestructura (S. Zhang et al., 2022).

A diferencia de las redes cableadas, las inalámbricas destacan por su facilidad de despliegue, escalabilidad y movilidad, lo que las hace ideales donde el cableado es inviable, como en redes Wi-Fi, 5G o IoT. Sin embargo, enfrentan limitaciones como interferencia

electromagnética, pérdida de señal, retardo variable y vulnerabilidad ambiental, que afectan la calidad del servicio y exigen técnicas avanzadas de gestión de espectro y modulación.

El espectro radioeléctrico es un recurso limitado, con bandas de 2.4 GHz y 5 GHz comunes en uso residencial. Nuevas tecnologías como Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7 incorporan la banda de 6 GHz para reducir la congestión. Las características físicas del entorno, como paredes, impactan directamente la calidad de la señal, causando absorción y dispersión, lo que plantea desafíos en entornos densos y afecta la experiencia del usuario (Zubair et al., 2020).

2.3.1. *Principios de radiofrecuencia*

La radiofrecuencia (RF) es el segmento del espectro electromagnético (3 kHz a 300 GHz) utilizado para la transmisión inalámbrica de información a través de ondas de radio. Es fundamental en sistemas de comunicación modernos, desde la radiodifusión hasta las redes móviles y Wi-Fi, permitiendo el envío y recepción de señales mediante antenas que convierten energía eléctrica en electromagnética (Goldsmith, 2005).

La propagación de señales RF está influenciada por fenómenos como la reflexión, refracción y atenuación, que varían según la frecuencia y el entorno. Frecuencias bajas ofrecen mejor penetración y cobertura, pero menor ancho de banda. Por el contrario, frecuencias más altas permiten mayores velocidades, pero tienen menor alcance y son más sensibles a obstáculos, lo que requiere un diseño cuidadoso en interiores donde paredes y estructuras afectan la señal.

En redes domésticas, las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz son las más usadas. La de 2.4 GHz ofrece mayor alcance, mientras que la de 5 GHz proporciona mayor velocidad y menor congestión. Tecnologías recientes como Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7 han incorporado la banda de 6 GHz para mejorar la disponibilidad de canales y reducir la latencia, aunque esto también incrementa los desafíos de propagación en interiores (Rappaport et al., 2017).

Un diseño eficiente de sistemas RF debe considerar la selección del canal, la potencia de transmisión, la ganancia de antenas y la relación señal-ruido. Además, es crucial emplear técnicas avanzadas de modulación, codificación y multiplexación para maximizar el rendimiento y la robustez del sistema frente a condiciones cambiantes del canal (Goldsmith, 2005).

2.3.2. *Ley del cuadrado inverso y atenuación*

La ley del cuadrado inverso establece que la intensidad de una señal electromagnética disminuye con el cuadrado de la distancia desde su fuente, en un espacio ideal. Permite calcular la intensidad de la señal, y se expresa como la Ecuación 1.

Ecuación 1

Formula de la ley del cuadrado inverso.

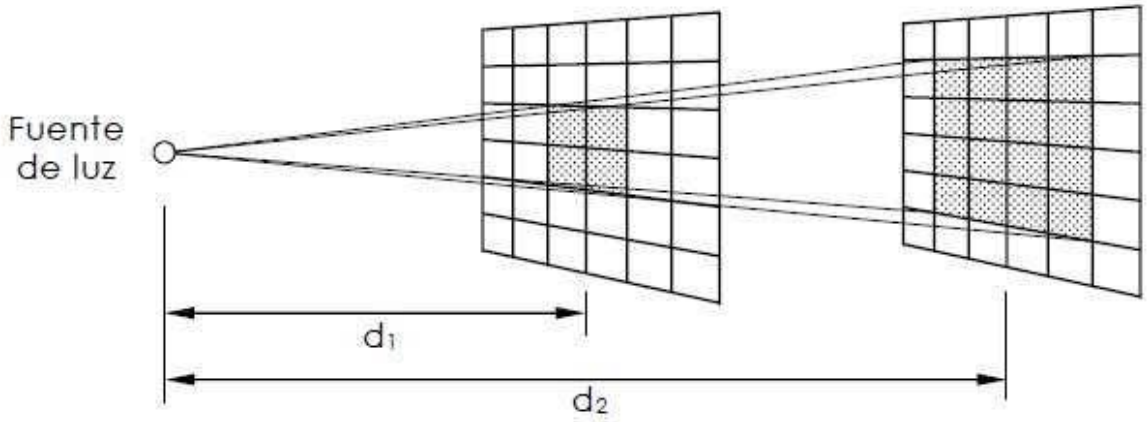
$$I \propto 1/d^2 \tag{1}$$

Nota: I representa la intensidad, d representa la distancia a la fuente. Obtenido de: ***(Costa & Arlego, 2013)****.*

Implicando que, al duplicar la distancia, la potencia se reduce a un cuarto (Rappaport, 2003), este cálculo se puede ver representado en la Figura 6, donde el área de cobertura aumenta al cuadrado de la distancia.

Figura 6

Ley del cuadrado inverso.



Nota: La figura representa la ley del cuadrado inverso desde una fuente de luz contra dos distancias equivalentes entre sí. Obtenido de: ***(Costa & Arlego, 2013)****.*

La intensidad se mide en dB, esta es una escala logarítmica, donde básicamente cada 3dB la señal se multiplica por dos, cada 10dB se multiplica por 10 veces su valor.

En redes Wi-Fi, esta ley ayuda a estimar la cobertura de un punto de acceso, aunque factores como paredes y materiales la alteran. Sirve como base teórica para entender la degradación de la señal, destacando la necesidad de mayor potencia o antenas con más ganancia a mayor distancia.

Generalmente, las frecuencias más bajas (como la de 2.4 GHz en Wi-Fi) tienen mayor capacidad de penetración, haciéndolas adecuadas para entornos con múltiples barreras. Las frecuencias más altas (como 5 GHz o 6 GHz), aunque ofrecen mayor ancho de banda, son más fácilmente absorbidas o reflejadas por estructuras sólidas.

En interiores, materiales de construcción como concreto, ladrillo y metal son barreras altamente atenuantes, lo que reduce significativamente la intensidad de la señal y crea "zonas muertas" o áreas con baja calidad de servicio (B. Wang et al., 2018). Para las redes Wi-Fi, esto significa que la banda de 2.4 GHz penetra mejor, pero puede estar más congestionada, mientras

que la banda de 5 GHz ofrece mayor velocidad, pero sufre más atenuación por muros (Qiao et al., 2022).

Existen fenómenos que resultan en atenuación, retardo, distorsión o incluso la pérdida total de la señal, dependiendo de la naturaleza del obstáculo y la frecuencia de la onda.

- La reflexión ocurre cuando una onda choca con una superficie impenetrable (ej. paredes de concreto), rebotando parte de su energía.
- La refracción se da cuando la señal atraviesa materiales de diferente densidad, cambiando su dirección y velocidad.
- La difracción permite que la señal rodee objetos, aunque con pérdida de intensidad.
- La dispersión descompone la onda en múltiples trayectorias de menor energía al encontrarse con superficies rugosas.
- La absorción convierte la energía de la onda en calor al penetrar ciertos materiales, como el agua o el hormigón, atenuando la señal (Rappaport & Theodore S, 2002).

En entornos residenciales o empresariales, estos efectos se combinan generando multitrayectoria, lo que provoca fluctuaciones en la intensidad de la señal, conocidas como "fading" o desvanecimientos. Estos desvanecimientos impactan negativamente la velocidad y estabilidad de la conexión (Khodr et al., 2022).

2.4 Estándares inalámbricos

Los estándares Wi-Fi, definidos por IEEE 802.11, son cruciales para la conectividad inalámbrica local. Han evolucionado constantemente para mejorar velocidad, eficiencia y seguridad, adaptándose a la creciente demanda de ancho de banda (Gast, 2018).

Desde las primeras versiones como 802.11b (11 Mbps) y 802.11g (54 Mbps), la tecnología avanzó significativamente con 802.11n (Wi-Fi 4), que introdujo MIMO y operación

en doble banda (2.4 y 5 GHz), alcanzando hasta 600 Mbps. 802.11ac (Wi-Fi 5) se centró en la banda de 5 GHz, logrando más de 1 Gbps con MU-MIMO. La llegada de 802.11ax (Wi-Fi 6) marcó un hito al incorporar OFDMA y MU-MIMO bidireccional, optimizando la eficiencia en entornos densos con velocidades de hasta 9.6 Gbps.

La evolución más reciente incluye Wi-Fi 6E (que añade la banda de 6 GHz) y Wi-Fi 7 (802.11be). Este último busca redefinir el rendimiento inalámbrico con velocidades teóricas de hasta 46 Gbps, canales más amplios y MLO (Multi-Link Operation), priorizando no solo la velocidad sino también la estabilidad y baja latencia para aplicaciones exigentes como realidad aumentada o streaming 8K (Cisco, 2020).

A pesar de estos avances, el rendimiento real del Wi-Fi en interiores sigue enfrentando desafíos por la propagación de ondas y los obstáculos físicos.

2.4.1. *Estándares IEEE 802.11*

Los estándares Wi-Fi, desarrollados por el grupo IEEE 802.11, definen el funcionamiento de las redes de área local inalámbricas. Su evolución responde a la creciente demanda de conectividad, mayor ancho de banda y eficiencia espectral, siendo fundamentales para el desarrollo de servicios digitales en entornos residenciales y empresariales.

Desde su introducción en 1997, el Wi-Fi ha mejorado significativamente. El estándar original 802.11 ofrecía 2 Mbps, seguido por 802.11b (11 Mbps en 2.4 GHz) y 802.11g (54 Mbps con OFDM). Un avance clave fue 802.11n, que incorporó MIMO y operación en doble banda (2.4 y 5 GHz), alcanzando hasta 600 Mbps y mejorando la tolerancia a interferencias.

El estándar 802.11ac se enfocó en la banda de 5 GHz, aumentando la capacidad con canales más amplios (hasta 160 MHz) y modulación 256-QAM. También introdujo MU-MIMO descendente para una gestión de tráfico más eficiente. Con Wi-Fi 6 (802.11ax), se logró una mejora radical en eficiencia, latencia y densidad de usuarios mediante tecnologías como OFDMA, TWT y BSS Coloring. Wi-Fi 6 opera en ambas bandas (2.4 y 5 GHz) y alcanza

velocidades teóricas de hasta 9.6 Gbps, destacando en la capacidad de manejar múltiples dispositivos en entornos densos (Alliance, 2021).

La evolución continúa con Wi-Fi 6E, que extiende las capacidades de Wi-Fi 6 a la banda de 6 GHz, ofreciendo más espectro libre de interferencias. La próxima gran evolución es Wi-Fi 7 (802.11be), que promete velocidades de hasta 46 Gbps mediante agregación de canales de 320 MHz, modulación 4096-QAM y Multi-Link Operation (MLO), lo que permite el uso simultáneo de múltiples bandas para mayor redundancia y rendimiento.

2.4.2. *WiFi 5, WiFi 6, WiFi 6E y WiFi 7*

La evolución de los estándares Wi-Fi ha sido constante, impulsada por la creciente demanda de velocidad, capacidad y eficiencia en las redes inalámbricas. Cada nueva generación ha introducido tecnologías innovadoras que no solo aumentan el ancho de banda, sino que también mejoran el rendimiento en entornos densos, la latencia y la estabilidad general. La Tabla 1 representa una comparativa de las características principales de Wi-Fi 5, Wi-Fi 6, Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7.

Tabla 1

Tabla comparativa de tecnologías Wi-Fi.

Característica	**Wi-Fi 5 (802.11ac)**	**Wi-Fi 6 (802.11ax)**	**Wi-Fi 6E (802.11ax)**	**Wi-Fi 7 (802.11be)**
Año de introducción	2014	2019	2020	2024
Bandas de frecuencia	5 GHz	2.4 GHz y 5 GHz	2.4 GHz, 5 GHz y 6 GHz	2.4 GHz, 5 GHz y 6 GHz
Velocidad teórica	1 Gbps	9.6 Gbps	9.6 Gbps	46 Gbps
Tecnología clave	256-QAM	1024-QAM	Banda de 6 GHz	4096-QAM

Nota: Se muestra las características principales de forma muy resumida. Adaptado de: (Camps-Mur et al., 2021)

Cada iteración de Wi-Fi ha construido sobre la anterior, impulsando mejoras significativas en la conectividad. Si bien por fines prácticos se omitió varias tecnologías, y solo

se muestra la más distintiva, cada generación toma varias tecnologías de la anterior, y las mejora en la mayoría de los casos. Wi-Fi 5 sentó las bases para el rendimiento de gigabit al enfocarse en la banda de 5 GHz e introducir modulaciones avanzadas y MIMO (Camps-Mur et al., 2021). Wi-Fi 6 cambió el paradigma, priorizando la eficiencia y la capacidad en entornos concurridos, con tecnologías como OFDMA que permiten transmisiones simultáneas a múltiples usuarios, reduciendo la latencia y mejorando la calidad del servicio bajo carga intensa (Bellalta, 2019). Wi-Fi 6E expandió esta eficiencia al abrir la banda de 6 GHz, ofreciendo un espectro mucho más limpio y amplio para aplicaciones de alta demanda (Q. T. Inc., 2021). Finalmente, Wi-Fi 7 se perfila como la cumbre de esta evolución, prometiendo velocidades sin precedentes y una robustez excepcional mediante MLO y canales aún más anchos, orientándose a las necesidades de las aplicaciones más exigentes del futuro.

2.4.3. *Rol de la WiFi Alliance*

La Wi-Fi Alliance, fundada en 1999, es una organización sin fines de lucro clave para la interoperabilidad y certificación de dispositivos Wi-Fi. Su principal objetivo es asegurar que los productos Wi-Fi de más de 800 empresas funcionen conjuntamente bajo los estándares IEEE 802.11 (Alliance, 2022).

Mediante un riguroso proceso de certificación, la Alliance garantiza la compatibilidad técnica, rendimiento y seguridad de los dispositivos, lo que ha impulsado la confianza y adopción masiva del Wi-Fi (Wi-Fi Alliance, 2022). Además, colabora con IEEE en la evolución de los estándares (Wi-Fi 6, 6E, 7) y define sus denominaciones comerciales (ej. "Wi-Fi 5" para 802.11ac).

En seguridad, la Alliance ha promovido protocolos vitales como WPA, WPA2 y WPA3, que aseguran la integridad de las comunicaciones inalámbricas (Alliance, 2023).

2.4.4. *Tendencias hacia futuras generaciones WiFi*

El desarrollo del Wi-Fi es un proceso contínuo impulsado por la creciente necesidad de mayor capacidad, velocidad, eficiencia energética y estabilidad en entornos inalámbricos. Las demandas de tecnologías emergentes como realidad aumentada, vehículos autónomos, hogares inteligentes y streaming 8K exigen redes inalámbricas con alta confiabilidad y baja latencia. La próxima generación, Wi-Fi 8 (aún sin estándar formal), se perfila como una evolución que irá más allá del ancho de banda, enfocándose en la eficiencia del canal, la gestión inteligente del espectro y la coordinación avanzada entre múltiples puntos de acceso (IEEE Standards Association, 2024).

Las futuras líneas de investigación de Wi-Fi se concentran en varios frentes:

- Integración con 5G y 6G: Se busca una arquitectura convergente donde el Wi-Fi sea parte de una red heterogénea coordinada, permitiendo a los dispositivos conmutar fluidamente entre tecnologías de acceso basándose en la calidad de servicio o el tipo de aplicación.
- Gestión Dinámica del Espectro: Se espera el uso de inteligencia artificial para el ajuste automático de canales, potencias y anchos de banda en tiempo real dentro del espectro no licenciado.
- Beamforming Adaptativo Masivo: Incorporación de antenas inteligentes que direccionarán el haz de señal con precisión hacia el usuario, mejorando significativamente la eficiencia espectral.
- Redes Federadas: Puntos de acceso, incluso de distintos proveedores o domésticos, podrán coordinarse para formar mallas cooperativas de alta cobertura.

Estas tendencias son discutidas por el grupo IEEE 802.11 Extremely High Throughput (EHT), con el objetivo de lograr un rendimiento superior a los 100 Gbps con baja latencia,

especialmente en entornos densos como estadios, edificios inteligentes y centros de datos (C. S. Inc., 2023).

2.5 Integración FTTR y WiFi

La integración de FTTR con tecnologías Wi-Fi es una estrategia altamente eficiente para optimizar la conectividad en hogares y empresas, especialmente donde las redes inalámbricas tradicionales se ven limitadas por cobertura, interferencias y rendimiento deficiente. FTTR proporciona enlaces de fibra óptica dedicados directamente a cada habitación o punto de acceso inalámbrico, estableciendo una infraestructura robusta y estable sobre la cual operan los estándares Wi-Fi más avanzados, como Wi-Fi 6 y los futuros (Huawei, 2023).

Esta convergencia resulta en una red híbrida de gran alcance, baja latencia y máxima estabilidad en interiores. El modelo FTTR + Wi-Fi 6 elimina los puntos muertos y las zonas de baja señal comunes en soluciones convencionales FTTH donde un único router central limita la cobertura inalámbrica. Con FTTR, los puntos de acceso Wi-Fi se distribuyen por toda la vivienda, alimentados por enlaces ópticos directos. Esta arquitectura permite una implementación más eficaz de tecnologías Wi-Fi mesh o controladores centralizados para optimizar la asignación de canales, el roaming entre nodos y la calidad de servicio, sin cuellos de botella en el backhaul físico. Además, la fibra óptica mantiene velocidades simétricas en el acceso, crucial para servicios de nube, videollamadas HD y gaming en línea (Larry FS, 2024b).

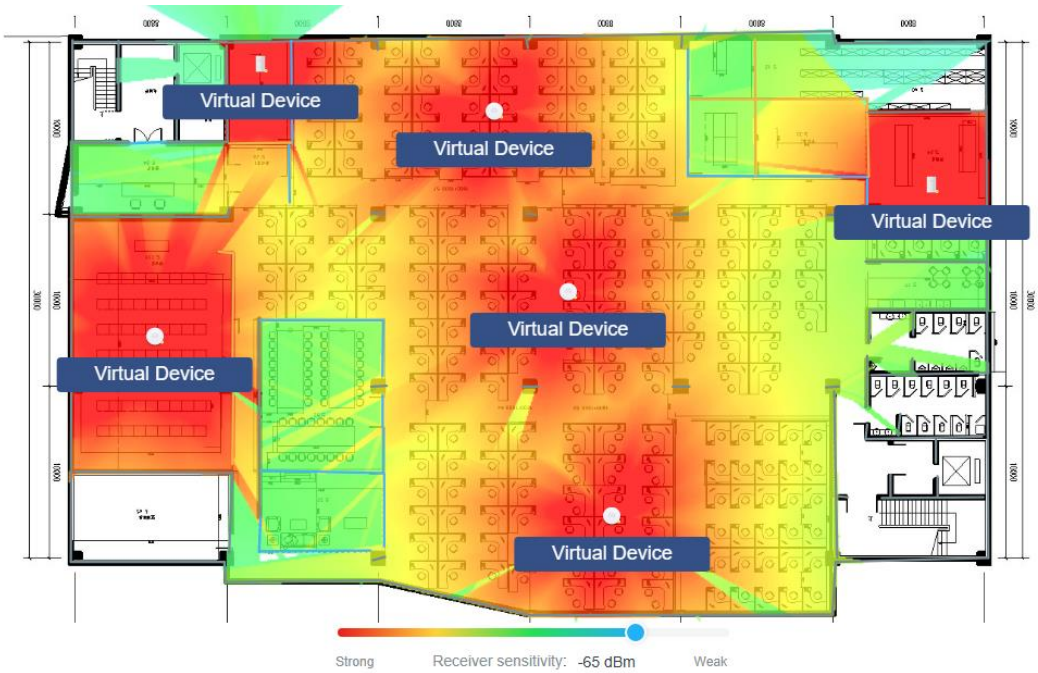
Desde la perspectiva de los Proveedores de Servicios de Internet, esta combinación representa una propuesta de valor diferenciada. Ofrece una experiencia de usuario superior en comparación con los esquemas FTTH tradicionales. Esta integración también mejora la visibilidad y gestión de la red, permitiendo a las plataformas monitorear en tiempo real el estado de cada punto de acceso, ajustar su rendimiento automáticamente y detectar fallos. Al eliminar la dependencia del cobre o coaxial en interiores, FTTR minimiza las interferencias electromagnéticas y aumenta la seguridad de la red.

2.5.1. *Limitaciones de WiFi en interiores*

Las redes Wi-Fi en hogares y empresas enfrentan varias limitaciones que impactan la experiencia del usuario, en especial con estándares avanzados como Wi-Fi 6 y 6E. Como se muestra en la Figura 7, las principales restricciones se deben a factores físicos y ambientales en espacios interiores, representado en un mapa de calor.

Figura 7

Mapa de calor de cobertura WiFi.



Nota: En la figura se muestra en un mapa de calor, cómo la cobertura y capacidad de una red WiFi se comporta generalmente en el interior de un inmueble. Obtenido de: (TP-Link, 2023).

Primero, la atenuación de la señal es significativa debido a la distancia y los obstáculos físicos. Paredes gruesas, techos y ciertos materiales de construcción (como concreto o metal) reducen drásticamente la potencia de la señal, afectando la cobertura y la velocidad. Las bandas de frecuencia más altas (5 GHz, 6 GHz), aunque más rápidas, tienen menor capacidad de penetración que la de 2.4 GHz, lo que limita su efectividad en entornos con muchas barreras (Gómez & Ortiz, 2022).

Segundo, la congestión del espectro es un problema común, especialmente en zonas densamente pobladas. Múltiples redes Wi-Fi operando en canales cercanos causan interferencias, lo que lleva a colisiones de paquetes, mayor latencia y pérdida de datos, reduciendo el rendimiento efectivo de la red incluso con buena intensidad de señal.

Tercero, la ubicación del punto de acceso es crucial. Un router mal posicionado puede dejar zonas del inmueble con cobertura deficiente o nula, afectando la movilidad y el acceso a servicios en tiempo real (Pérez & Morales, 2023).

Finalmente, la proliferación de dispositivos conectados en hogares inteligentes satura el ancho de banda disponible. Cuando el número de smartphones, cámaras IP, sensores y electrodomésticos supera la capacidad del router, se producen retardos, jitter y fallos temporales del servicio.

2.5.2. *Ventajas técnicas de FTTR*

FTTR es una arquitectura de red que lleva la fibra óptica directamente a cada habitación o zona, eliminando los cuellos de botella de cobre o inalámbricos en el interior del inmueble (Chen & Wang, 2023).

Sus principales ventajas técnicas son:

- Estabilidad del Enlace: La fibra óptica es inmune a interferencias electromagnéticas y atenuaciones, garantizando una conexión constante y predecible, ideal para entornos con muchos aparatos electrónicos.
- Altas Velocidades Simétricas: FTTR soporta hasta 10 Gbps simétricos con tecnologías como XGS-PON, crucial para aplicaciones modernas que requieren alto ancho de banda bidireccional, como videollamadas 4K o juegos en línea (H. Zhang & Liu, 2022).
- Eficiencia Energética y Optimización de Espectro: Reduce el consumo de energía al requerir menos componentes activos y facilita la segmentación de la

red, lo que mejora la cobertura y reduce la interferencia al evitar solapamientos de señal.

- Mantenimiento Simplificado y Escalabilidad: Disminuye las incidencias de cableado físico y permite el monitoreo remoto de nodos. Su diseño modular facilita reemplazos rápidos y es altamente escalable, adaptándose a futuras demandas sin necesidad de rediseños completos.

2.5.3. *Implementación de FTTR sobre redes FTTH*

Su implementación sobre FTTH consiste en extender la fibra óptica desde la terminación del acceso del operador hasta puntos internos de la vivienda, permitiendo que cada habitación disponga de una conexión óptica directa. Este enfoque mantiene la infraestructura FTTH existente como base y utiliza la fibra instalada en planta interior para entregar capacidad gigabit, estabilidad y baja latencia de extremo a extremo. La arquitectura puede adoptar esquemas punto a punto, punto a multipunto o configuraciones híbridas que combinan un equipo óptico principal en la vivienda con unidades ópticas secundarias en cada ambiente, seleccionándose la topología según el nivel de capacidad, coste y requisitos de servicio. En todos los casos se emplean ONTs y ONUs compatibles con la tecnología PON desplegada, gestionadas mediante OMCI y configuradas para distribuir servicios residenciales, enlaces WiFi y, en algunos casos, tráfico segmentado por VLAN y políticas de calidad de servicio (Tao et al., 2023).

La planificación del recorrido de fibra dentro de la vivienda exige evaluar canalizaciones, cajas de distribución interiores y puntos de fijación para asegurar enlaces protegidos contra curvaturas excesivas o interferencias mecánicas. El diseño debe considerar además el método de alimentación eléctrica para las unidades ópticas de habitación, que pueden depender de la red eléctrica local o de sistemas PoE derivados de la ONT principal.

Finalmente, el operador documenta parámetros de operación, umbrales de alarma y procedimientos de mantenimiento, integrando el sistema FTTR a la gestión existente de la red FTTH.

2.6 Marco Legal

El despliegue y la operación de tecnologías de telecomunicaciones, especialmente en el ámbito de las redes inalámbricas y de fibra óptica en entornos residenciales, están intrínsecamente ligadas a un conjunto de regulaciones y normativas. Estas leyes y disposiciones buscan garantizar no solo el ordenamiento técnico del espectro y la infraestructura, sino también la calidad del servicio ofrecido a los usuarios y la protección de sus derechos. En el contexto de este estudio, es fundamental comprender el marco legal ecuatoriano que rige aspectos los clave.

2.6.1. *Regulación del espectro radioeléctrico y uso de bandas WiFi*

El espectro radioeléctrico es un recurso finito y estratégico que los países regulan a través de organismos especializados. En Ecuador, la ARCOTEL es la entidad encargada de gestionar, controlar y autorizar el uso de frecuencias para servicios inalámbricos, incluido el Wi-Fi. Esta regulación se basa en la Ley Orgánica de Telecomunicaciones y el Plan Nacional de Frecuencias, que establecen los rangos de operación, potencias permitidas, límites de interferencia y la clasificación de bandas licenciadas o no licenciadas (ARCOTEL, 2023).

Tradicionalmente, las tecnologías Wi-Fi han operado en las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz. Sin embargo, la llegada de Wi-Fi 6E y Wi-Fi 7 ha impulsado la habilitación de la banda de 6 GHz para redes inalámbricas de alta capacidad. Esta banda se ha autorizado en varios países tras demostrar su potencial para reducir la congestión y mejorar la calidad del servicio en interiores. En Ecuador, ARCOTEL ha iniciado consultas públicas para considerar la liberación del espectro de 5925 a 7125 MHz, lo que abriría el camino para la adopción de estas nuevas generaciones de Wi-Fi en el país.

El uso eficiente de estas bandas requiere el cumplimiento de parámetros de emisión específicos. Esto incluye la densidad espectral de potencia, mecanismos de selección dinámica de frecuencias (DFS) y límites de interferencia. Estas exigencias son fundamentales para garantizar la coexistencia armoniosa del Wi-Fi con otros servicios que comparten el espectro, como enlaces punto a punto, estaciones de microondas y redes satelitales (UIT, 2022).

2.6.2. *Normativas para la instalación de redes FTTx*

El despliegue de redes de fibra óptica en Ecuador se encuentra regulado por un marco normativo general aplicable a infraestructuras de telecomunicaciones fijas, el cual cubre tanto arquitecturas FTTH como extensiones avanzadas como FTTR. La ARCOTEL y el MINTEL son las entidades responsables de establecer lineamientos técnicos relacionados con el uso del espacio público, la protección de canalizaciones, la seguridad en la manipulación de fibra óptica y la homologación de equipos empleados en redes de acceso (MINTEL, 2023). FTTR no cuenta con una regulación específica, su implementación se rige por las mismas disposiciones técnicas aplicables a redes de fibra óptica de acceso fijo.

En el contexto de FTTR, estas normativas adquieren especial relevancia debido a que la fibra óptica se extiende hacia el interior de los inmuebles, lo que exige un mayor control sobre los métodos de instalación, la integridad estructural de las edificaciones y la seguridad del usuario final. La Ley Orgánica de Telecomunicaciones establece que las instalaciones deben realizarse de forma no invasiva, minimizando afectaciones físicas y garantizando la correcta disposición de ductos internos, cajas de distribución y puntos terminales ópticos (ARCOTEL, 2022). En edificaciones multifamiliares o viviendas de varios niveles, los proveedores deben definir claramente los puntos de interconexión entre la red FTTH externa y la red FTTR interna, asegurando trazados ordenados y técnicamente justificados.

Las regulaciones municipales complementan este marco al controlar el uso de infraestructura urbana y edificaciones privadas, estableciendo criterios para la compartición de

ductos, el uso de canalizaciones existentes y la coordinación con otros servicios básicos. Estas disposiciones impactan directamente en proyectos FTTR, ya que la instalación de fibra en interiores debe respetar radios mínimos de curvatura, distancias entre cajas ópticas y el uso de conectores certificados que garanticen bajas pérdidas por empalme. El cumplimiento de estas especificaciones resulta esencial para preservar el presupuesto óptico del enlace y evitar degradaciones que afecten la calidad del servicio distribuido por habitación.

Desde una perspectiva operativa, la correcta aplicación del marco normativo permitiría que las redes FTTR se integren de forma segura y estandarizada a las infraestructuras FTTH existentes, facilitando la gestión, el mantenimiento y la escalabilidad del servicio. La regulación ecuatoriana aún no distingue formalmente a FTTR como una categoría independiente, el marco actual proporciona las bases legales y técnicas necesarias para su implementación, siempre que se respeten los principios de calidad, seguridad y continuidad del servicio establecidos para las redes de acceso fijo (ARCOTEL, 2022).

2.6.3. *Legislación sobre calidad del servicio en ISPs y derechos del usuario*

La calidad del servicio ofrecido por los ISP está estrictamente regulada para asegurar estándares mínimos de desempeño, continuidad y atención al cliente. En Ecuador, la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones establece los indicadores de calidad que los ISP deben medir, reportar y cumplir. Estos indicadores incluyen parámetros como la velocidad mínima garantizada, la disponibilidad del servicio, el tiempo de reparación de fallas y la tasa de reclamos técnicos y administrativos (ARCOTEL, 2020).

El Reglamento General a la Ley Orgánica de Telecomunicaciones complementa estos lineamientos, enfatizando el derecho de los usuarios a recibir un servicio eficiente, continuo y de calidad técnica. Además, garantiza el derecho a información clara sobre los términos contractuales, tarifas y mecanismos de reclamo. Este marco legal obliga a los ISP a mantener

registros periódicos sobre la calidad del servicio y a someterse a auditorías regulatorias cuando sea requerido.

Un avance significativo en la protección del usuario es la “Carta de Derechos de los Usuarios de Servicios de Telecomunicaciones” emitida por ARCOTEL. Este documento establece principios fundamentales de acceso, equidad, transparencia y protección. Específicamente, declara: “Todo usuario tiene derecho a recibir servicios de telecomunicaciones de calidad, con condiciones contractuales claras y trato equitativo por parte de los prestadores” (ARCOTEL, 2023a).

3. Capítulo III: Marco Metodológico

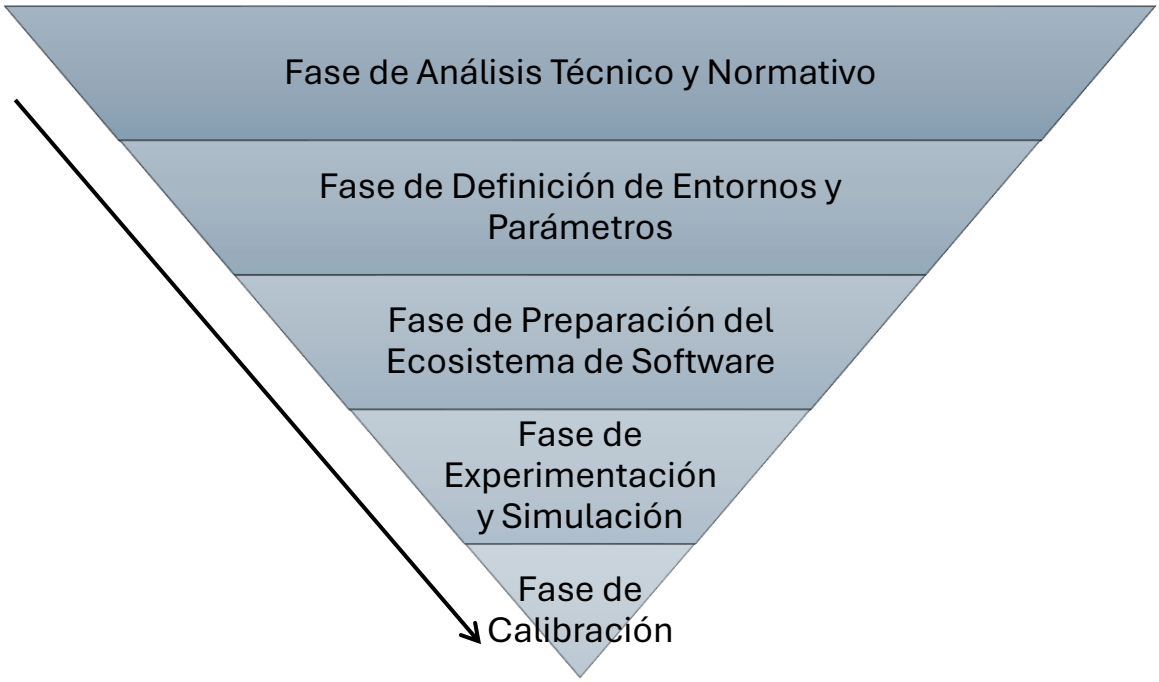
En el presente capítulo se aborda en detalle el planteamiento de implementación de la tecnología, comenzando con el establecimiento de los parámetros requeridos basadas en pruebas de funcionalidad y rendimiento de la tecnología WiFi 6, WiFi 6E y WiFi 7, realizadas en entornos controlados y la propuesta de la topología de red necesaria para la tecnología FTTR. A continuación, se presentan las condiciones necesarias, definidos a partir de la tecnología FTTH, con el objetivo de cumplir con los criterios establecidos para el diseño, implementación y verificación del dispositivo.

3.1 Metodología

El desarrollo del análisis técnico para la implementación de la arquitectura FTTR requiere un proceso estructurado que permita descomponer el sistema desde una visión global hasta sus componentes y pruebas más específicas. Para lograrlo, se adopta la metodología Top-Down (de arriba hacia abajo), la cual facilita la comprensión del despliegue de redes ópticas en inmuebles y su integración directa con tecnologías inalámbricas de alta capacidad como WiFi 6. Este enfoque permite iniciar con una revisión normativa y técnica, establecer el entorno y las herramientas, para finalmente descender hacia la experimentación de campo y la simulación predictiva. En la Figura 8 se ilustran las cinco fases de la metodología Top-Down aplicadas al desarrollo del presente capítulo.

Figura 8

Fases de la metodología Top-Down.



Nota: Autoría propia.

El flujo de trabajo metodológico se desglosa secuencialmente de la siguiente manera:

- Fase de Análisis Técnico y Normativo: Constituye el punto de partida de la investigación, donde se examinan las directrices operativas de la tecnología FTTR. En esta etapa se abordan las recomendaciones técnicas de instalación, los métodos de despliegue, el manejo del medio de transmisión óptico y las validaciones del presupuesto de potencia necesarias para un entorno residencial óptimo.
- Fase de Definición de Entornos y Parámetros: En este nivel se delimita y desglosa el entorno físico del estudio. Se identifican y seleccionan los elementos de hardware específicos (equipamiento técnico para pruebas de campo) y se definen metodológicamente los parámetros de censado y las variables radioeléctricas que serán objeto de medición.

- Fase de Preparación del Ecosistema de Software: Comprende la habilitación integral del entorno digital de trabajo. Se detalla el procedimiento de adquisición, gestión de permisos de privacidad y familiarización con las herramientas especializadas, dividiendo funcionalmente el diagnóstico de red (WiFi Analyzer), la recolección masiva de métricas (NetSpot) y la configuración del motor en la nube para el modelado de mapas de calor (Ruijie Reyee Cloud).
- Fase de Experimentación y Simulación: Representa el núcleo práctico de la investigación. Por un lado, se ejecutan las pruebas experimentales controladas midiendo el decaimiento de la señal bajo condiciones de Línea de Vista (LOS), atenuación por obstáculos físicos inmuebles e interferencia electromagnética. Paralelamente, se desarrollan las simulaciones digitales equivalentes empleando el estándar 802.11ax, proyectando además el comportamiento de la topología en redes de futuras generaciones (WiFi 6E y WiFi 7).
- Fase de Calibración: Como etapa de cierre del marco metodológico, se establece una comparativa directa entre los datos empíricos tabulados durante las pruebas físicas y los resultados gráficos generados por el software de simulación. Este análisis cruzado permite la retroalimentación del modelo, validando la precisión de los parámetros ingresados y cimentando las bases técnicas para demostrar la eficacia de la red FTTR.

3.2 Recomendaciones técnicas de instalación

El despliegue de una red FTTR marca un cambio de paradigma en la infraestructura de planta interna, al sustituir o complementar el cableado de cobre (UTP/STP) y los enlaces inalámbricos por un bus o estrella de fibra óptica que penetra hasta las estancias finales del usuario. Para que un ISP logre una implementación exitosa, no basta con la conectividad lógica; la integridad física de la capa 1 es determinante para alcanzar las capacidades de gigabit y las

latencias inferiores a un milisegundo que prometen WiFi 6 y futuras generaciones (International Telecommunication Union, 2016).

Estas recomendaciones se estructuran bajo una visión de "Ingeniería de Planta Interna", considerando que, a diferencia de la red externa, el entorno doméstico y empresarial presenta desafíos críticos como radios de curvatura reducidos, necesidad de mimetización estética y convivencia con infraestructuras eléctricas preexistentes (ETSI, 2020). El cumplimiento de estas directrices asegura la escalabilidad del modelo técnico propuesto, permitiendo que la red sea agnóstica a la evolución de los estándares inalámbricos en el corto y mediano plazo.

3.2.1. *Medio de transmisión óptico*

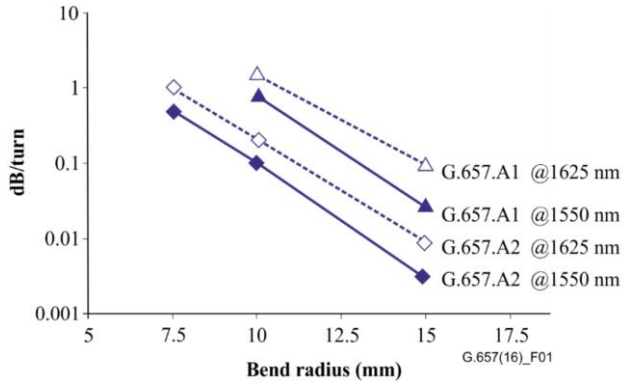
La elección de la fibra óptica adecuada para el entorno interior es el primer paso crítico para mitigar las pérdidas por macro curvaturas, que son la principal causa de degradación de potencia en instalaciones residenciales. Mientras que en la red de acceso exterior (FTTH) es común el uso de fibras bajo la norma ITU-T G.652.D, en el despliegue FTTR es imperativo el uso de fibras insensibles a la curvatura bajo el estándar ITU-T G.657 (International Telecommunication Union, 2016).

A. Características Técnicas y Categorías

La norma G.657 se divide en dos categorías principales, siendo la subcategoría A1, A2, representada en la Figura 9.

Figura 9

Gráfica de atenuación por curvatura de fibra G.657.A.

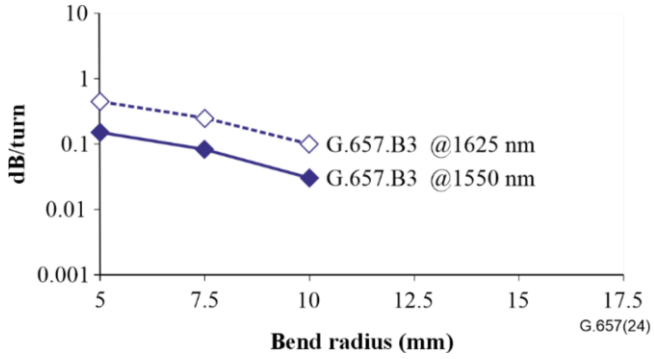


Nota: En la gráfica se muestra la perdida en dB por vuelta, respecto al radio de curvatura inducido en la fibra a una amplitud de onda de 1625 nm y 1550 nm. Obtenido de: (International Telecommunication Union, 2016).

La subcategoría B3, representada en la Figura 10 que es recomendada para escenarios FTTR debido a su capacidad de soportar radios de giro extremadamente pequeños sin comprometer la ventana de transmisión.

Figura 10

Gráfica de atenuación por curvatura de fibra G.657.B3.



Nota: En la gráfica se muestra la perdida en dB por vuelta, respecto al radio de curvatura inducido en la fibra a una amplitud de onda de 1625 nm y 1550 nm. Obtenido de: (International Telecommunication Union, 2016).

- Radio de Curvatura: Las fibras G.657.A2 permiten un radio de curvatura mínimo de 7.5 mm, mientras que la categoría B3 permite descender hasta los 5 mm. Esto es vital en escenarios residenciales, donde las canalizaciones suelen tener ángulos de 90° o donde la fibra debe bordear marcos de puertas y molduras de pared (ARCOTEL, 2016).
- Compatibilidad: La categoría A (A1 y A2) es totalmente compatible con la fibra monomodo convencional (G.652.D), lo que facilita la fusión directa entre la acometida externa y la red interna sin introducir pérdidas.

B. Beneficios en la Mitigación de Pérdidas

Una fibra G.657.B3 mantiene una pérdida insignificante (menor a 0.1 dB), garantizando que el presupuesto de potencia calculado se mantenga dentro de los umbrales operativos de las ONUs esclavas.

En la Tabla 2 se muestra una comparativa entre los diferentes tipos de fibra recomendadas en FTTH y FTTR, siendo los más idóneos el estándar G.652.D y G.657.B3 respectivamente.

Tabla 2

Tabla comparativa de estándares de fibra óptica en FTTH y FTTR.

Estándar	Radio de curvatura mínimo	Pérdida en radio mínimo	Atenuación
G.652.D (Exterior)	30 mm	0.1 dB	0.22 dB/km
G.657.A2 (Interior)	7.5 mm	0.5 dB	0.22 dB/km
G.657.B3 (FTTR)	5.0 mm	0.15 dB	0.22 dB/km

Nota: En la tabla se muestra los parámetros representativos sobre las tolerancias a curvaturas de los diferentes estándares de fibra óptica utilizados en FTTH y FTTR. Adaptado de: (International Telecommunication Union, 2016)

3.2.2. Métodos de despliegue

El despliegue de FTTR en inmuebles ya construidos, especialmente en zonas urbanas y edificios de valor patrimonial en el Ecuador, requiere métodos de instalación que minimicen el impacto estético y eviten modificaciones complejas. Para asegurar la aceptación del cliente y la eficiencia operativa del ISP, se proponen dos metodologías principales basadas en el uso de materiales de última generación.

A. Tecnología de Fibra Óptica Invisible

Para escenarios donde no existen tuberías internas disponibles o estas se encuentran colapsadas, la fibra invisible (típicamente de 0.9 mm a 1.2 mm de diámetro) representa la solución óptima, dicha fibra invisible se puede ver en la Figura 11.

Figura 11

Hilo de fibra óptica invisible con conector SC UPC.



Nota: Se muestra el hilo de fibra óptica invisible, con revestimiento adherente mediante calor, acoplado a un conector tipo SC UPC. Obtenido de: (FTTH Fiber Optic, 2026).

- Composición y Adhesión: Este micro cable utiliza una chaqueta transparente de material polimérico que se adhiere a las superficies mediante una pistola de calor o

adhesivos de Ciano acrilato de secado rápido. Su diseño permite que sea prácticamente imperceptible a la vista una vez instalada a lo largo de rodapiés, marcos de puertas o cornisas (FTTH Fiber Optic, 2026), de la forma que se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Bobina de fibra óptica invisible adherida térmicamente al rodapié.



Nota: Se muestra el micro cable de fibra adherido con una herramienta térmica al rodapié del inmueble, de igual forma se pueden usar adhesivos o pegamentos externos. Obtenido de: (FTTH Fiber Optic, 2026).

B. Implementación mediante Micro ductos

En construcciones modernas que cumplen con normas de infraestructura de telecomunicaciones o en áreas de alta concurrencia dentro de empresas, se recomienda el uso de micro ductos.

- Protección Mecánica: Los micro ductos de PVC o polietileno de baja fricción ofrecen una capa adicional de protección contra el aplastamiento y la tracción, factores de riesgo comunes en el mantenimiento del hogar, iguales a los de la Figura 13.
- Estrategia de Soplado o Tracción: El diseño de estos conductos facilita el "soplado" de fibra o la tracción mediante guías de nylon, permitiendo que el ISP pueda actualizar la

fibra interna en el futuro sin necesidad de reabrir las rutas de instalación (International Telecommunication Union, 2021).

- Compartición de Infraestructura: En cumplimiento con la resolución de (ARCOTEL, 2016), estos ductos permiten la coexistencia ordenada con otras redes, siendo posible también compartir la misma tubería de electricidad, ya que a la fibra óptica no se le puede inducir interferencia electromagnética, asegurando que la fibra no sufra daños por la manipulación de terceros (servicios de TV por cable, telefonía convencional o cableado eléctrico).

Figura 13

Cableado eléctrico interno del inmueble con tubería PVC.



Nota: La fibra óptica puede compartir tuberías con redes eléctricas, ya que esta no se ve afectada por campos electromagnéticos. Obtenido de: (Ctube, 2026).

3.2.3. *Técnicas de terminación y conexión*

La calidad de la terminación óptica es el factor que define la estabilidad de las modulaciones de alta velocidad en WiFi 6. Una mala conexión no solo introduce atenuación, sino que genera reflexiones que degradan la Relación Señal-Ruido Óptica (OSNR), afectando directamente el throughput percibido por el usuario final (Keiser, 2021).

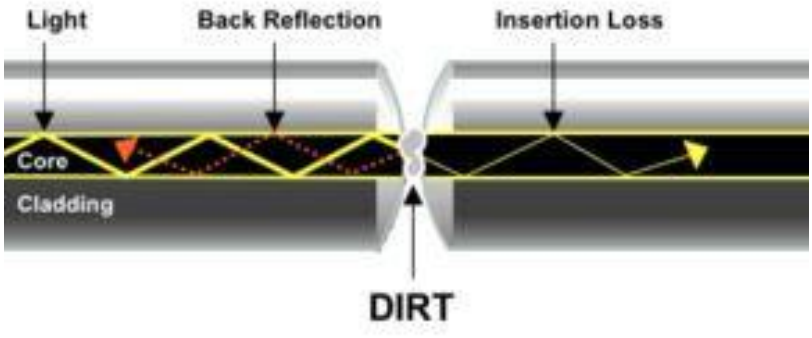
A. Fusión por Arco Voltaico vs. Empalme Mecánico

Para una red FTTR de clase empresarial, la fusión por arco voltaico es la técnica mandatoria, en una red FTTR de clase doméstica, el empalme mecánico puede ser aceptable pero no recomendable, explicado en la Figura 14.

- Pérdida por Inserción (L_{ins}): Una fusión correctamente ejecutada garantiza una pérdida menor a 0.02 dB, mientras que los conectores mecánicos presentan pérdidas de entre 0.2 dB y 0.5 dB, las cuales pueden incrementarse con el tiempo debido a la deshidratación del gel de igualación de índice (Telecommunications Industry Association, 2016).
- Pérdida de Retorno (ORL): La fusión elimina los espacios de aire entre núcleos, logrando un ORL superior a los 60 dB (0.0001%), lo cual es crítico para evitar interferencias en el láser de la ONT Máster.

Figura 14

Representación de la pérdida por retorno debido a suciedad en la unión de la fibra.



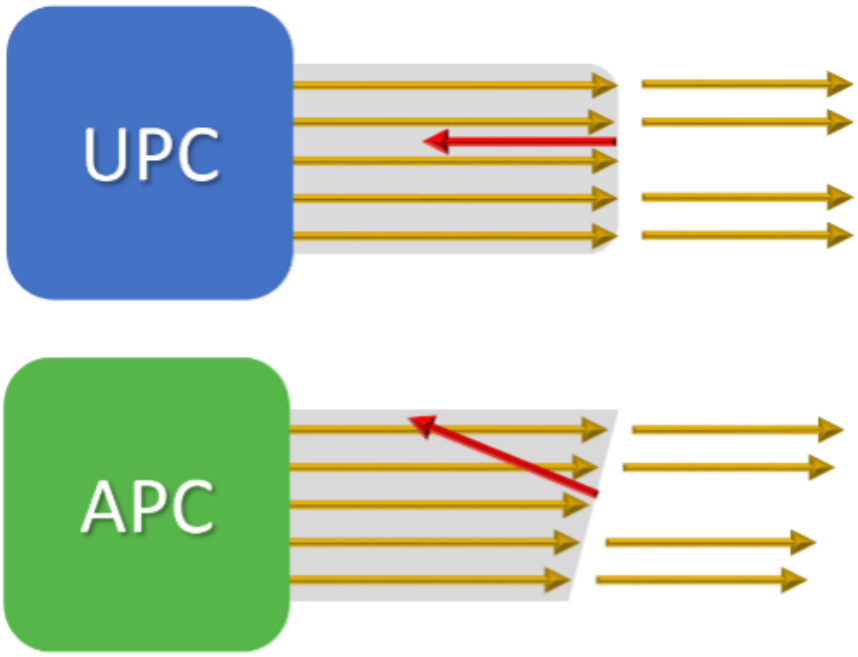
Nota: La figura representa como la suciedad o espacio entre las puntas de los conectores generan ORL, lo cual no sucede con la fusión por arco. Obtenido de: (FTTX Equipment, 2026)

B. Estandarización de Conectores SC/APC

Toda la red interna FTTR debe estandarizarse bajo conectores SC/APC (Subscriber Connector / Angled Physical Contact), identificables por su color verde, en la Figura 15 se representa la diferencia principal.

Figura 15

Comparación del conector UPC y APC respecto a la pérdida por retorno.



Nota: La utilización de un conector APC puede desviar la señal reflectante que se genera en la unión, representado con una línea roja, a diferencia de un conector UPC, que se desvía al revestimiento. Obtenido de: (Fluke Networks, 2026)

- Ángulo de Pulido: El pulido en ángulo de 8 grados asegura que cualquier reflexión de la señal se desvíe hacia la chaqueta de la fibra y no regrese hacia la fuente, un requisito indispensable para las tecnologías GPON y XGS-PON utilizadas en FTTR (Huawei Technologies Co., 2021).
- Limpieza y Mantenimiento: Se recomienda el uso de herramientas de limpieza de un solo clic (*One-Click Cleaners*) antes de cada inserción en las rosetas ópticas de

habitación, ya que una partícula de polvo de 1 micra puede bloquear total o parcialmente la señal de 1490 nm / 1577 nm, representados en la Figura 16.

Figura 16

Herramientas de limpieza de conectores y terminales de fibra óptica.



Nota: Es recomendable utilizar los limpiadores One-Click de una marca confiable, como podría ser la marca AFL que se ven en la figura. Obtenido de: (AFL Hyperscale, 2026)

C. Uso de Rosetas Ópticas de Pared

La terminación en cada cuarto no debe quedar como un cable suelto. Se debe emplear una roseta de pared que actúe como punto de demarcación, como la de la Figura 17.

- Gestión de Excedentes: La roseta debe permitir el almacenamiento de al menos 0.5 metros de reserva de fibra para futuras reparaciones, respetando siempre el radio de curvatura definido por la norma de la fibra utilizada (Huawei Technologies, 2024).

Figura 17

Roseta de pared para la conexión del cuarto.



Nota: Cada habitación o cuarto donde sea colocada una ONT, debe tener su respectiva roseta con reserva de fibra. Obtenido de: (FTTH Fiber Optic, 2026)

3.2.4. *Recomendación de equipos terminales de la red óptica*

Se recomienda la implementación del ecosistema Huawei OptiXstar serie F30. Esta solución ha sido diseñada específicamente para redes de alta densidad, permitiendo maximizar la experiencia gigabit de extremo a extremo en el interior del inmueble.

El ecosistema FTTR opera bajo una jerarquía estructurada que divide la carga operativa entre un equipo centralizador y múltiples nodos de borde:

- Master ONT (OptiXstar V163) (Figura 18): Actúa como el Gateway residencial principal. Es el dispositivo responsable de establecer la conexión óptica (GPON o XGS-PON) directamente con la OLT del ISP. Adicionalmente, centraliza la gestión lógica de la red LAN operando bajo una arquitectura C-WAN (Centralized Wi-Fi Access Network), la cual coordina los canales, el ancho de banda y la asignación de direcciones IP para todos los clientes de la casa (Huawei Technologies Co. Ltd., s/f-b).

Figura 18

Master ONT Huawei OptiXstar V163.



Nota: En la figura se representa al equipo master ONT de Huawei recomendado, el OptiXstar V163 de la serie F30. Obtenido de: (Huawei Technologies Co. Ltd., s/f-b)

- Slave ONT o Edge ONT (OptiXstar K153) (Figura 19): Funciona como la unidad terminal distribuida estratégicamente en cada cuarto o habitación. Al interconectarse con la Master ONT a través de la fibra óptica invisible recomendada (G.657.B3), recibe la señal sin sufrir la atenuación propia de las macrocurvaturas o repetidores inalámbricos tradicionales, radiando una cobertura Wi-Fi 6 óptima en su área circundante (Huawei Technologies Co. Ltd., s/f-a).

Figura 19

Salve ONT Huawei OptiXstar K153.



Nota: En la figura se representa al equipo master ONT de Huawei recomendado, el OptiXstar K153 de la serie F30. Obtenido de: (Huawei Technologies Co. Ltd., s/f-a)

Para una mayor claridad técnica dentro de la recomendación, la resume las características de hardware y capacidades de la serie propuesta en la Tabla 3:

Tabla 3

Características técnicas y parámetros ópticos de los equipos Huawei OptiXstar F30.

Característica	**Master ONT (OptiXstar V163)**	**Slave ONT (OptiXstar K153)**
Rol en la red FTTR	Gateway principal y controlador central.	Punto de acceso de borde.
Tipo de Conector Óptico	SC/APC.	SC/APC.
Potencia Óptica de Emisión (Tx)	+0.5 dBm a +5 dBm.	+0.5 dBm a +5.0 dBm.

Sensibilidad de Recepción (Rx)	-27 dBm a -29 dBm.	-27 dBm.
Potencia Óptica de Sobrecarga (Overload)	-8 dBm.	-8 dBm.
Tasa de Transmisión Óptica	Downstream: 2.488 Gbit/s, Upstream: 1.244 Gbit/s.	Downstream: 2.488 Gbit/s, Upstream: 1.244 Gbit/s.
Tecnología Inalámbrica	Wi-Fi 6 (802.11ax), Doble Banda (2.4 y 5 GHz).	Wi-Fi 6 (802.11ax), 2x2 MIMO, 1024 QAM, 160 MHz.
Interfaces de Usuario (LAN)	4x Gigabit Ethernet (GE), 1x POTS, 1x USB 2.0.	2x Gigabit Ethernet (10/100/1000 Mbps Auto-sensing).
Itinerancia (Roaming)	Soporte SRCN y 802.11k/v/r (Latencia < 20 ms).	Sincronización continua guiada por Master ONT.
Instalación Sugerida	Escritorio o montaje vertical en pared.	Escritorio, montaje en pared, caja 86 o empotrado.

Nota: La tabla detalla los parámetros operativos del ecosistema OptiXstar F30 orientados a despliegues FTTR. Obtenido de: (Huawei, s/f)

3.2.5. *Posicionamiento estratégico de las ONT*

El éxito de una red FTTR no reside únicamente en la baja atenuación del enlace óptico, sino en la capacidad de las unidades terminales (ONT esclavas) para radiar la señal WiFi 6 de manera eficiente en el espectro de 5 GHz y 6 GHz. El posicionamiento de estos equipos es crítico, ya que, a frecuencias más altas, la longitud de onda es más corta, lo que incrementa la vulnerabilidad ante obstáculos físicos y fenómenos de reflexión (Gast, 2023).

A. Criterios de Altura y Distribución Espacial

Para maximizar la cobertura y minimizar la zona de sombra, se recomienda que las ONT esclavas se instalen a una altura de 1.2 a 1.5 metros respecto al nivel del suelo.

- Efecto de la Superficie: Instalar equipos a nivel del suelo incrementa la absorción de la señal por parte del mobiliario y el piso, reduciendo el radio de cobertura efectiva.
- Distancia a Techos y Esquinas: Se debe evitar el pegado excesivo a esquinas de concreto, ya que esto genera lóbulos de radiación deformados debido al efecto de multitrayectoria. Se recomienda una separación mínima de 30 cm de cualquier ángulo de pared (Molina & Sánchez, 2024).

B. Mitigación de la Atenuación por Materiales de Construcción

En el contexto de las construcciones en Ecuador, el uso de hormigón armado y ladrillo macizo es predominante. Estos materiales presentan una atenuación de entre 10 dB y 20 dB para señales de 5 GHz.

- Línea de Vista (LOS): Aunque la fibra permite llegar a cada cuarto, la ONT debe colocarse de forma que la señal inalámbrica solo deba atravesar, como máximo, una pared delgada o puertas de madera para cubrir áreas adyacentes (como baños o pasillos).
- Interferencias Electromagnéticas: Las unidades ópticas deben mantener una distancia mínima de 1.5 metros de hornos microondas, cuadros eléctricos y motores de refrigeración, los cuales operan o generan armónicos en la banda de 2.4 GHz, afectando la estabilidad del canal de control de WiFi (International Electrotechnical Commission, 2014).

C. Coordinación para el Roaming Transparente (802.11k/v/r)

El sistema FTTR funciona como una red mallada (*mesh*) jerárquica. Para que un usuario experimente un cambio de habitación sin micro cortes en servicios de streaming o VoIP, como se explica en la Figura 20:

Figura 20

Funcionamiento de la tecnología 802.11k/v/r.



Nota: Se muestra de una forma muy resumida y sencilla el funcionamiento de la tecnología 802.11k/v/r entre equipos de una misma red. Obtenido de: (Josh, 2023)

- Solapamiento de Celdas: El diseño debe asegurar un solapamiento de señal de entre el 15% y 20% entre una ONU y otra.
- Nivel de Señal Objetivo: El RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) en el punto más alejado de la habitación no debe ser inferior a -65 dBm para garantizar las tasas de modulación QAM-1024 propias de WiFi 6 (International Telecommunication Union, 2020).

3.2.6. *Seguridad física personal*

A diferencia de las redes FTTH donde el punto de terminación suele estar en un área social, el FTTR introduce terminaciones ópticas en dormitorios y áreas privadas de alta concurrencia (X. Wang & others, 2023). Esto eleva el riesgo de exposición accidental a la radiación láser, la cual es invisible al ojo humano pero capaz de causar daños térmicos irreversibles en la retina.

A. Clasificación del Equipamiento

Los equipos activos de FTTR (ONT Master y ONUs Slaves) operan generalmente bajo la Clase 1 o 1M según la norma IEC 60825-1 (U.S. Food & Administration, 2019).

- Definición: Son dispositivos seguros bajo condiciones razonables de funcionamiento. Sin embargo, el uso de instrumentos ópticos de aumento (como microscopios de inspección de fibra) sin los filtros adecuados puede incrementar el riesgo de lesión (ANSI, 2022).

B. Implementación de Mecanismos de Protección Física

Para proteger al usuario final (especialmente niños), la guía técnica para ISPs debe exigir:

- Rosetas con Obturador (Auto-shutter): Las tomas de pared deben contar con una compuerta interna accionada por muelle que se cierre automáticamente al desconectar el patchcord de fibra, o utilizar un adaptador compatible con el conector de la roseta como los de la Figura 21.

Figura 21

Adaptadores de terminaciones ópticas con obturador Auto-shutter.



Nota: También hay que tomar en cuenta que la terminación óptica sea compatible con este adaptador, varía según la roseta utilizada. Obtenido de: (Holight Optic, 2026)

- Conectores Protegidos: El uso de conectores con tapa integrada asegura que, en caso de desconexión accidental, el haz de luz no se proyecte directamente hacia el espacio libre.

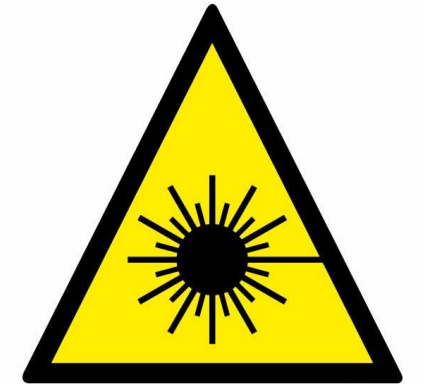
C. Etiquetado y Protocolos de Seguridad para el Usuario

Es responsabilidad del ISP cumplir con la señalética de advertencia en los puntos de terminación óptica:

1. Advertencia Visual: Colocación de etiquetas amarillas con el símbolo internacional de radiación láser en la roseta principal, como el de la Figura 22.

Figura 22

Símbolo internacional de radiación laser.



Nota: Esta simbología debe estar presente en todos los puntos de terminación óptica. Obtenido de: (Segurilight, 2026)

2. Manual de Usuario: Incluir una advertencia explícita indicando que el usuario nunca debe mirar directamente al interior de los conectores ópticos.
3. Protocolo de Instalación: El técnico debe realizar mediciones de potencia solo después de verificar la limpieza de las caras finales, evitando la dispersión de luz por contaminación (Gast, 2023).

3.2.7. *Etiquetado y Ordenamiento*

La trazabilidad de una red FTTR es el factor que determina la eficiencia de los departamentos de soporte técnico de un ISP. Dada la naturaleza de la fibra óptica (frágil y difícil

de identificar a simple vista sin instrumentación), el etiquetado no es un proceso estético, sino una obligación normativa que facilita el mantenimiento preventivo y correctivo, en concordancia con la Norma Técnica de Despliegue de Redes Físicas de la ARCOTEL (ARCOTEL, 2016).

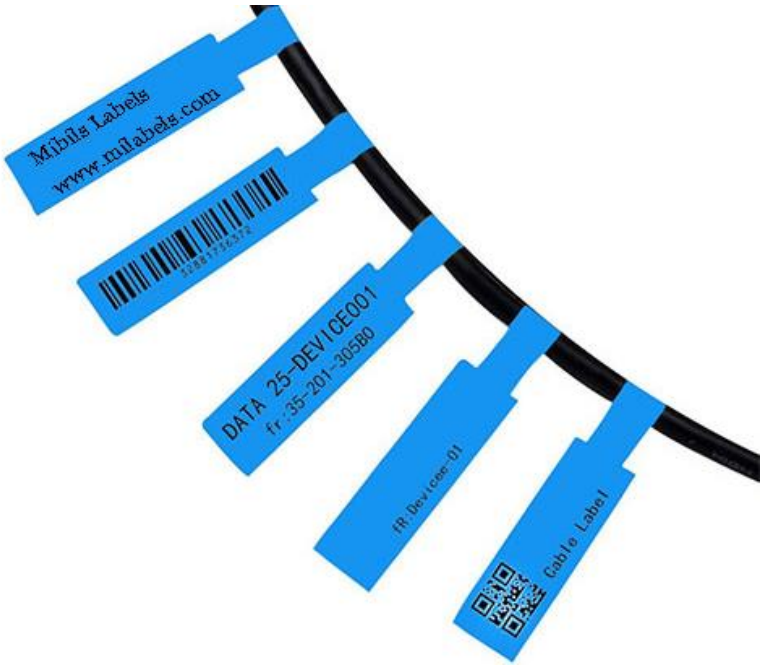
A. Esquema de Identificación Jerárquica

Se recomienda implementar un sistema de codificación alfanumérico en cada extremo del enlace interno. Un estándar sugerido para ISPs locales es el formato [ID_ABONADO]-[NODO_TIPO]-[NODO_NUM]:

- Ejemplo: 12345-M-1 para la ONT Master y 12345-S-1, 12345-S-2 para esclavas.
- Ubicación de Etiquetas: Deben colocarse etiquetas tipo bandera, como en la Figura 23, o envolventes a no más de 10 cm de cada conector óptico y en los puntos de ramificación (splitters internos) (International Telecommunication Union, 2020).

Figura 23

Etiquetas sugeridas para el reconocimiento de la fibra óptica.



Nota: Se debe colocar a menos de 10 cm del conector. Obtenido de: (Mis Etiquetas, 2026)

B. Gestión de la Documentación

Al finalizar la instalación, el técnico debe generar un diagrama de red final que incluya:

1. Ruta Física: Plano esquemático de por dónde se canalizó la fibra (techo, pared o ducto).
2. Inventario de Activos: Números de serie y modelos de la ONT Master y las ONUs Slaves.
3. Registro de Potencia: Niveles de recepción medidos en cada habitación, lo cual servirá como línea base para futuras reclamaciones por lentitud en el servicio (Molina & Sánchez, 2024).

3.2.8. *Validación del Presupuesto Óptico*

La etapa final de la instalación consiste en la validación física de que la red construida cumple con los parámetros de diseño teóricos. En el entorno FTTR, donde se manejan múltiples puntos de acceso, es imperativo realizar pruebas de aceptación técnica para asegurar que la tasa de errores de bit (BER) se mantenga en niveles óptimos para el tráfico de WiFi 6 (Gast, 2023).

A. Protocolo de Medición con OPM (Optical Power Meter)

A diferencia del FTTH, en FTTR se deben realizar mediciones en cascada.

- Medición en Nodo Master: Verificar que la potencia de salida desde el puerto óptico de la ONT Master esté dentro del rango especificado (típicamente entre +0.5 dBm y +5 dBm).
- Medición en Nodo Slave: La potencia recibida en cada habitación debe situarse idealmente entre -8 dBm y -24 dBm. Valores inferiores a -27 dBm (umbral de sensibilidad típico) causarán desconexiones intermitentes o degradación drástica de la velocidad inalámbrica (International Electrotechnical Commission, 2014).

B. Pruebas de Continuidad y Localización de Fallas

- Uso de VFL (Visual Fault Locator): Antes de conectar los equipos activos, se debe inyectar luz visible roja para detectar macro curvaturas críticas o roturas en la fibra

invisible que no sean detectables a simple vista pero que afecten el presupuesto de potencia, parecido al de la Figura 24.

Figura 24

Dispositivo Visual Fault Locator VFL 10mW para Fibra Óptica.



Nota: El dispositivo debe tener un mínimo de 1mW de potencia. Obtenido de: (Dipol, 2026)

- Inspección de Caras Finales: Utilizar microscopios de inspección para garantizar que no existan contaminantes (polvo, aceites) en los conectores, ya que una pérdida de 1 dB por suciedad puede anular el margen de seguridad de toda la red interna (Keiser, 2021).

Si la diferencia entre la medición real y la teórica es mayor a 1.5 dB, la instalación se considera "No Conforme" y debe ser revisada por posibles fallos de curvatura o conectores mal ensamblados (X. Wang & others, 2023).

3.2.9. *Planta Externa a Planta Interna: Medio Físico y Despliegue Doméstico*

Como resumen explicativo, se va a repasar el trayecto físico completo del medio óptico, estableciendo una clara frontera de demarcación entre la red de distribución del ISP (Planta Externa) y el despliegue doméstico (Planta Interna). Este recorrido se ejecuta en cuatro fases secuenciales:

1. **Distribución en Planta Externa y Acometida**

El servicio se origina en la OLT ubicada en el nodo central del ISP. Desde allí, la señal óptica viaja a través del Backbone por la infraestructura de postería urbana hasta llegar a las Cajas de Terminación Óptica o CTO, o splitters de distribución de segundo nivel en la calle. Desde el puerto de esta CTO externa, se despliega el cable de acometida Drop, típicamente de formato plano o figura 8 con mensajero de acero, bajo el estándar de fibra G.652.D. Este cable viaja por vía aérea desde el poste hasta la fachada exterior del domicilio del cliente.

Hasta este punto, no existe diferencia con una red de tendido FTTH convencional, por lo que para una adopción de la tecnología FTTR, la actualización de la red seria solo en planta interna.

2. Punto de Demarcación y Recepción en el Inmueble

La transición a la planta interna requiere un cuidado estético y técnico superior. El cable de acometida exterior no debe recorrer largas distancias dentro del inmueble debido a su rigidez y color negro, que rompe con la armonía arquitectónica. Por ello, justo en el punto de ingreso a la vivienda (o en la primera caja de paso disponible), se instala una roseta óptica principal. En esta roseta se realiza una fusión por arco voltaico o un empalme mecánico, uniendo el robusto cable de calle con el pigtail interior o directamente con la fibra óptica invisible G.657.B3, marcando oficialmente el inicio de la red FTTR (International Telecommunication Union, 2016).

3. Alimentación de la Master ONT

Desde la roseta principal de recepción, un patch cord corto o un hilo de fibra invisible se canaliza hasta el puerto óptico de subida (Uplink/PON) de la Master ONT. Este equipo actúa como el Gateway residencial; se autentica contra la OLT del ISP.

4. Despliegue FTTR Interno hacia las Slave ONTs

Para extender la conectividad hacia las habitaciones o zonas alejadas, la Master ONT utiliza su puerto óptico de bajada (Downlink). Desde este puerto, sale un hilo de fibra invisible

que se dirige hacia un micro splitter pasivo interno (por ejemplo, de 1:4 o 1:8), que puede estar alojado en una pequeña caja de distribución estética.

A partir de este divisor, los hilos de fibra invisible G.657.B3 (de apenas 0.9 mm a 1.2 mm de diámetro) se ramifican de forma individual hacia cada dormitorio objetivo (International Telecommunication Union, 2016). El recorrido se realiza adhiriendo térmicamente la fibra a los rodapiés, marcos de puertas o cornisas, permitiendo giros de hasta 5 mm en las esquinas sin sufrir atenuación por macrocurvaturas. Al ingresar a la habitación destino, el hilo invisible termina en una roseta óptica de cuarto. Finalmente, un patch cord SC/APC conecta esta roseta con la Slave ONT, la cual sincroniza sus parámetros con el equipo Master y comienza a radiar una señal Wi-Fi 6 pura, libre de interferencias y atenuaciones estructurales, cerrando así el circuito de extremo a extremo.

3.2.10. *Resumen de las recomendaciones técnicas de instalación*

A continuación, se muestran las tablas que contienen toda la información de las recomendaciones técnicas de instalación de forma resumida, para una interpretación más rápida y sencilla, empezando por la Tabla 4 que resume todas las recomendaciones técnicas de instalación.

Tabla 4

Componentes físicos de la red interna (Planta Interna).

Parámetro	Detalle Técnico / Especificación	Sugerencia Técnica
Equipos Terminales de la Red Óptica	Master ONT (OptiXstar V163) Slave ONT (OptiXstar K153)	Equipos de la marca Huawei de la serie FTTR F30, también recomendable la serie F50.
Estándar de Fibra	ITU-T G.657 (A2 o B3)	Instalaciones internas con radios de giro críticos.
Radio de Curvatura	A2: 7.5 mm / B3: 5.0 mm	Esquinas de mampostería, marcos de puertas y rodapiés.
Atenuación Típica	0.22 dB/km (1550 nm)	Garantiza el presupuesto de potencia en trayectos largos.

Fibra Invisible	Diámetro 0.9 mm a 1.2 mm	Inmuebles patrimonios o sin ductería (mimetización estética).
Micro ductos	Material PVC	Edificaciones modernas y compartición con red eléctrica.
Fusión por Arco	Elimina espacios de aire entre núcleos.	Pérdida: < 0.02 dB / ORL: > 60 dB.
Empalme Mecánico	Instalación rápida (solo uso doméstico).	Pérdida: 0.2 dB - 0.5 dB (sujeto a degradación).
Conector SC/APC	Pulido en ángulo de 8° (color verde).	Desvía reflexiones al revestimiento (chaqueta).
Limpieza	Herramientas One-Click	Evita bloqueo de señal por partículas de 1 micra.
Roseta de Pared	Punto de demarcación con reserva.	Gestión de excedentes de fibra (min. 0.5 metros).
Altura de la ONU	1.2 a 1.5 metros	Evita absorción de señal por piso y mobiliario.
Separación Muros	Mínimo 30 cm de esquinas	Reduce el efecto de multi trayectoria (reflexiones).
Interferencias	> 1.5 m de microondas y cuadros eléctricos	Estabilidad en canales de control (2.4 GHz).
Objetivo RSSI	> -65 dBm en toda la estancia	Asegura modulación 1024-QAM (WiFi 6).
Seguridad Láser	Clase 1 o 1M (IEC 60825-1)	Uso de rosetas con obturador (Auto-shutter), y señalética de advertencia (Radiación láser).
Etiquetado	Formato: ID-TIPO-NUM	Etiquetas a < 10 cm del conector.
Medición Master	OPM (Optical Power Meter)	Rango: +0.5 dBm a +5 dBm.
Medición Slave	OPM (Optical Power Meter)	Rango ideal: -8 dBm a -24 dBm.
Continuidad	VFL (Visual Fault Locator)	Verificación visual de fugas, mínimo 1mW.
Documentación	Plano de red e Inventario	Registro de potencia para soporte técnico.
Tolerancia	Diferencia Real vs. Teórica	Máximo 1.5 dB de discrepancia.

Nota: Se presenta de forma muy resumida todos los subtemas de las recomendaciones técnicas de instalación. Autoría propia.

3.3 Mecanismos de distribución física y lógica de la red FTTR en el inmueble

Para que esta implementación sea exitosa y ofrezca la calidad esperada, el diseño de la red debe estructurarse en dos frentes complementarios: el despliegue físico de la planta interna (que define cómo se canaliza y divide la señal óptica) y la arquitectura lógica del servicio (que determina cómo el ISP aprovisiona, enruta y segmenta el tráfico de datos para el usuario final). A continuación, se detallan los mecanismos estandarizados y las topologías aplicables para resolver ambas dimensiones dentro del domicilio.

3.3.1. Mecanismos de Distribución Física (Planta Interna)

Para lograr la viabilidad técnica y estética dentro del inmueble, se emplea fibra óptica preconectorizada o cables de fibra transparente invisible, diseñados bajo el estándar ITU-T G.657, los cuales poseen un núcleo optimizado que permite radios de curvatura críticos (hasta 5 mm o inferiores) sin inducir pérdidas significativas por atenuación de macrocurvaturas (International Telecommunication Union, 2012).

La distribución física de estos hilos ópticos desde el equipo central hacia los nodos periféricos se rige principalmente por dos arquitecturas topológicas, las cuales se adaptan a la infraestructura civil y a los requerimientos de diseño de la red local:

A. Topología en Estrella (Punto a Multipunto mediante Splitter Óptico)

En este modelo de distribución, la arquitectura lógica PON que el proveedor de servicios despliega en la red de acceso exterior, se replica a microescala dentro del domicilio del usuario final (Huawei Technologies Co. Ltd., 2021). La acometida de fibra óptica exterior ingresa al domicilio y se termina en un equipo central denominado Master ONT o en una roseta óptica principal. Desde este nodo de convergencia, se despliega un arreglo de splitters. Dependiendo del diseño de la red y del presupuesto óptico disponible (potencia de transmisión

frente a sensibilidad del receptor), se pueden emplear splitters con relaciones de partición simétrica (ej. 1x4, 1x8) o configuraciones asimétricas (desbalanceadas) (Lin et al., 2022).

Cada hilo de fibra óptica irradiado desde el splitter se dirige de forma individual, a través de los conductos internos del inmueble, hacia cada habitación específica donde se instalará un enrutador esclavo o Edge ONT. Esta configuración centralizada es altamente recomendada para edificaciones modernas que cuentan con cajas de revisión de telecomunicaciones o paneles de parcheo centralizados. Su principal ventaja radica en la resiliencia física de la red local: una rotura, curvatura extrema o desconexión en un hilo secundario afectará únicamente a esa habitación específica, manteniendo intacta la operatividad del resto de los nodos de la casa (Lin et al., 2022).

B. Topología en Cascada o Cadena

Como alternativa directa a la distribución centralizada, diversos ecosistemas de hardware FTTR soportan arquitecturas de interconexión óptica en serie. En este esquema, el enlace principal alimenta directamente a la Master ONT. A partir de este equipo, se origina un hilo de fibra óptica que viaja hasta conectar la primera Edge ONT. Este nodo esclavo posee una interfaz óptica de bajada (downlink) que permite conectar un nuevo segmento de fibra y extender el tendido hacia la siguiente Edge ONT, conformando así una cadena secuencial (Huawei Technologies Co. Ltd., 2021).

El mecanismo en cascada reduce drásticamente los metros lineales de cable de fibra requeridos para cubrir el inmueble y minimiza el uso de canalizaciones físicas. Resulta ser la solución técnica y operativa más viable para infraestructuras con distancias longitudinales considerables (como pasillos extensos de hoteles u oficinas) o en viviendas de múltiples niveles que carecen de ductería centralizada para telecomunicaciones. A través de este método, la red puede extenderse de forma vertical u horizontal, saltando de un nodo radiante al siguiente con un impacto estético nulo en la edificación (Huawei Technologies Co. Ltd., 2021).

3.3.2. Mecanismos de Distribución Lógica (Gestión del Servicio)

Una vez establecida la infraestructura óptica interna, la red FTTR debe ser aprovisionada de manera lógica. La flexibilidad de esta tecnología permite al ISP o al administrador de la red definir cómo se entregan y controlan los recursos de ancho de banda. Dependiendo del perfil del cliente final (una familia única, un entorno corporativo o un escenario de inquilinato multifamiliar), los mecanismos lógicos de distribución se clasifican en las siguientes arquitecturas:

A. Segmentación Multi-Usuario (Túneles PPPoE Independientes)

Este mecanismo es una solución avanzada de alto valor comercial para los ISP que brindan servicios en propiedades multifamiliares, residencias estudiantiles o inquilinatos físicos compartidos bajo un mismo techo. En lugar de entregar todo el ancho de banda a un solo cliente responsable, la red se micro segmenta lógicamente desde el enrutador de borde del proveedor.

En esta arquitectura, la Master ONT es configurada en modo puente o mediante el paso de VLAN Trunking, actuando como un conmutador transparente de capa 2. Esto permite que el tráfico pase sin ser enrutado localmente hasta las Edge ONTs ubicadas en las diferentes habitaciones. Cada Edge ONT se encarga de levantar su propia sesión PPPoE directamente contra el servidor de acceso del ISP, típicamente administrado por un enrutador MikroTik (Mammeri & others, 2023).

Esta distribución otorga al ISP una administración individualizada de cada nodo dentro de la casa. Desde el servidor MikroTik, es posible asignar perfiles de usuario distintos, establecer colas de control de ancho de banda, y aplicar diferentes tasas de compartición o cortes por falta de pago a cada inquilino de manera totalmente independiente (Mamakos et al., 1999).

B. Red Unificada Centralizada (Gestión Master/Slave con Roaming)

Es el mecanismo estándar y más implementado para viviendas unifamiliares convencionales. La gestión lógica de la red LAN recae íntegramente sobre el equipo principal. La Master ONT es el único dispositivo que establece la conexión WAN/PPPoE con el equipo del ISP y asume las tareas de NAT y asignación de direcciones IP para todos los clientes de la casa (Hossain & others, 2019).

Las Edge ONTs distribuidas por las habitaciones operan como puntos de acceso inalámbrico sincronizados y gestionados por el controlador de la Master ONT. Esta integración permite la creación de un identificador de red único (SSID) en toda la propiedad, soportado por los protocolos del estándar IEEE 802.11k/v/r. Estos protocolos garantizan un roaming transparente y ultrarrápido; es decir, los dispositivos móviles del usuario (smartphones, laptops) transicionan automáticamente de un nodo FTTR a otro según la intensidad de la señal, sin experimentar desconexiones, pérdida de paquetes o incrementos perceptibles de latencia al caminar por la casa (IEEE Standards Association, 2020).

C. Segmentación Híbrida (Redes Aisladas mediante VLAN)

En escenarios donde coexisten usuarios de confianza y usuarios transitorios dentro de la misma infraestructura FTTR, se implementa una distribución lógica basada en Redes VLANs, estándar IEEE 802.1Q.

A través de la Master ONT, el administrador puede irradiar múltiples SSID diferenciados sobre la misma red física de fibra interna. La red principal retiene el acceso total a la LAN, permitiendo la interacción con dispositivos de domótica, cámaras IP y servidores de almacenamiento. Simultáneamente, se despliega un segundo SSID configurado en una VLAN aislada en la capa de enlace de datos. Este mecanismo de seguridad confina el tráfico de los invitados, brindándoles acceso exclusivo a Internet, denegando cualquier visibilidad o comunicación con los dispositivos locales de la red privada, y mitigando posibles vulnerabilidades de seguridad interna (Hossain & others, 2019).

3.3.3. Arquitectura Alternativa de Red Óptica Distribuida (FTTR Residencial)

Los Proveedores de Servicios de Internet también pueden implementar una arquitectura alternativa basada en FTTR escalado a nivel residencial.

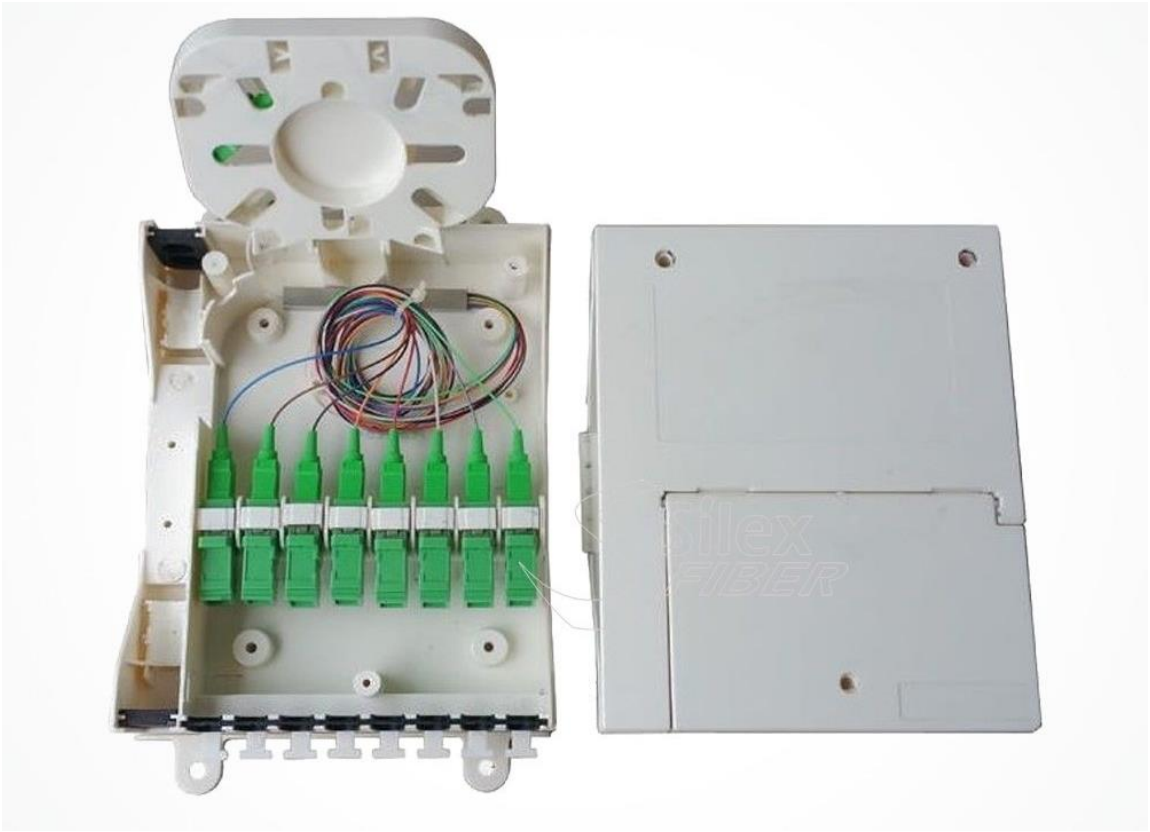
Este escenario prescinde de un nodo óptico centralizador en el domicilio y opta por irradiar la red óptica pasiva de la calle directamente hacia las habitaciones, utilizando equipos ONT estándar, o en su defecto, un Bridge acompañado de un router.

A. Topología Física y Despliegue Óptico

Físicamente, el proveedor ingresa al domicilio y establece un punto de convergencia pasivo, típicamente utilizando un splitter óptico alojado en una pequeña caja de terminación óptica interna, puede ser de 4 puertos o de 8 puertos, como en la Figura 25.

Figura 25

Roseta o caja de terminación óptica interna de 8 puertos.



Nota: En la figura se muestra una Caja Terminal SLT008 para la distribución de fibra óptica en interiores. Obtenido de: (Silex Fiber, 2026).

Desde este componente pasivo, se distribuyen hilos de fibra individuales hacia cada habitación objetivo. Al final de cada hilo, se instala una ONT convencional que actúa como el equipo de demarcación final, entregando el servicio Wi-Fi y puertos LAN en la estancia.

B. Gestión Lógica y Compartición de Ancho de Banda (OLT y BRAS)

El enrutamiento lógico debe trasladarse a la infraestructura Core del ISP. Cada ONT instalada en las habitaciones se registra de manera independiente en un puerto PON de la OLT.

Para unificar la experiencia del cliente y simular un único plan contratado, la administración del ancho de banda se centraliza en el Servidor de Acceso de Banda Ancha, operado por un enrutador MikroTik. Mediante el uso de algoritmos de encolamiento jerárquico (Hierarchical Token Bucket - HTB) y colas por conexión (PCQ), el ISP agrupa los túneles PPPoE de todas las ONTs de la casa bajo una única "Cola Padre".

Esta configuración garantiza que la suma del tráfico de todas las habitaciones nunca exceda el límite de velocidad contratado por el domicilio, distribuyendo dinámicamente los recursos de red (compartición) en función de la demanda instantánea de cada ONT.

Esta arquitectura alternativa permite aislar y evaluar el rendimiento del medio de transmisión físico en la última milla interna, superando las limitaciones físicas de atenuación que sufre una red FTTH tradicional ante obstáculos estructurales. A nivel de throughput (capacidad de transferencia útil) y latencia, este modelo ofrece resultados superiores a un ecosistema FTTH, siempre y cuando sea un proyecto donde no se necesite más de 4 routers, para tener redundancia en el splitter por seguridad.

3.3.4. *Resumen de los medios de distribución física y lógica FTTR.*

Con el objetivo de consolidar y sintetizar los conceptos abordados en los apartados precedentes, en la Tabla 5 se presenta una matriz comparativa que reúne las distintas alternativas de despliegue físico y gestión lógica dentro de una infraestructura FTTR. Se

resumen los mecanismos analizados, detallando su ámbito de acción, descripción técnica y escenario de aplicación ideal.

Tabla 5

Resumen de medios de distribución física y lógica para redes FTTR.

Mecanismo	Ámbito	Descripción	Aplicación
Topología en Estrella	Físico	Distribución centralizada mediante splitter hacia cada Edge ONT.	Viviendas con ductería central. Aísla fallos por habitación.
Topología en Cascada	Físico	Conexión en serie: la fibra enlaza un nodo con el siguiente.	Pasillos largos o casas sin ductería. Ahorra cableado y obra civil.
Segmentación Multi-Usuario	Lógico	Master ONT en Bridge. Cada nodo levanta sesiones PPPoE independientes.	Inquilinatos. Permite control de ancho de banda y cortes por cuarto.
Red Unificada Centralizada	Lógico	Master ONT gestiona ruteo con roaming 802.11k/v/r.	Viviendas unifamiliares. Brinda movilidad sin desconexiones.
Segmentación Híbrida	Lógico	VLANs para crear un SSID principal y otro de invitados.	Entornos con coexistencia de propietarios y usuarios transitorios.
Arquitectura Alternativa (FTTR Residencial)	Físico y Lógico	ONTs estándar conectadas a un splitter y agrupadas en MikroTik.	Despliegues de bajo costo y máximo 4 APs por domicilio.

Nota: En la tabla se presenta un resumen de todos los medios de distribución física y lógica posibles en una red FTTR. Autoría propia.

3.4 Determinación y análisis del entorno de pruebas y metodología de experimentación

Para garantizar que el modelo técnico de FTTR propuesto sea efectivo, se establece una metodología de experimentación dividida en dos fases: fase de calibración física y fase de escalabilidad simulada. El objetivo primordial es analizar las variables críticas que degradan la señal de WiFi 6 en la frecuencia de 5 GHz, tales como la atenuación por obstáculos y la interferencia cocanal, estableciendo así una línea base (baseline) de rendimiento.

Esta metodología busca minimizar el margen de error mediante el control de variables ambientales, permitiendo que los resultados obtenidos con un solo punto de acceso (AP) sirvan como parámetros de referencia para proyectar el desempeño de una red FTTR distribuida en entornos residenciales de mayor complejidad (Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, 2016).

Además de servir como una guía para que cualquier técnico pueda simular una red y estar seguro de tener una completa cobertura en el inmueble.

3.4.1. *Equipamiento técnico para pruebas de campo*

La validez de las mediciones depende de la paridad tecnológica entre el emisor y el receptor, asegurando la compatibilidad con el estándar IEEE 802.11ax.

- Punto de Acceso de Referencia (AP): Se utilizará el router Huawei AX2 de la Figura 26. Este equipo es representativo de la gama de entrada utilizada por ISPs para servicios WiFi 6, contando con soporte para bandas de 2.4 GHz y 5 GHz, y tecnología HarmonyOS Mesh+.

Figura 26

Dispositivo Router inalámbrico Wi-Fi 6.



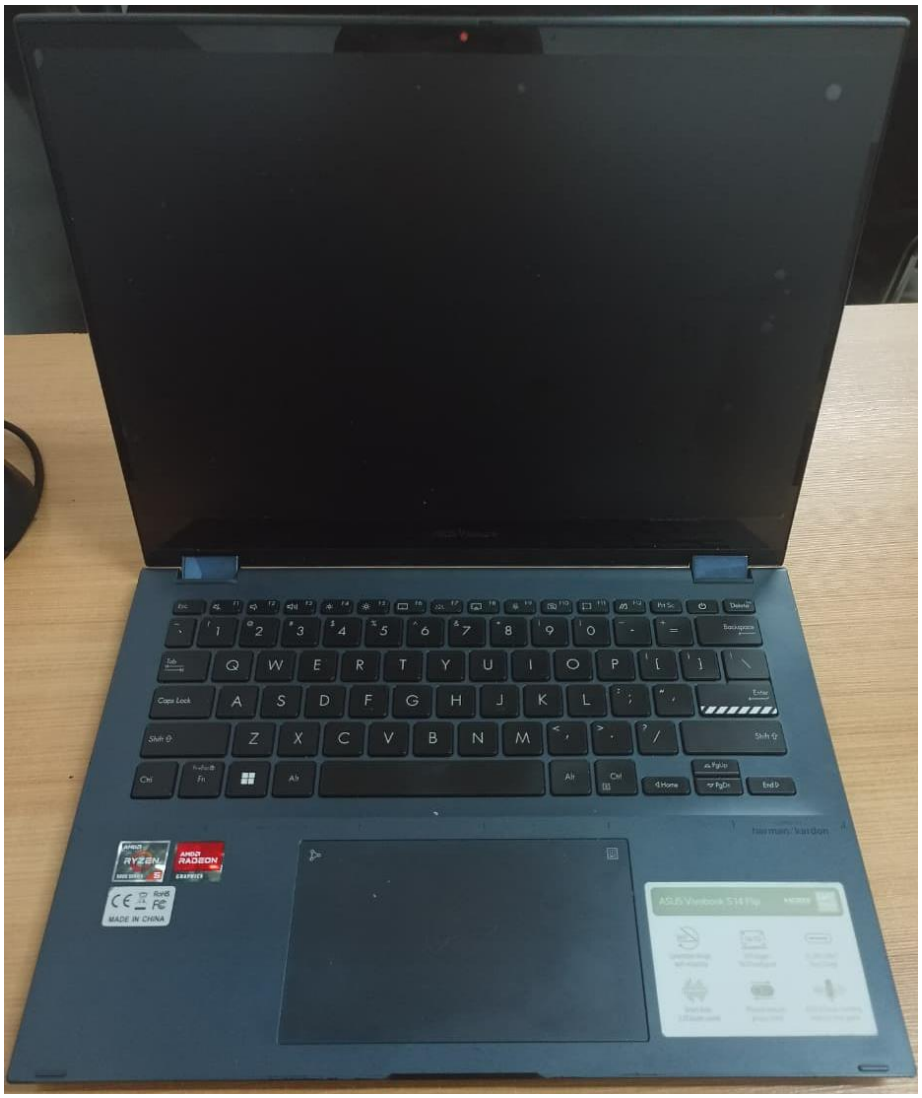
Nota: Se muestra el router Huawei AX2 compatible con la tecnología 802.11ax.

Autoría propia.

- Dispositivo Cliente (STA): Una laptop Asus Vivobook S14 Flip, equipada con una tarjeta de red con hardware nativo para WiFi 6, visible en la Figura 27 y Figura 28. Este dispositivo permite capturar tramas de datos de alta eficiencia y medir con precisión la potencia de recepción (RSSI).

Figura 27

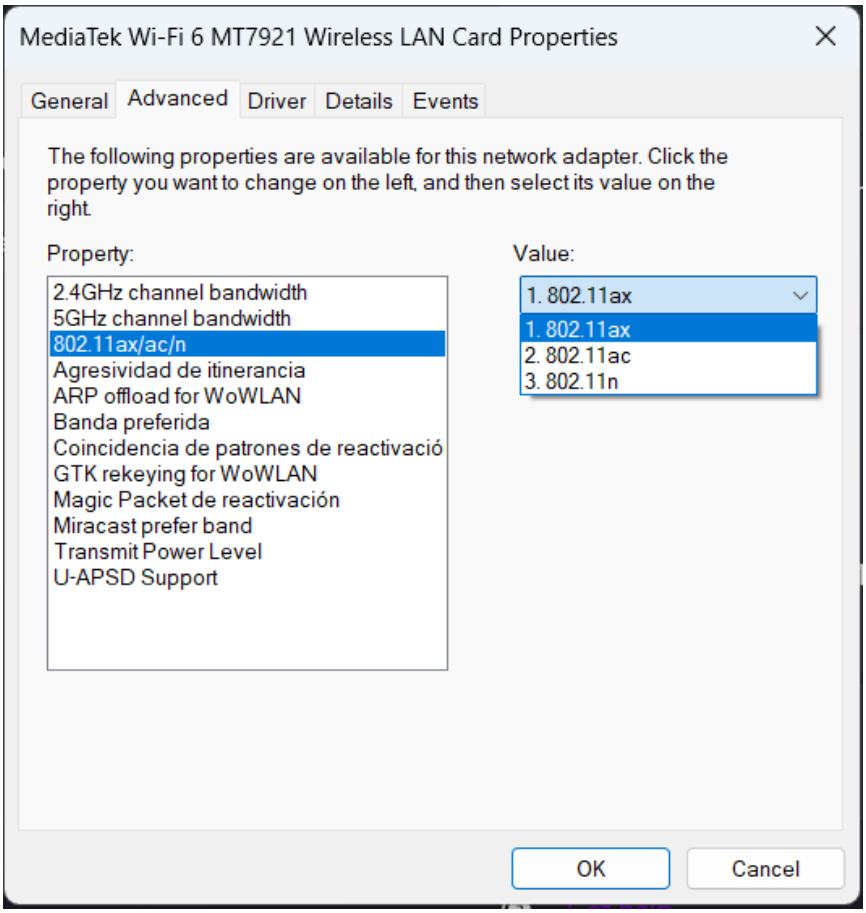
Equipo portátil Windows compatible con Wi-Fi 6.



Nota: Se observa una laptop marca Asus Vivobook S14 Flip, con tarjeta de red compatible con la tecnología 802.11ax. Autoría propia.

Figura 28

Tarjeta de red compatible con Wi-Fi 6.



Nota: Se observa la tarjeta de red que viene en el equipo Asus Vivobook S14 Flip, una MediaTek Wi-Fi 6 MT7921 compatible con la tecnología 802.11ax. Autoría propia.

- Variables de Control: Durante las pruebas físicas, se mantendrá el router en una posición fija, variando únicamente la distancia y el grosor de los obstáculos (paredes de mampostería, ladrillo y concreto) para tabular la pérdida de propagación específica del entorno local.

3.4.2. *Herramientas de medición, análisis y software de simulación*

Para la captura de datos y la posterior generación de modelos predictivos, se han seleccionado herramientas que combinan precisión técnica con facilidad de despliegue operativo para un ISP.

A. Herramientas de Campo

- WiFi Analyzer: Utilizado para el análisis de la red inalámbrica en tiempo real, permitiendo analizar las características técnicas y parámetros del punto de acceso.
- NetSpot: Se empleará para realizar el escaneo y levantamiento de datos de la red inalámbrica.

B. Software de Simulación de Mapas de Calor

- Ruijie AI Heatmap: Una aplicación online que permite el diseño y medición de la capacidad de cobertura de diferentes tipos de equipos en entornos personalizables, y con mediciones basadas en inteligencia artificial.

Todas las herramientas utilizadas son de uso libre, no hace falta pagar para aprovechar sus bondades, en el caso de WiFi Analyzer y NetSpot, tienen la opción de pagar para desbloquear más funcionalidades, que no son relevantes en este estudio, y Ruijie AI Heatmap necesita de una cuenta previamente creada para funcionar.

Mediante los resultados obtenidos con el Huawei AX2, se va a realizar un "ajuste" para el comportamiento de las paredes y obstáculos virtuales, asegurando que los mapas de calor de los inmuebles con FTTR sea un reflejo fiel de la realidad.

3.4.3. Parámetros de censado

Se realizarán pruebas en diferentes entornos para verificar el comportamiento de la tecnología FTTR en distintos ambientes residenciales.

1. Caracterización de Obstáculos: Se categorizarán los obstáculos en niveles de grosor estándar detectados en un entorno habitacional:
    - Vidrio (3-6 mm): Atenuación mínima (~1-3 dB).
    - Tabiquería delgada (8-10 cm): Atenuación baja (~3-5 dB).
    - Pared de bloque estándar (15 cm): Atenuación media (~7-10 dB).
    - Muro de adobe (~50 cm): Atenuación alta (>25 dB).

2. Atenuación por distancia: Se calculará y medirá la atenuación que tiene la banda de 5GHz a diferentes distancias del router:
    - Pruebas desde los 0, a los 3 metros.

3.5 Procedimiento de obtención e instalación del ecosistema de software

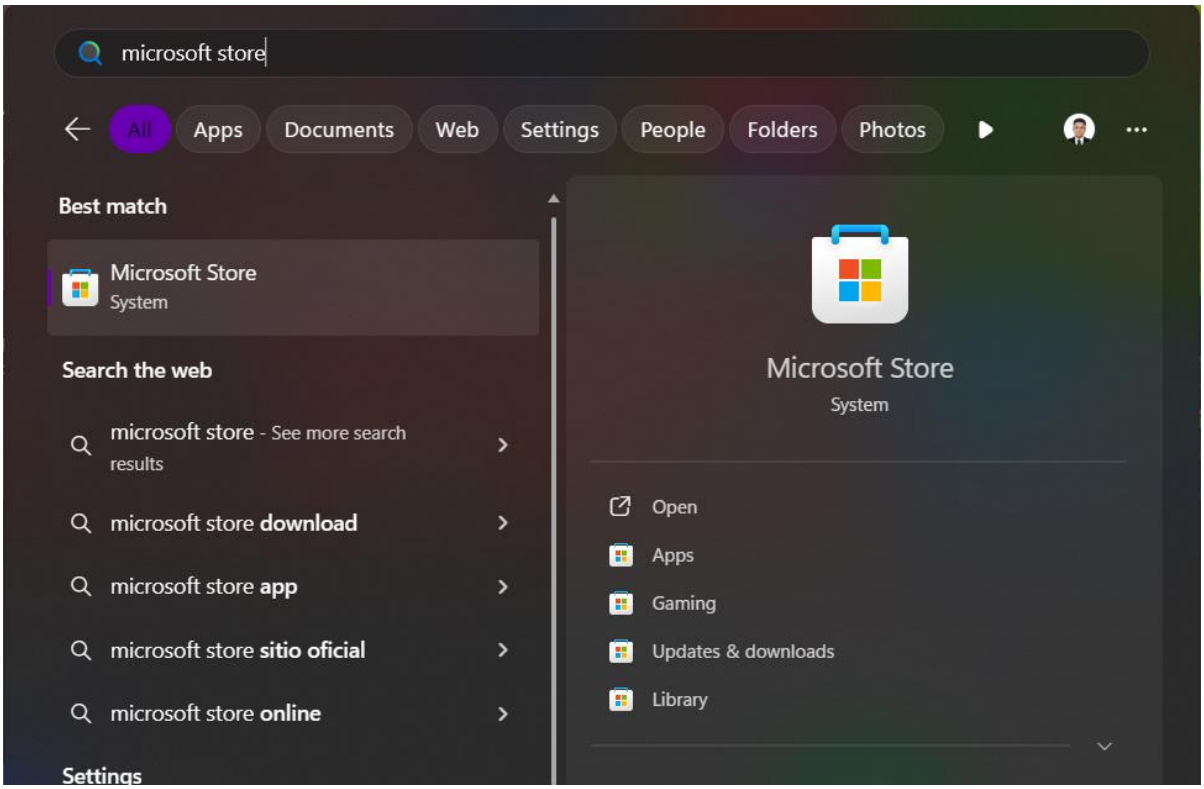
El siguiente protocolo detalla los pasos seguidos para la preparación del entorno de pruebas, garantizando la vigencia y compatibilidad de las aplicaciones. Es imperativo que el Microsoft Store se encuentre actualizado para asegurar la descarga de las versiones más recientes de las herramientas de campo.

3.5.1. *Adquisición de herramientas en el repositorio oficial*

La fase inicial requiere el acceso al repositorio oficial mediante el buscador de Windows para localizar la "Microsoft Store", como se ve en la Figura 29. Este paso es fundamental para garantizar que el software de medición provenga de una fuente confiable y certificada.

Figura 29

Búsqueda y acceso a la aplicación de Microsoft Store.



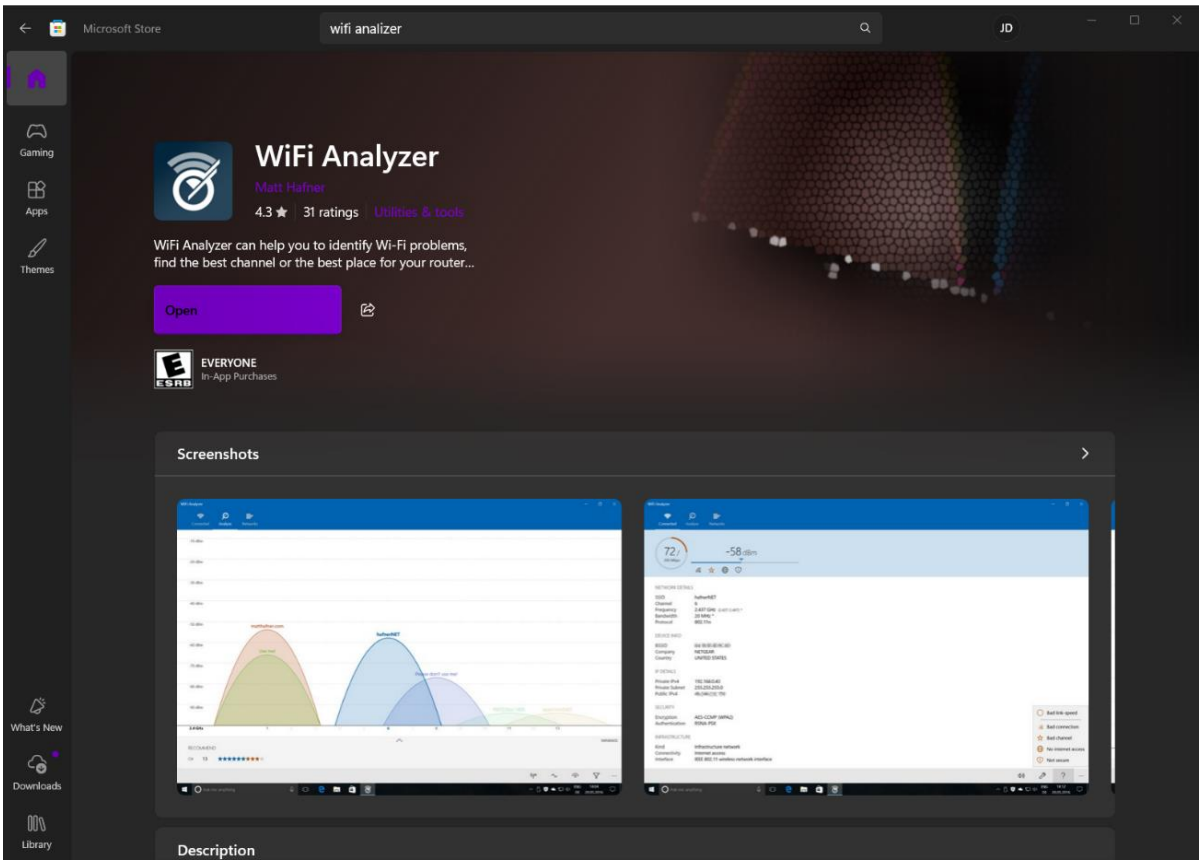
Nota: Autoría propia.

3.5.2. *Adquisición y Requerimientos de WiFi Analyzer*

En la Figura 30 se identifica el software WiFi Analyzer desarrollado por Matt Hafner. Es vital verificar que el estado de la aplicación sea "Open" o "Install" tras una descarga exitosa.

Figura 30

Interfaz de la aplicación WiFi Analyzer en la tienda oficial.

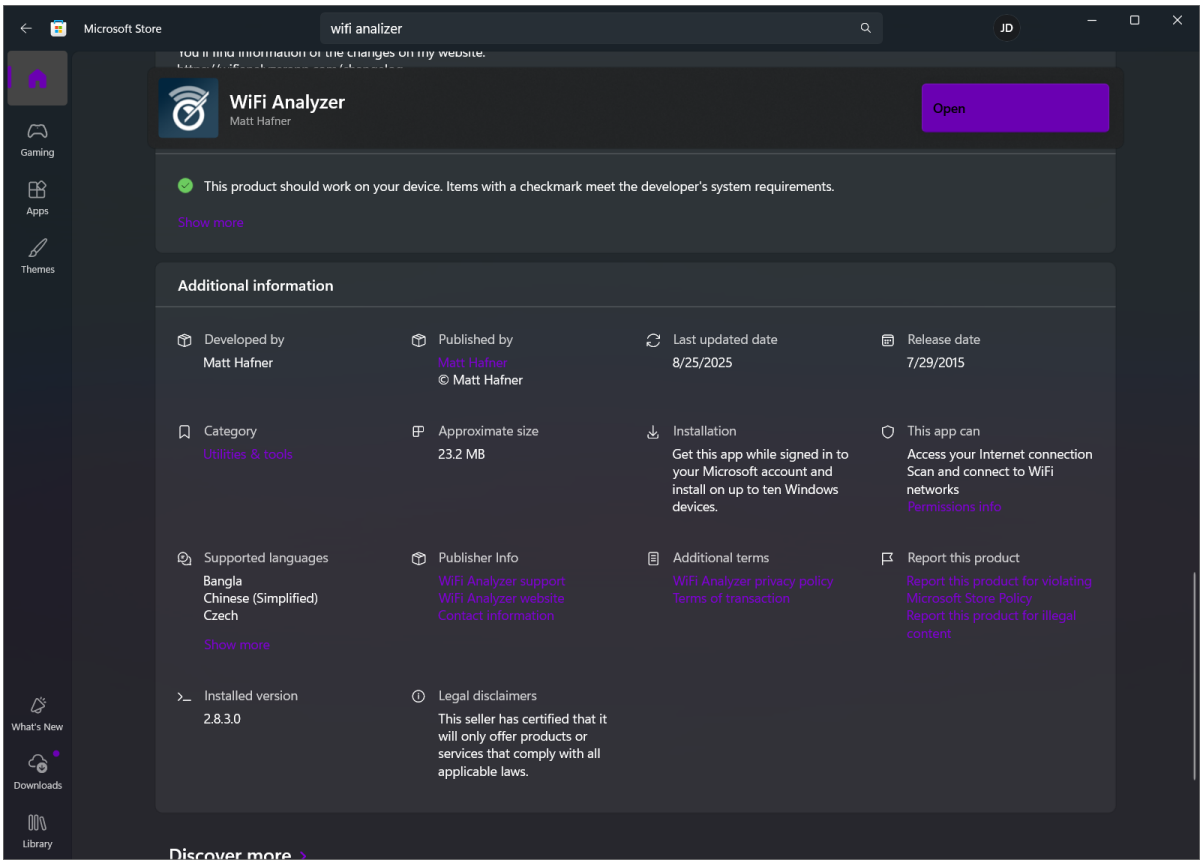


Nota: Autoría propia.

Se debe validar la sección de "Additional information", comprobando que la versión instalada (v2.8.3.0 o superior) sea compatible con el sistema y cumpla con los requisitos del desarrollador para la lectura de parámetros del punto de acceso, como se ve en la Figura 31.

Figura 31

Detalles técnicos y requisitos del sistema para WiFi Analyzer.



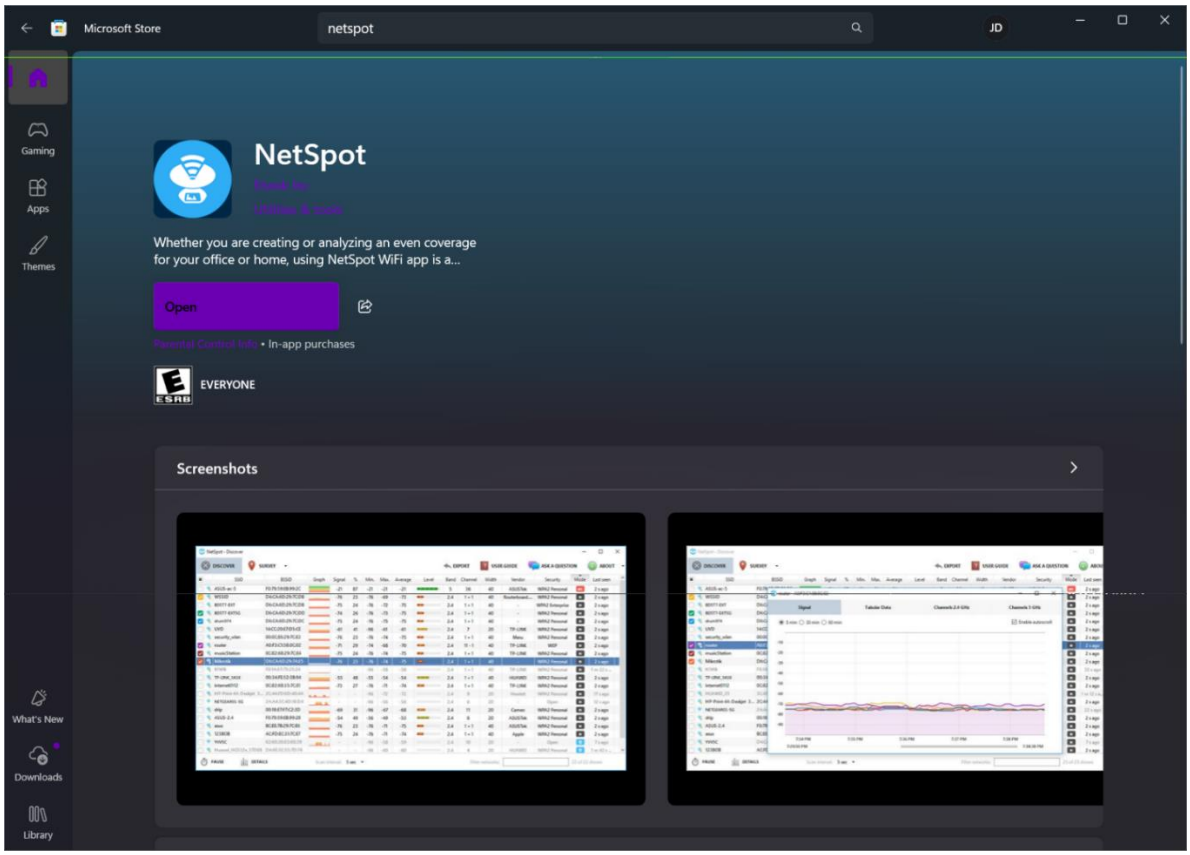
Nota: Autoría propia.

3.5.3. *Adquisición y Requerimientos de NetSpot*

En la Figura 32 se localiza la herramienta NetSpot de Etwok Inc. Esta herramienta es indispensable para el levantamiento de datos de la red inalámbrica en el entorno de pruebas.

Figura 32

Página de descarga y capturas de interfaz de NetSpot.

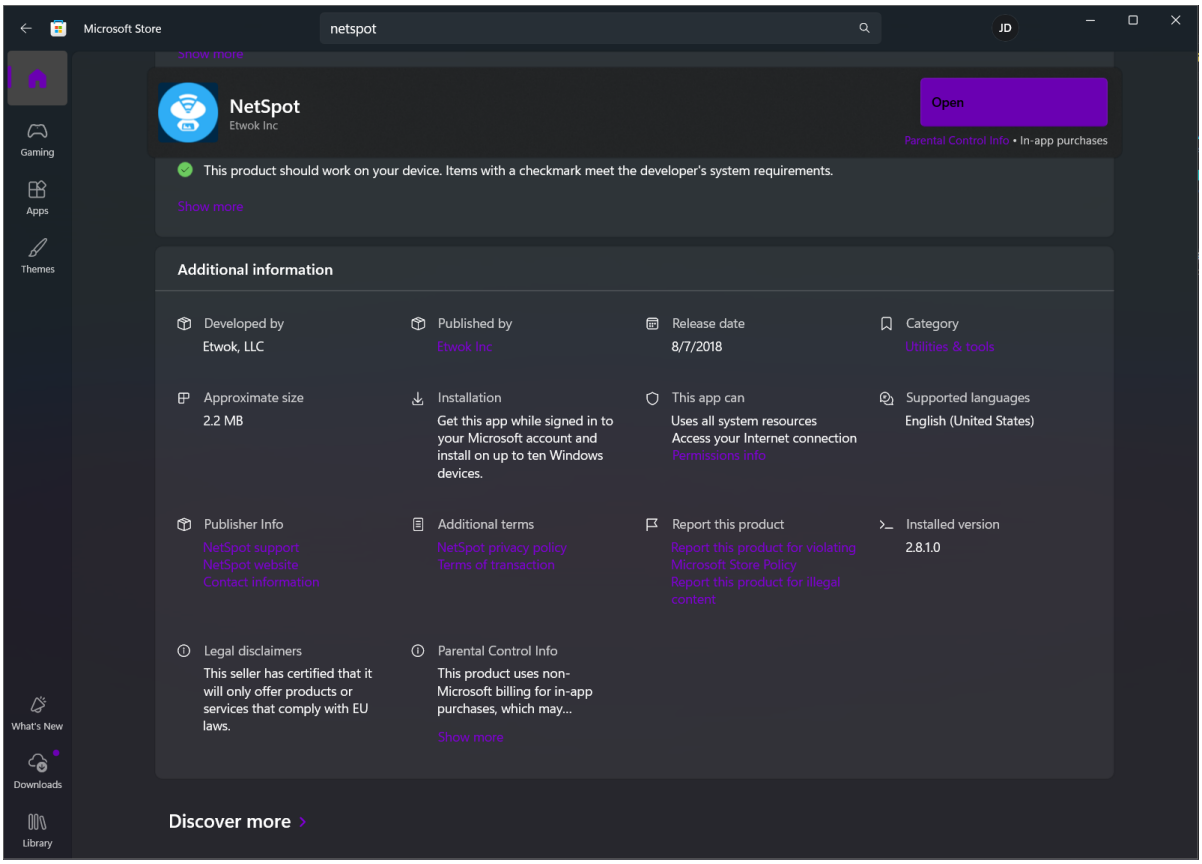


Nota: Autoría propia.

En la "Información adicional" de NetSpot, se confirma que la aplicación tiene permisos para utilizar todos los recursos del sistema y acceder a la conexión a internet, factores necesarios para el procesamiento de los datos recolectados (en su versión v2.8.1.0 o superior), visible en la Figura 33.

Figura 33

Especificaciones de instalación y permisos de NetSpot.



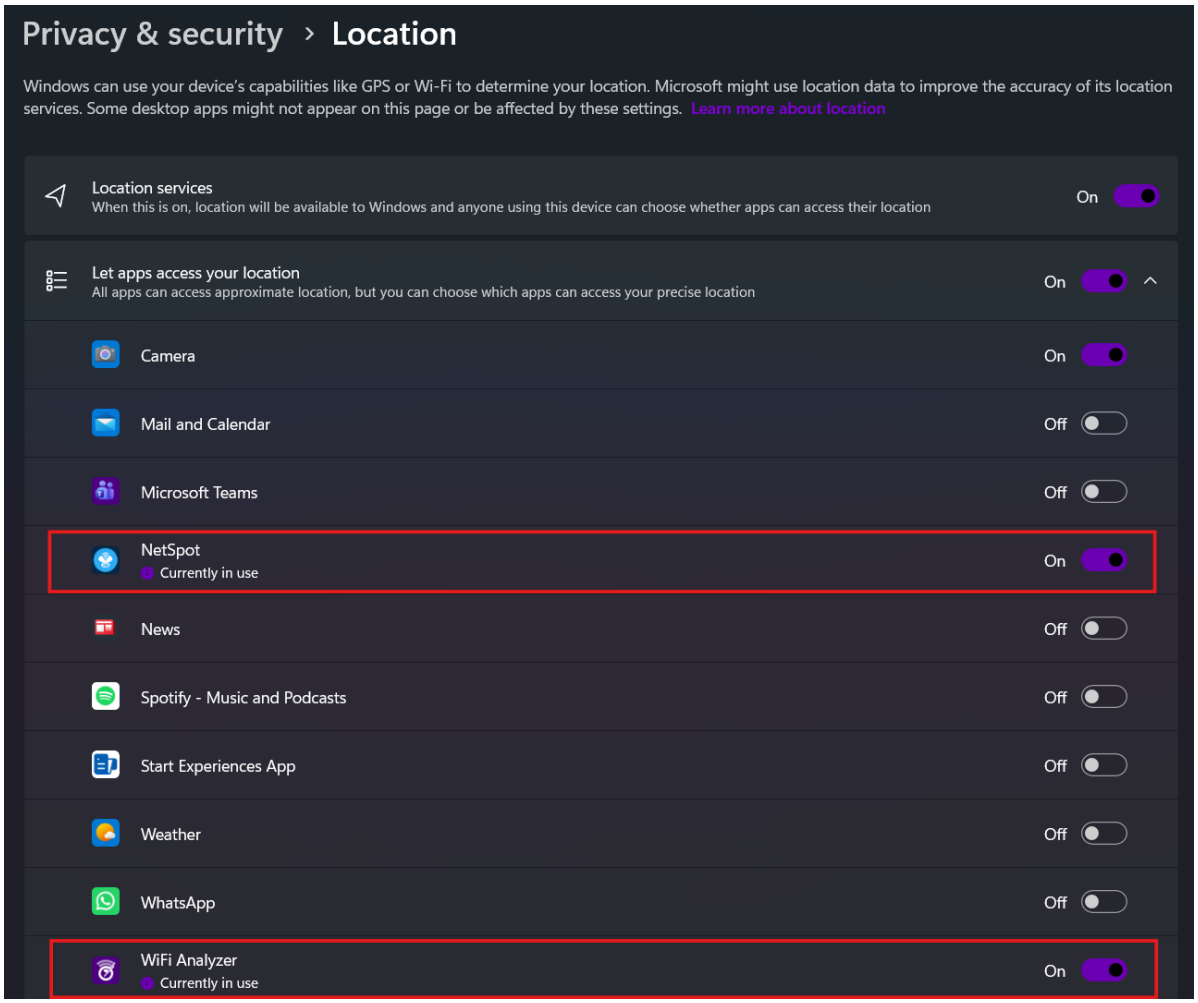
Nota: Autoría propia.

3.5.4. *Configuración de privacidad y servicios de red*

Para que NetSpot y WiFi Analyzer realicen el escaneo de redes de forma efectiva, se debe configurar la Privacidad y Seguridad del sistema. Es obligatorio que los "Location services" estén activos y que las aplicaciones tengan permiso para acceder a la ubicación precisa, ya que las APIs de Windows vinculan el escaneo de SSIDs con la geolocalización del dispositivo, como se ve en la Figura 34.

Figura 34

Permisos de ubicación de las herramientas de medición.



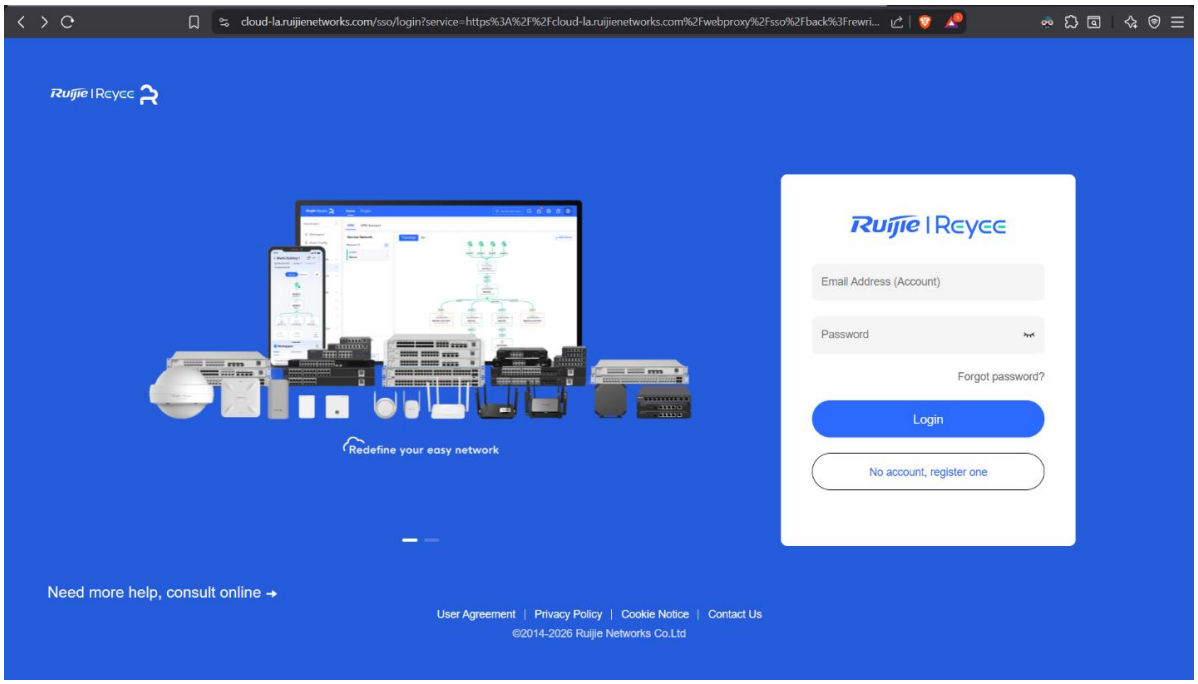
Nota: Autoría propia.

3.5.5. *Registro y acceso a la plataforma de simulación Ruijie Reyee*

Al acceder a la plataforma online de Ruijie Reyee de la Figura 35, se debe aceptar la política de cookies para garantizar el correcto funcionamiento de las herramientas de diseño basadas en la nube.

Figura 35

Pantalla de inicio de sesión de Ruijie Cloud.



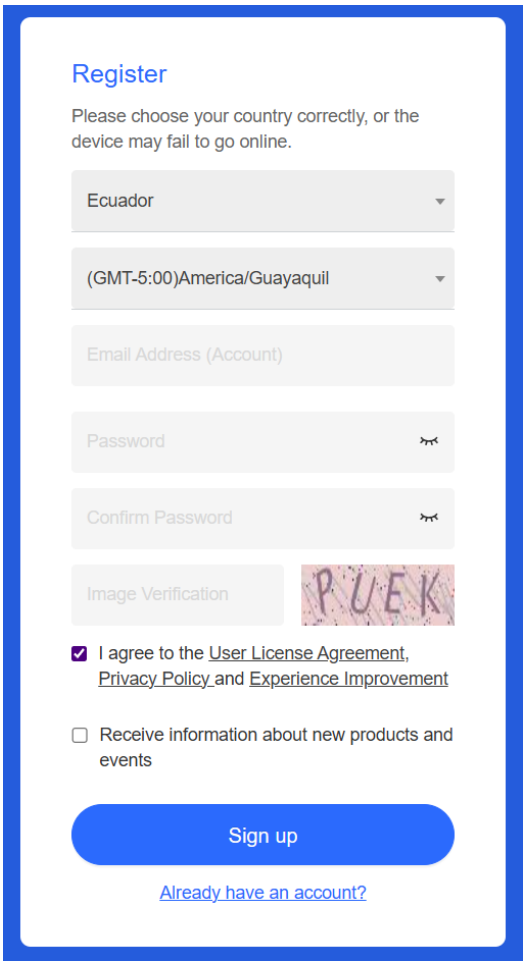
Nota: Plataforma de Ruijie Reyee. Autoría propia.

Se procede a la creación de una cuenta de usuario si no se dispone de una previa, acción necesaria para utilizar el software de simulación Ruijie AI Heatmap.

Es crítico seleccionar correctamente el país (Ecuador) y la zona horaria (GMT-5:00) America/Guayaquil, como en la Figura 36. Esto asegura que las simulaciones se ajusten a las regulaciones de potencia y espectro inalámbrico vigentes en el país. Se completa el registro con la verificación de imagen para evitar accesos automatizados.

Figura 36

Formulario de registro de usuario en la plataforma de simulación.

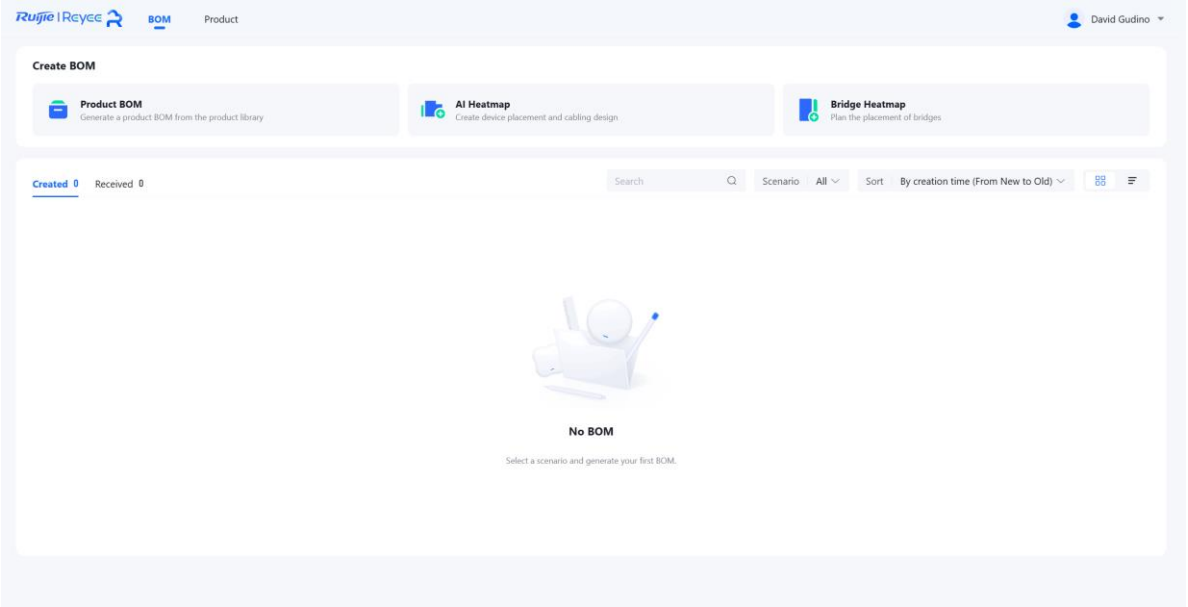


Nota: Plataforma de Ruijie Reyee. Autoría propia.

Tras el acceso exitoso, se selecciona el módulo AI Heatmap dentro de la sección de creación de BOM (Bill of Materials). Esta herramienta utiliza inteligencia artificial para proyectar la capacidad de cobertura basándose en los equipos seleccionados y los planos cargados, véase la Figura 37.

Figura 37

Panel principal de Ruijie Cloud para la selección de la herramienta de mapas de calor.



Nota: Plataforma de Ruijie Reyee. Autoría propia.

3.6 Familiarización con el entorno de software de medición y simulación

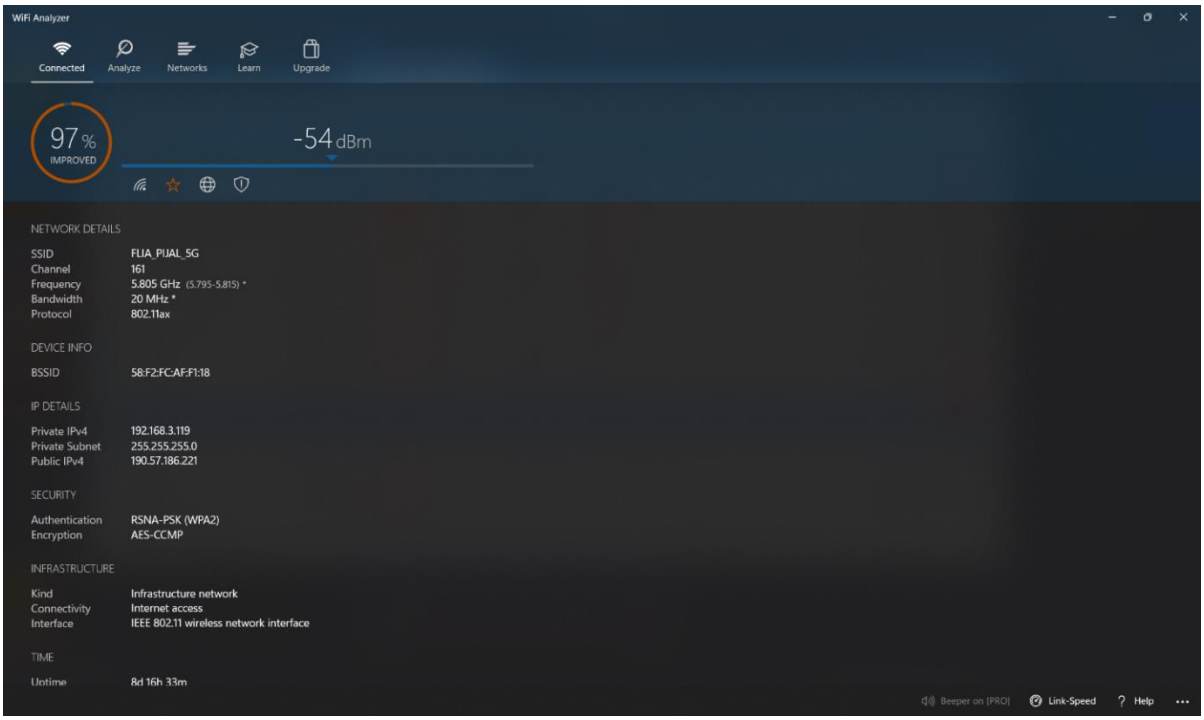
Una vez instalado el ecosistema de aplicaciones, es necesario comprender la interfaz y las funcionalidades clave que cada herramienta aporta a la fase de recolección de datos y modelado. A continuación, se describen los módulos principales de WiFi Analyzer, NetSpot y la plataforma Ruijie Cloud.

3.6.1. *Diagnóstico de detalles técnicos (WiFi Analyzer)*

WiFi Analyzer se emplea para la obtención de parámetros técnicos detallados de los puntos de acceso disponibles. Esta herramienta permite identificar con precisión la frecuencia de operación, los canales de control, los estándares de seguridad y la configuración de hardware de los routers en el entorno, facilitando la identificación de la red propia frente a la de terceros.

Figura 38

Panel de información detallada de la red activa en WiFi Analyzer.

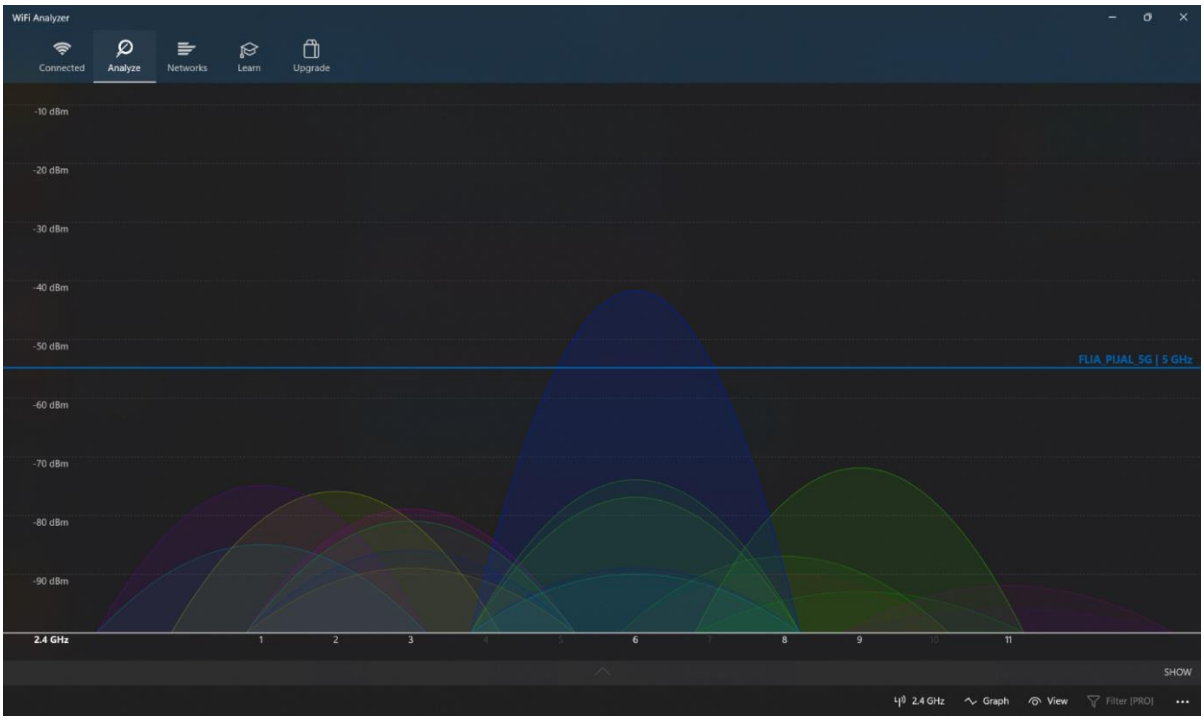


Nota: La captura muestra los parámetros lógicos y físicos del enlace actual, destacando la potencia de -54 dBm. Autoría propia.

En la Figura 38 se puede ver la interfaz que se utiliza para validar la identidad técnica del nodo emisor bajo estudio. En ella se puede observar el SSID (FLIA_PIJAL_5G) y el protocolo de red 802.11ax (WiFi 6), confirmando que el equipo emisor cumple con los requisitos del proyecto. Además, proporciona datos de infraestructura críticos como el BSSID, las direcciones IP asignadas y la velocidad de enlace teórica, asegurando que la conexión se mantenga dentro de los parámetros de operación de 5 GHz.

Figura 39

Análisis espectral de la banda de 2.4 GHz.

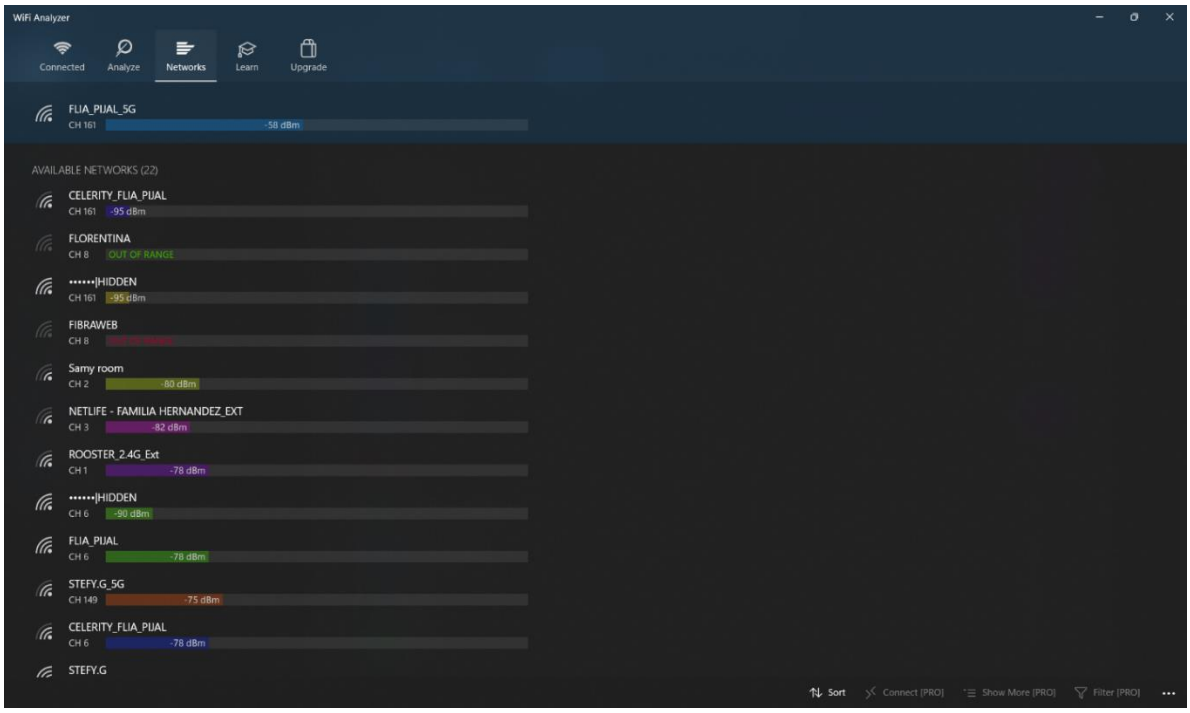


Nota: Visualización de la densidad de redes y su potencia en la frecuencia baja. Autoría propia.

En esta vista de análisis de la Figura 39, el software permite observar la ocupación de los canales del 1 al 11 en la banda de 2.4 GHz. El objetivo primordial es identificar visualmente el solapamiento de señales y el nivel de saturación del espectro en el entorno de pruebas. Esta información sirve como línea base para entender el ruido ambiental que podría afectar la estabilidad general del router, incluso si las pruebas principales se centran en frecuencias más altas.

Figura 40

Listado tabular de redes circundantes detectadas.

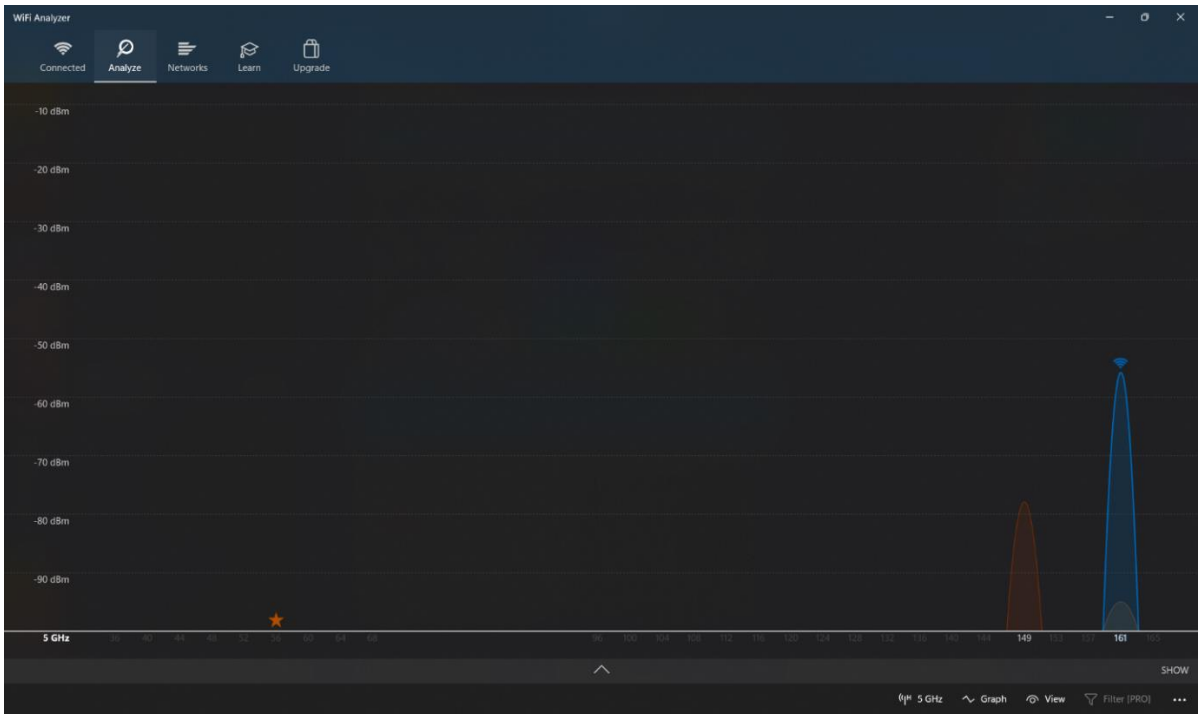


Nota: Censado de todos los SSIDs al alcance con su respectiva potencia en tiempo real. Autoría propia.

En la Figura 40 se presenta un inventario completo de los puntos de acceso cercanos. Para los fines de este trabajo, se emplea para identificar fuentes de interferencia externa mediante la lectura del RSSI de cada vecino. La lista permite discriminar rápidamente cuáles redes operan en el canal 161 (el canal bajo estudio) y cuáles se encuentran fuera de rango, facilitando la limpieza de variables antes de iniciar la captura de datos con NetSpot.

Figura 41

Espectro de canales en la banda de 5 GHz.



Nota: Representación visual de la señal WiFi 6 en el canal 161 de la banda alta. Autoría propia.

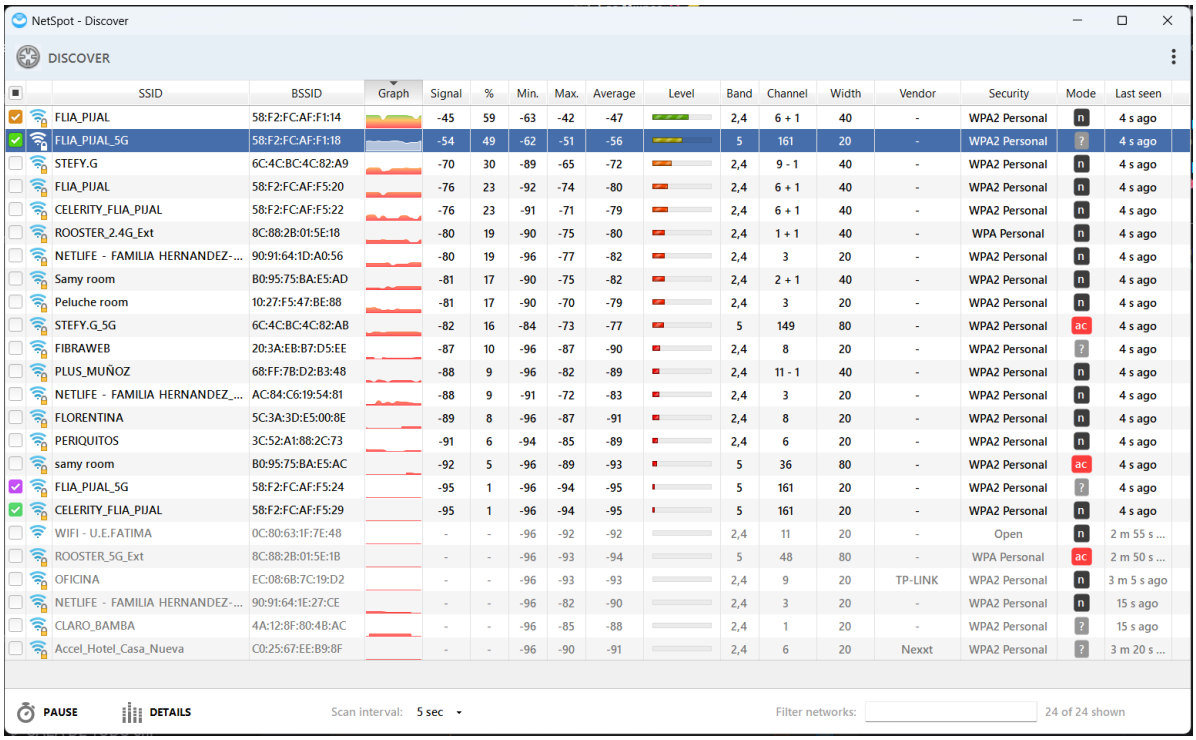
La vista de análisis para 5 GHz es fundamental para confirmar la "salud" del canal seleccionado. En la Figura 41 se observa la curva de potencia de la red principal destacándose sobre el piso de ruido. Al verificar que no existen otras curvas significativas solapándose directamente sobre el canal 161, se garantiza que las mediciones de rendimiento de WiFi 6 obtenidas posteriormente no se verán viciadas por colisiones de paquetes con redes de terceros.

3.6.2. *Medición, tabulación y graficación de datos (NetSpot)*

En la Figura 42 está la interfaz principal para la recolección de datos masivos. NetSpot organiza en columnas el SSID, el BSSID y, lo más importante, el porcentaje de señal y el RSSI en tiempo real. Esta tabla permite al técnico observar simultáneamente el comportamiento de todas las redes, facilitando la exportación de valores promedios para alimentar el software de simulación. Es la fuente primaria para la tabulación de datos.

Figura 42

Tabla maestra de descubrimiento y métricas en NetSpot.

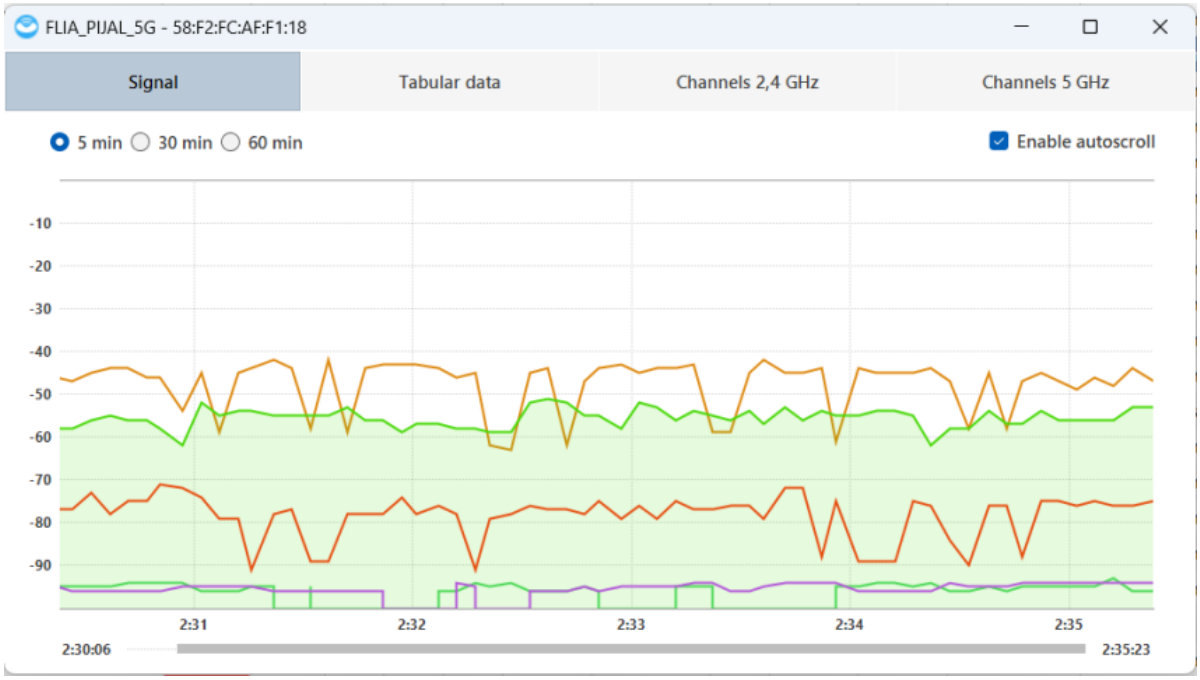


Nota: Tabulación exhaustiva de 24 redes detectadas con sus valores mínimos, máximos y promedio. Autoría propia.

NetSpot utiliza esta vista para graficar el comportamiento temporal de la señal inalámbrica, vista en la Figura 43. Para el análisis de FTTR, esta gráfica es vital ya que permite detectar fluctuaciones o caídas repentinas en la potencia de la red (FLIA_PIJAL_5G) mientras el dispositivo cliente se mueve por la vivienda. Una línea estable indica un enlace sólido, mientras que una línea con picos descendentes justifica la necesidad de implementar un nodo adicional en esa estancia.

Figura 43

Gráfica cronológica de estabilidad de señal (RSSI).

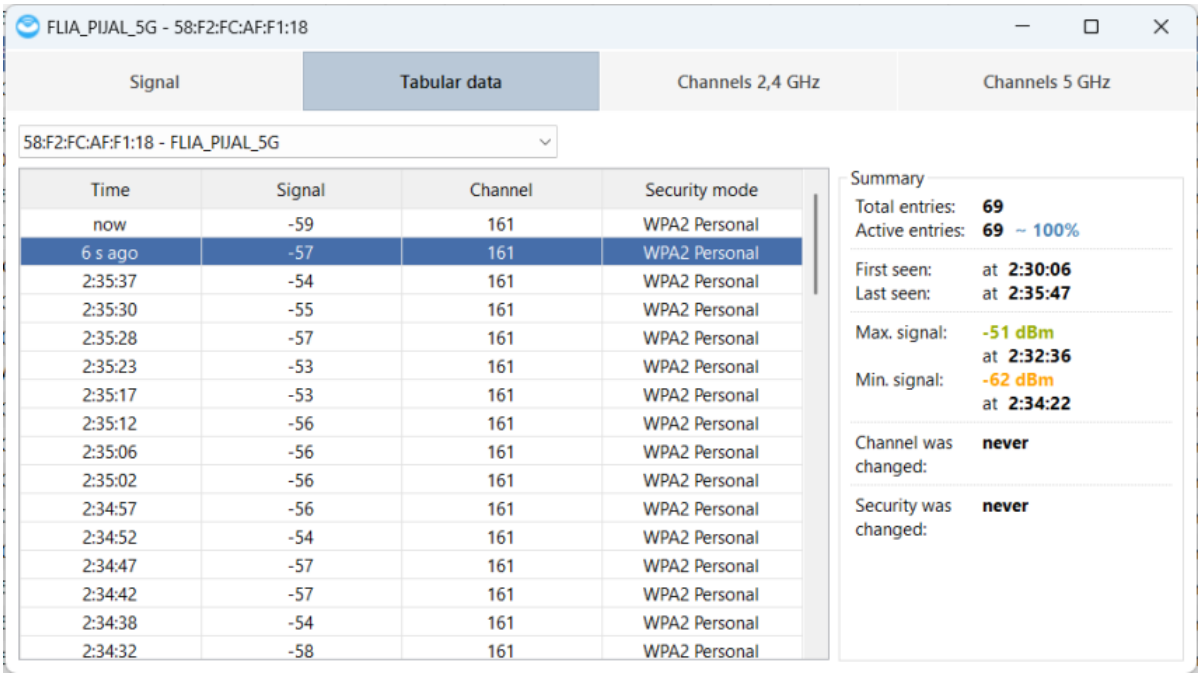


Nota: Monitoreo de la variación de la potencia en decibelios durante un periodo de 5 minutos. Autoría propia.

La Figura 44 detalla el log de eventos del software, donde se registra cada muestra de señal con un sello de tiempo preciso. Esta funcionalidad se utiliza en la tesis para validar la repetibilidad de las pruebas; permite extraer datos específicos de momentos exactos (ej. "hace 6 segundos") para analizar cómo varía la señal ante cambios momentáneos en el entorno, como la apertura de una puerta o el movimiento de personas.

Figura 44

Registro histórico de datos tabulares por SSID.

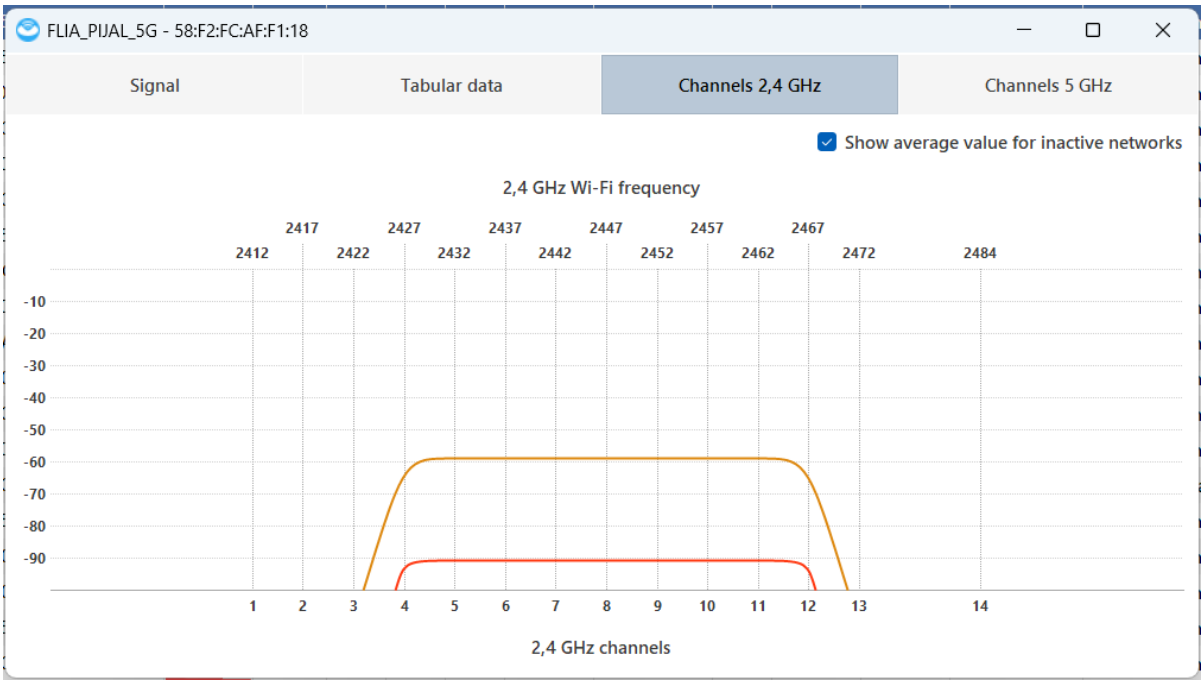


Nota: Log de muestras que asocia la hora exacta con el nivel de señal recibido. Autoría propia.

A diferencia del diagnóstico simple, esta gráfica de NetSpot permite tabular visualmente cómo la señal interactúa con los canales adyacentes. Se utiliza para documentar la congestión espectral en la banda baja del domicilio de pruebas. La forma de las parábolas y su nivel de elevación proporcionan los datos necesarios para configurar el "piso de ruido" en las simulaciones finales del modelo FTTR, representado en la Figura 45.

Figura 45

Gráfica de ocupación de canales en 2.4 GHz según NetSpot.

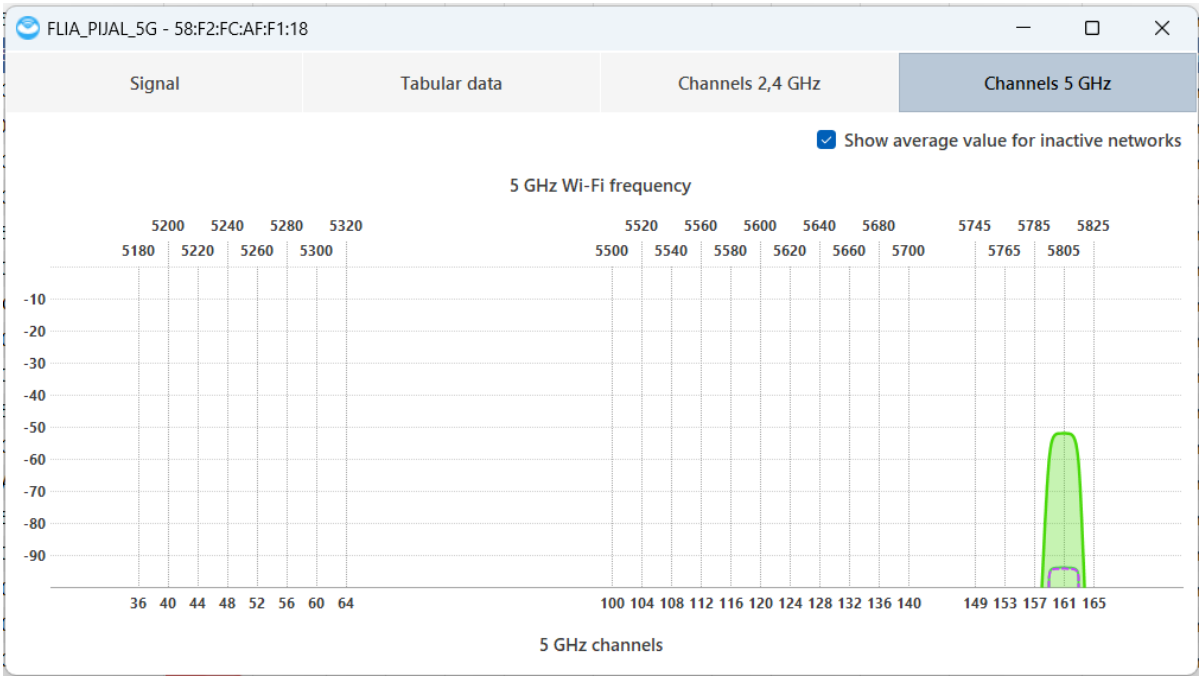


Nota: Análisis de solapamiento de canales en la banda de 2.4 GHz mediante el motor de NetSpot. Autoría propia.

Esta interfaz de la Figura 46 se emplea para graficar y documentar el uso de los canales de la banda de 5 GHz. Al mostrar la red bajo estudio en el canal 161 con una potencia superior a los -60 dBm, se tiene una prueba gráfica de la disponibilidad de ancho de banda para WiFi 6. NetSpot facilita aquí la identificación de canales libres, permitiendo recomendar al ISP la mejor configuración de frecuencias para evitar interferencias en entornos de alta densidad.

Figura 46

Análisis de canales y potencia en la banda de 5 GHz.



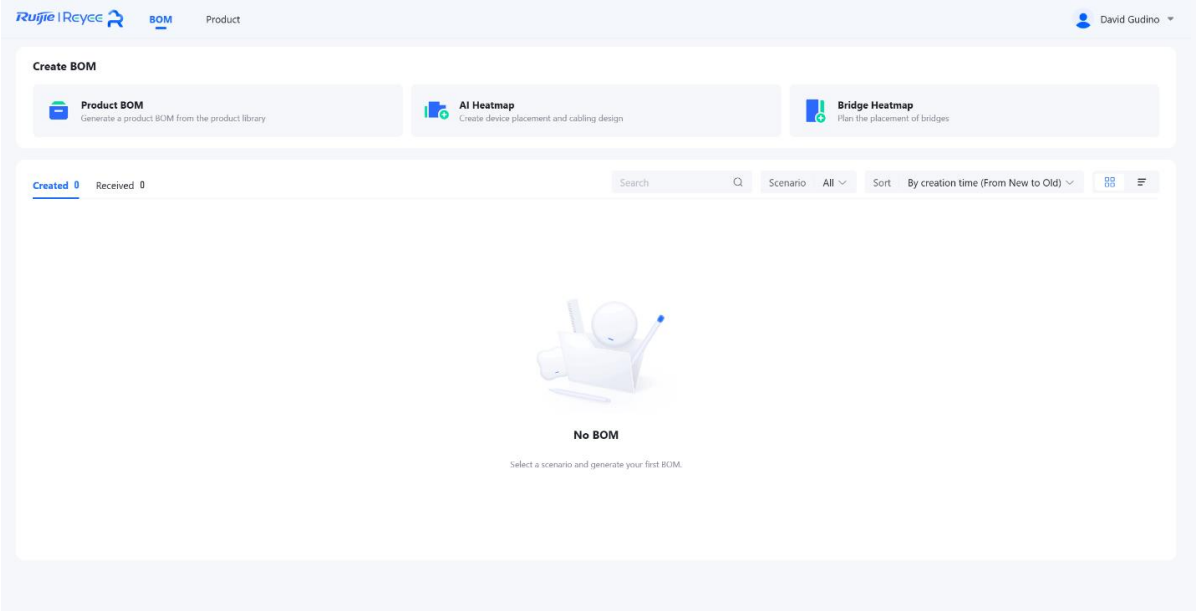
Nota: Identificación de la ubicación espectral de la señal de WiFi 6 en canales altos. Autoría propia.

3.6.3. *Preparación del entorno de simulación de mapas de calor*

Una vez recolectados los datos empíricos, se procede a la fase de modelado digital utilizando la plataforma Ruijie Reyee Cloud. Este software permite integrar la arquitectura física del inmueble con las variables técnicas medidas en campo para generar un modelo predictivo de alta fidelidad.

Figura 47

Dashboard principal de Ruijie Cloud.

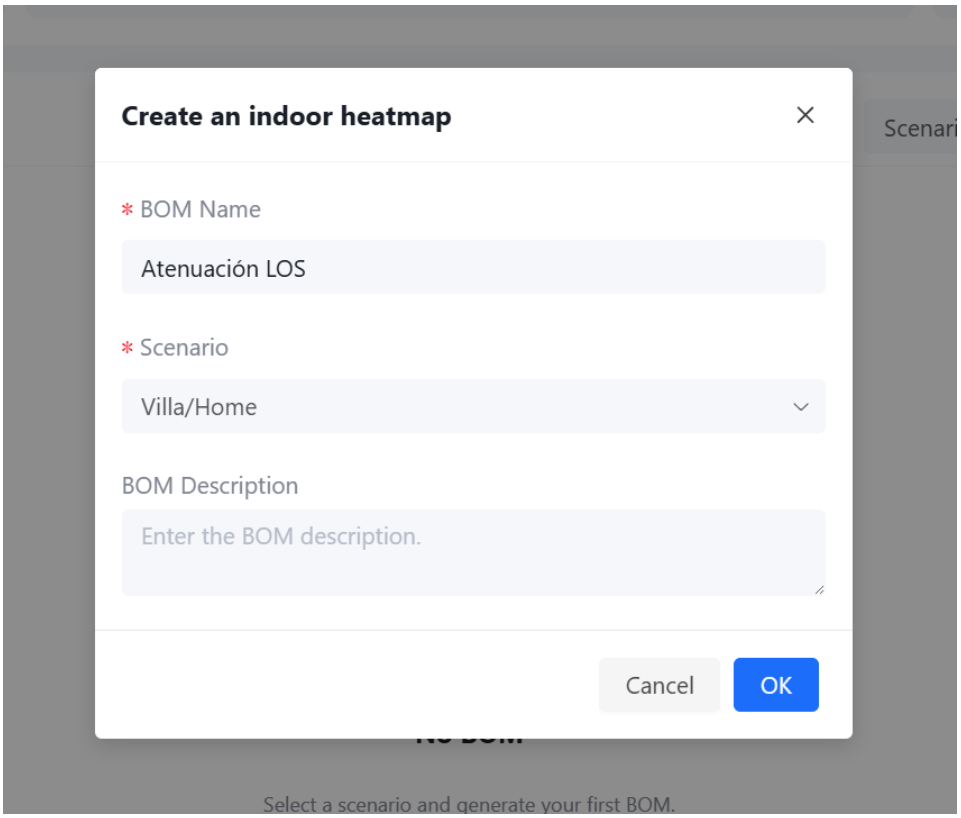


Nota: Interfaz de inicio para la gestión de proyectos, mapas de calor y presupuestos técnicos. Autoría propia.

Esta interfaz representa el centro de control del diseñador, donde se presentan las opciones para generar la lista de materiales (Product BOM) y el motor de simulación de cobertura basado en inteligencia artificial (AI Heatmap), en la Figura 47. Es el punto de partida para centralizar la gestión de los diferentes escenarios residenciales analizados en este estudio.

Figura 48

Creación de proyecto de simulación interna.

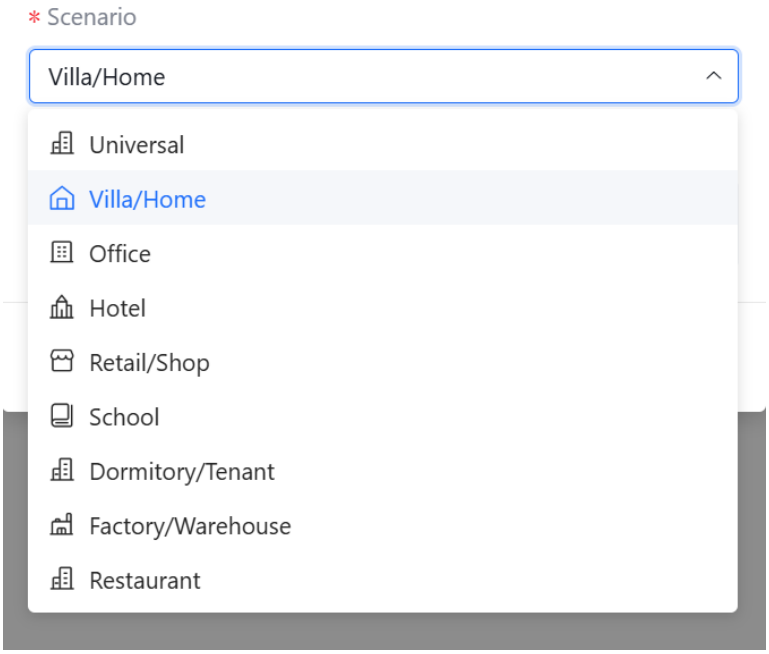


Nota: Modal inicial para establecer el nombre y la categoría del diseño del mapa de calor. Autoría propia.

En la Figura 48 se procede a la creación del escenario de simulación bajo el nombre "Atenuación LOS", vinculándolo directamente con un escenario de uso específico. Este paso permite organizar el flujo de trabajo y asignar una descripción detallada que identifique las condiciones de prueba particulares para cada vivienda.

Figura 49

Selección del escenario residencial.

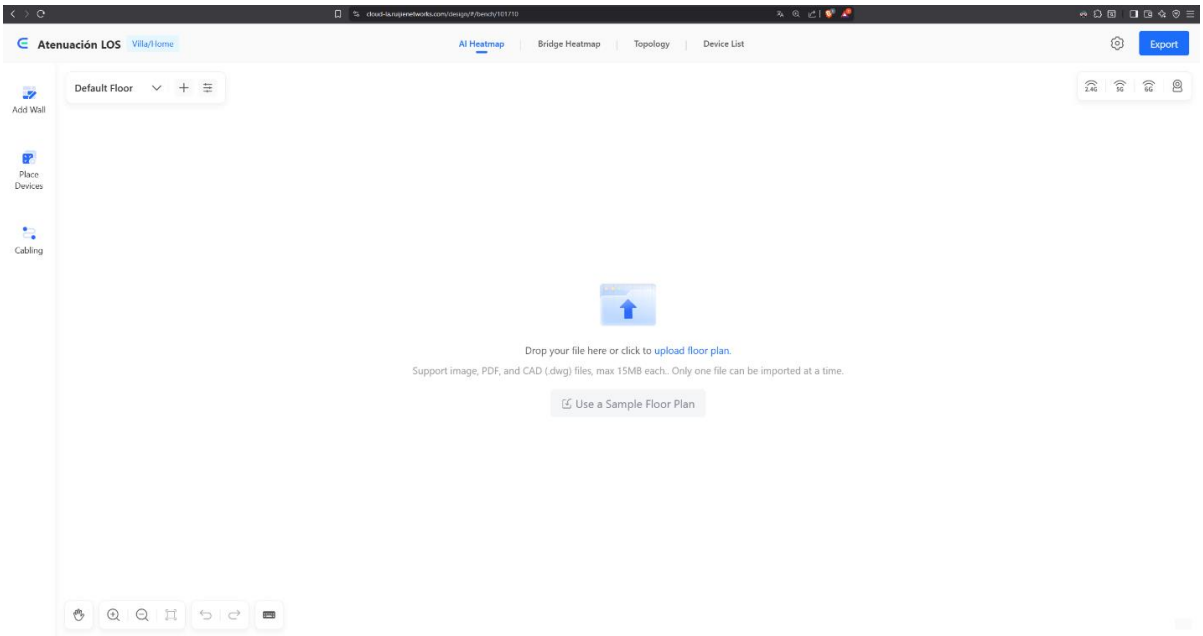


Nota: Categorización del entorno para optimizar la precisión de los algoritmos de propagación del software. Autoría propia.

En esta sección en la Figura 49, se define la naturaleza del inmueble, seleccionando la opción "Villa/Home" dentro de la lista de escenarios preconfigurados. Esta elección es crítica para la precisión del modelo, ya que el motor de IA ajusta automáticamente las variables de reflexión y absorción típicas de un hogar.

Figura 50

Interfaz de carga de planos digitales.

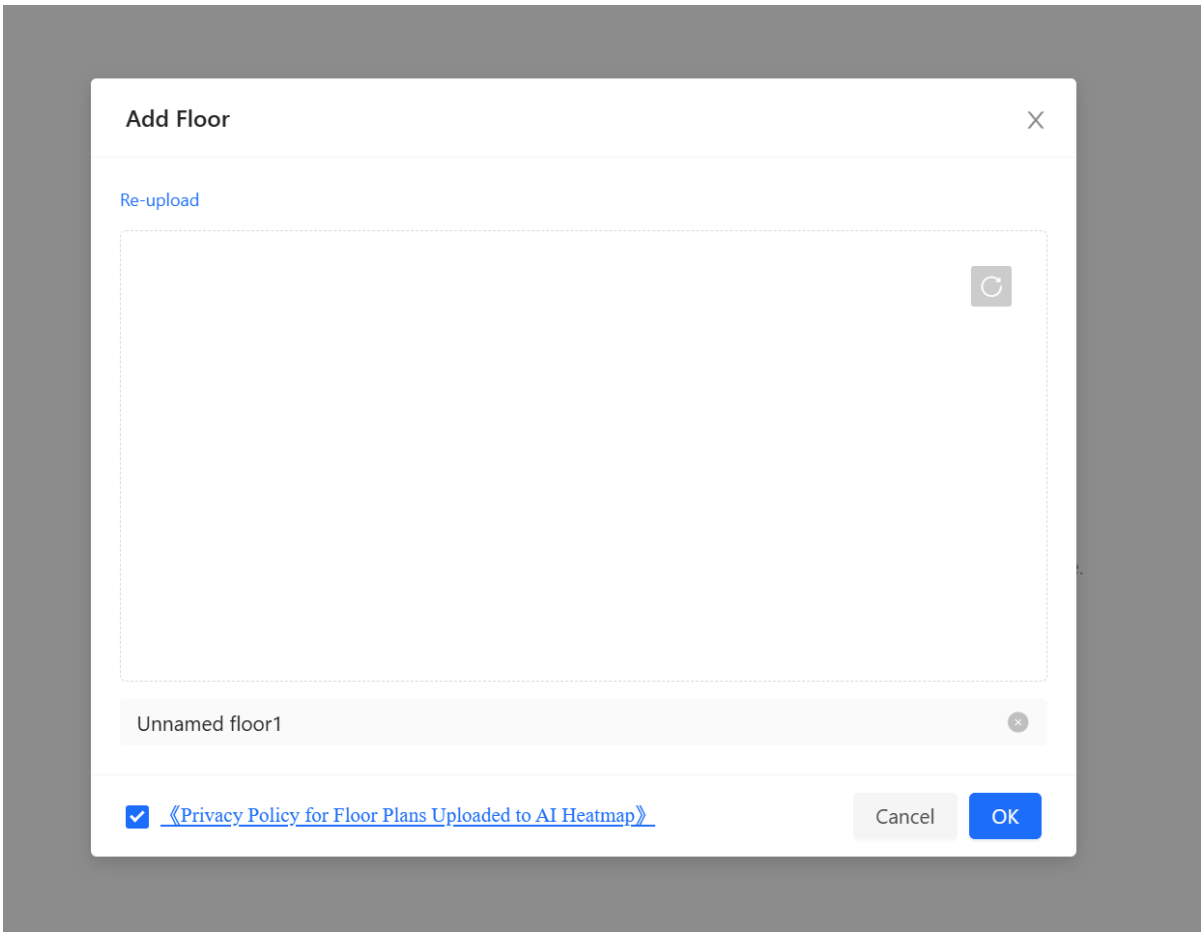


Nota: Sección para importar la arquitectura de la vivienda que servirá de base física al estudio. Autoría propia.

La plataforma habilita un lienzo de trabajo donde se carga el plano arquitectónico en formatos como PDF, imagen o CAD (.dwg), como se ve en la Figura 50. El archivo importado constituye la referencia métrica sobre la cual se dibujarán los obstáculos físicos y se distribuirán los nodos ópticos.

Figura 51

Confirmación y validación de planta.

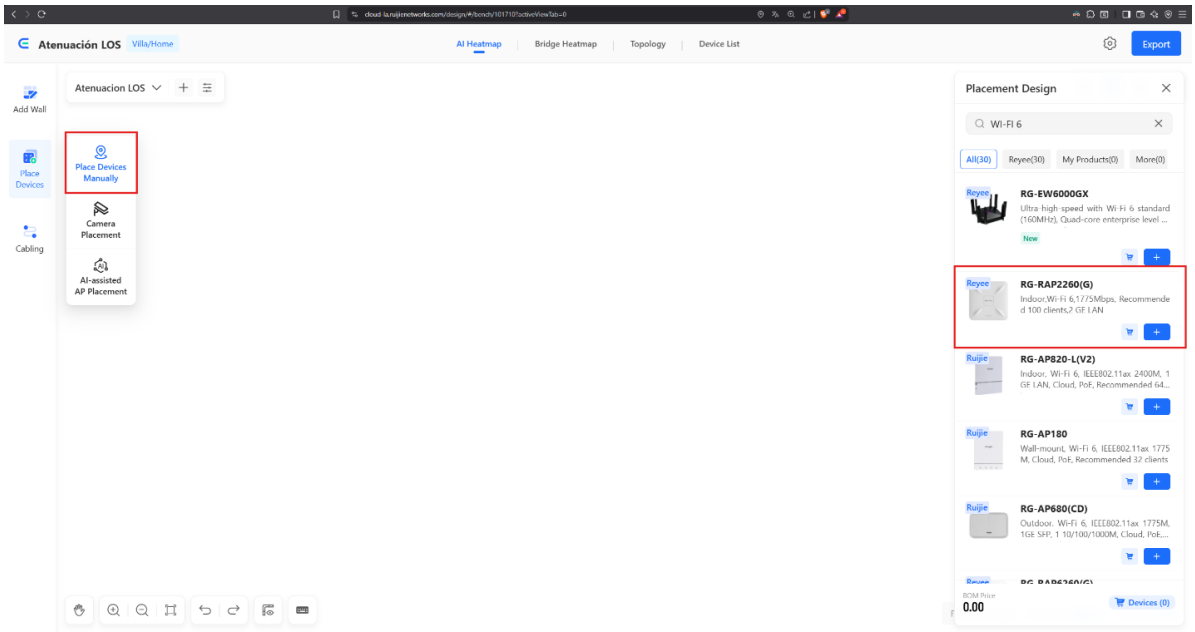


Nota: Ventana de confirmación final antes de procesar el plano en el lienzo de simulación. Autoría propia.

Una vez seleccionado el plano, se abre la ventana "Add Floor" para asignar un nombre a la planta y confirmar la aceptación de las políticas de privacidad de datos espaciales, visible en la Figura 51. Este paso garantiza que la imagen esté correctamente vinculada al proyecto antes de iniciar el trazado de muros.

Figura 52

Catálogo de dispositivos WiFi 6.

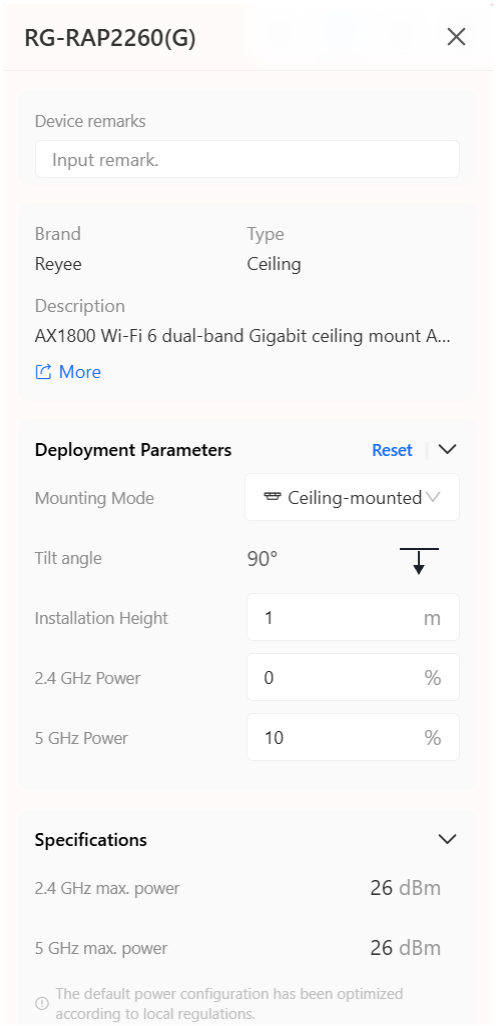


Nota: Selección de hardware compatible con tecnología 802.11ax para proyectar la cobertura del modelo propuesto. Autoría propia.

Se accede a la biblioteca en la Figura 52 de hardware para seleccionar manualmente los equipos que compondrán la red; en este caso, se elige el modelo RG-RAP2260(G). Este dispositivo, con soporte para WiFi 6 y doble banda Gigabit, se utiliza como el gemelo digital del router de pruebas Huawei AX2 para asegurar resultados coherentes.

Figura 53

Configuración de parámetros de nodo.

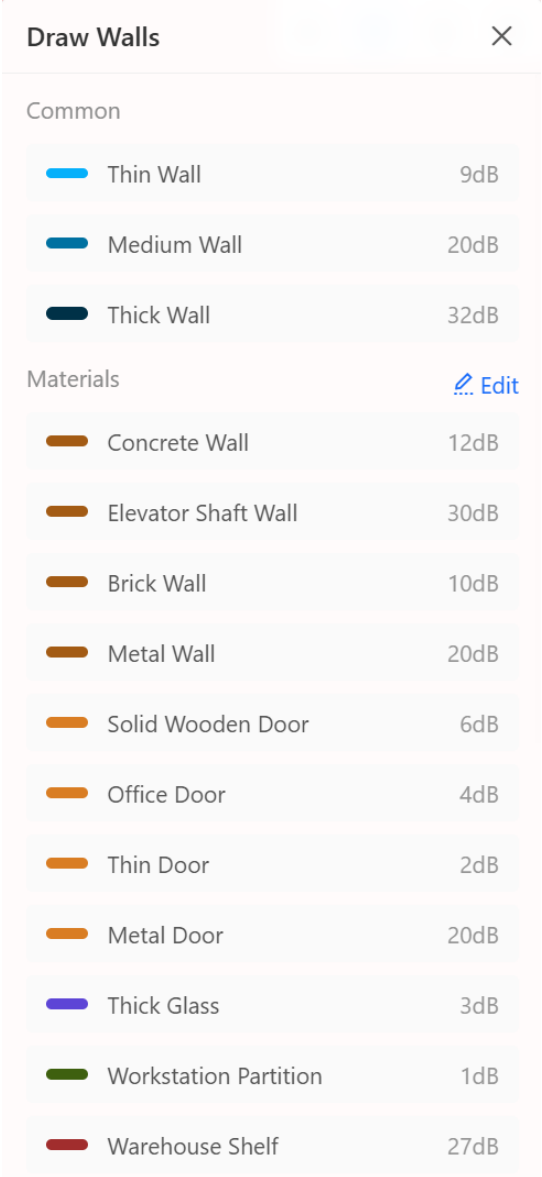


Nota: Ajuste de variables físicas y electrónicas del punto de acceso para replicar condiciones reales. Autoría propia.

Para cada unidad inalámbrica instalada virtualmente, se ajustan parámetros como el modo de montaje (techo), la altura de instalación de 1 metro y los niveles de potencia para las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz, representados en la Figura 53. Estos ajustes permiten simular fielmente el comportamiento del Huawei AX2 medido previamente en campo.

Figura 54

Librería de materiales y atenuación de muros.

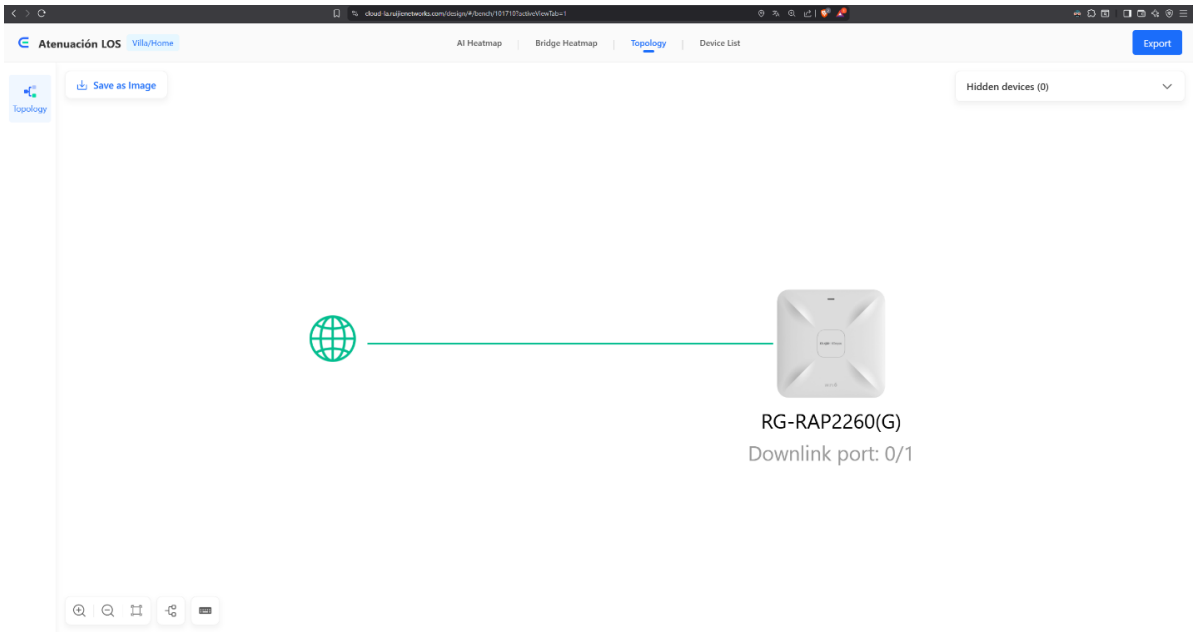


Nota: Herramienta clave para modelar la pérdida de señal por obstáculos físicos según el material. Autoría propia.

En la Figura 54 está la interfaz que permite seleccionar los obstáculos que componen la vivienda, asignando valores de atenuación como 12dB para concreto o 10dB para ladrillo. Estos coeficientes se ajustan basándose en la diferencia entre el RSSI teórico y el real obtenido durante la fase de tabulación con NetSpot.

Figura 55

Diagrama de topología lógica.



Nota: Representación esquemática de la conectividad y jerarquía de los equipos dentro de la red. Autoría propia.

Finalmente, en la Figura 55 se visualiza la topología de red generada automáticamente, donde se observa la conexión lógica del dispositivo hacia el enlace de datos. Esta vista confirma la correcta integración de los puertos de bajada (Downlink) y la comunicación del nodo WiFi 6 con la infraestructura de red proyectada.

3.7 Pruebas experimentales controladas

Se va a realizar una serie de pruebas controladas para obtener valores de potencia y atenuación en diferentes escenarios controlados, para posteriormente realizar un ajuste de potencia en una herramienta de simulación de mapas de calor de cobertura de WiFi 6.

3.7.1. *Tipos de entornos de pruebas*

Se van a abordar los siguientes entornos de simulación:

- Atenuación por distancia en línea de vista.
    - 0 metros

- 1 metro
- 2 metros
- 3 metros

- Atenuación por obstáculos inmuebles.
  - Pared de adobe (50 cm)
  - Pared de bloque (20 cm)
  - Ventana de vidrio (4 mm)
  - Pared o puerta de madera (3 cm)

3.7.2. *Pruebas de atenuación por distancia en línea de vista (LOS)*

Para evaluar el decaimiento natural de la señal electromagnética en el espacio libre, se estructuró un entorno de pruebas controlado libre de obstáculos físicos, estableciendo una condición de Línea de Vista (LOS, por sus siglas en inglés). El objetivo principal de esta fase experimental es determinar la potencia máxima de transmisión del equipo central (Huawei AX2) y establecer una línea base de atenuación métrica. Para garantizar la repetibilidad y precisión geométrica de las mediciones, se definió un punto cero físico, situando el inicio de la escala de medición exactamente en el eje de radiación de las antenas externas del enrutador.

Figura 56

Punto de referencia inicial para la medición de distancia con el router WiFi 6.



Nota: Vista del punto inicial de referencia para la distancia en LOS. Autoría propia.

Como se documenta en la Figura 56, la herramienta de medición (flexómetro) se posiciona en directo con la base del arreglo de antenas del equipo transmisor. Este punto inicial, considerado geométricamente como 0 metros, representa la zona del campo cercano (zona de Fresnel interna) donde se registra el nivel de máxima potencia de la señal antes de que esta sufra pérdidas por dispersión en el espacio libre. A partir de este origen de coordenadas, se desplazó el equipo receptor para realizar las capturas de intensidad de señal (RSSI) en intervalos escalonados.

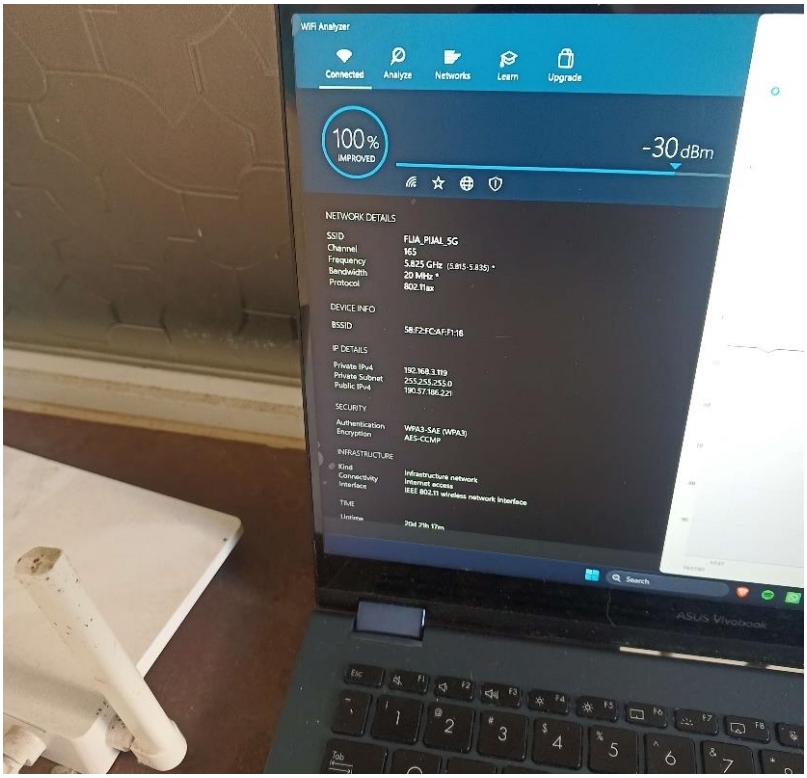
A. Prueba de atenuación a 0 metros de distancia con el router WiFi 6.

Iniciando con el esquema de mediciones en línea de vista (LOS), se procedió a registrar el nivel de señal base situando el equipo receptor (computadora portátil) colindante al enrutador transmisor, definiendo así el escenario de atenuación nula o "0 metros". El propósito de esta lectura inicial es obtener el valor del Identificador de Intensidad de Señal Recibida (RSSI) en

su máxima amplitud experimental, libre de pérdidas por propagación en el espacio libre y exenta de efectos de multitrayectoria.

Figura 57

Medición a 0 metros de distancia con el router WiFi 6.



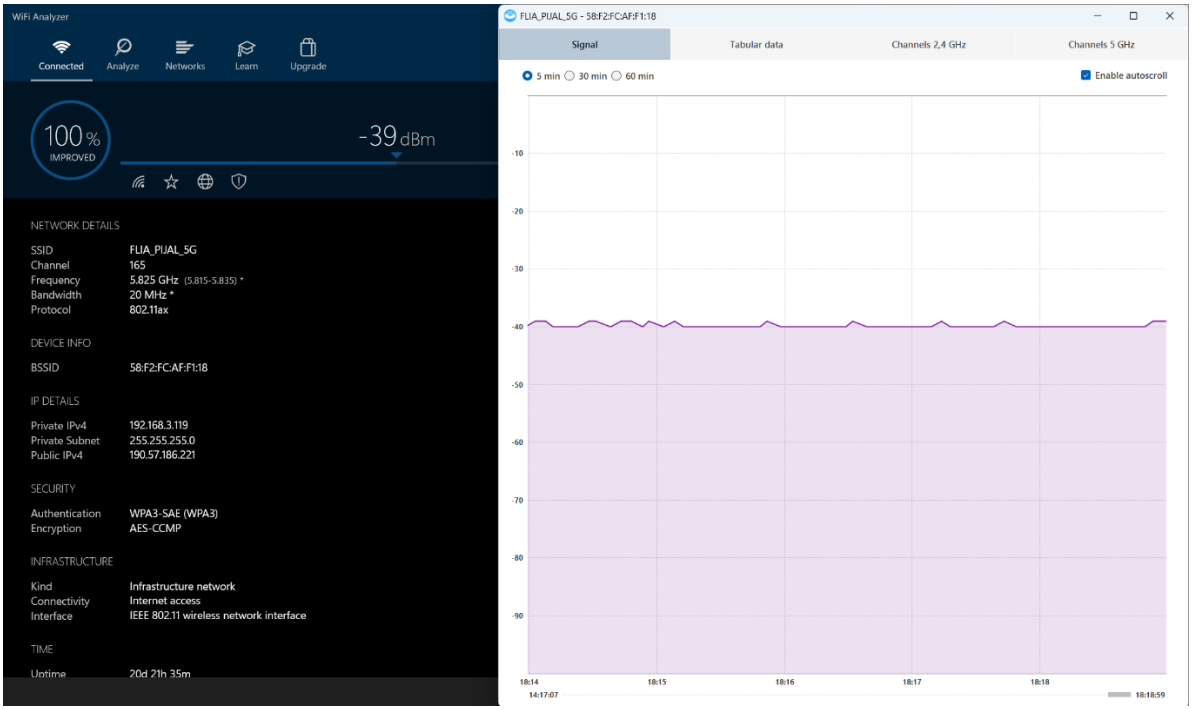
Nota: Vista del entorno de simulación a 0 metros de distancia, junto al punto de acceso inalámbrico. Autoría propia.

La configuración física descrita evidencia una lectura instantánea de -30 dBm en la interfaz del software de diagnóstico para la red (FLIA_PIJAL_5G), visible en la Figura 57. Este valor confirma el correcto funcionamiento del radio de 5 GHz bajo el estándar 802.11ax y establece el límite superior del presupuesto de potencia del equipo. Al tratarse de una medición en el campo cercano de la antena, este nivel de energía térmica representa el "techo" de la capacidad de transmisión, sirviendo como el punto de referencia absoluto (Ptx) sobre el cual se calculará el porcentaje de decaimiento en las pruebas de separación geométrica subsecuentes.

Para validar que la lectura inicial no correspondiera a un pico transitorio provocado por la ráfaga de tramas de control (beacons), se procedió a realizar un monitoreo continuo de la señal mediante el módulo de graficación temporal, durante un tiempo de 5 minutos. Esta prueba permite evaluar la estabilidad de transmisión del router en condiciones ideales y verificar la ausencia de fluctuaciones anómalas en el campo cercano durante un periodo de observación sostenido.

Figura 58

Gráfica de resultados de prueba a 0 metros de distancia.



Nota: Captura de pantalla de la prueba a 0 metros en LOS. Autoría propia.

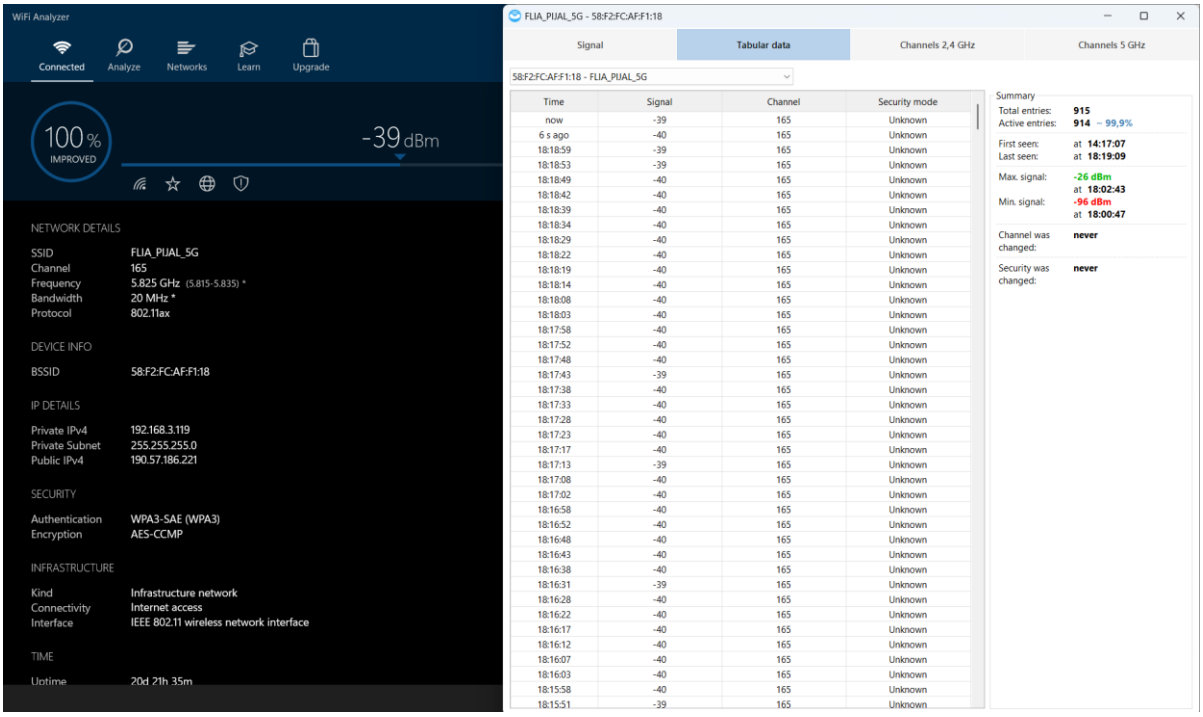
Como se observa en la gráfica de rendimiento temporal de la Figura 58, la amplitud de la señal se mantiene prácticamente constante, dibujando una trayectoria lineal con variaciones ínfimas que oscilan únicamente entre los -39 dBm y -40 dBm. Esta alta estabilidad espectral, evidenciada por la ausencia de caídas abruptas o fading (desvanecimiento) espaciales, confirma que el enlace de 5 GHz opera en un entorno óptimo sin interferencias destructivas inmediatas. Este comportamiento rectilíneo consolida la validez de este punto de origen como la referencia

absoluta máxima antes de proceder a la extracción y tabulación matemática de las muestras individuales.

Para cuantificar de manera precisa el comportamiento rectilíneo observado en la gráfica de rendimiento, se procedió a la captura y tabulación de las muestras individuales recolectadas por el software de medición. La Figura 59 expone el registro cronológico detallado (log de eventos), el cual vincula cada instante de tiempo de la prueba con su respectivo valor de intensidad de señal (RSSI). Esta matriz de datos empíricos es el insumo fundamental para someter las lecturas a un tratamiento estadístico, cuyo registro tabular completo de esta y todas las demás pruebas se encuentran disponibles en la sección de Anexos.

Figura 59

Tabla de resultados de prueba a 0 metros de distancia.



Nota: Captura de pantalla de la prueba a 0 metros en LOS. Autoría propia.

Con base en el registro histórico generado por la herramienta, se extrajo una ventana de muestreo representativa para su análisis detallado, cuyos valores se exponen a continuación en

la Tabla 19. Al final de la tabla se puede ver el resultado del cálculo del promedio de los valores tabulados de los resultados de la medición.

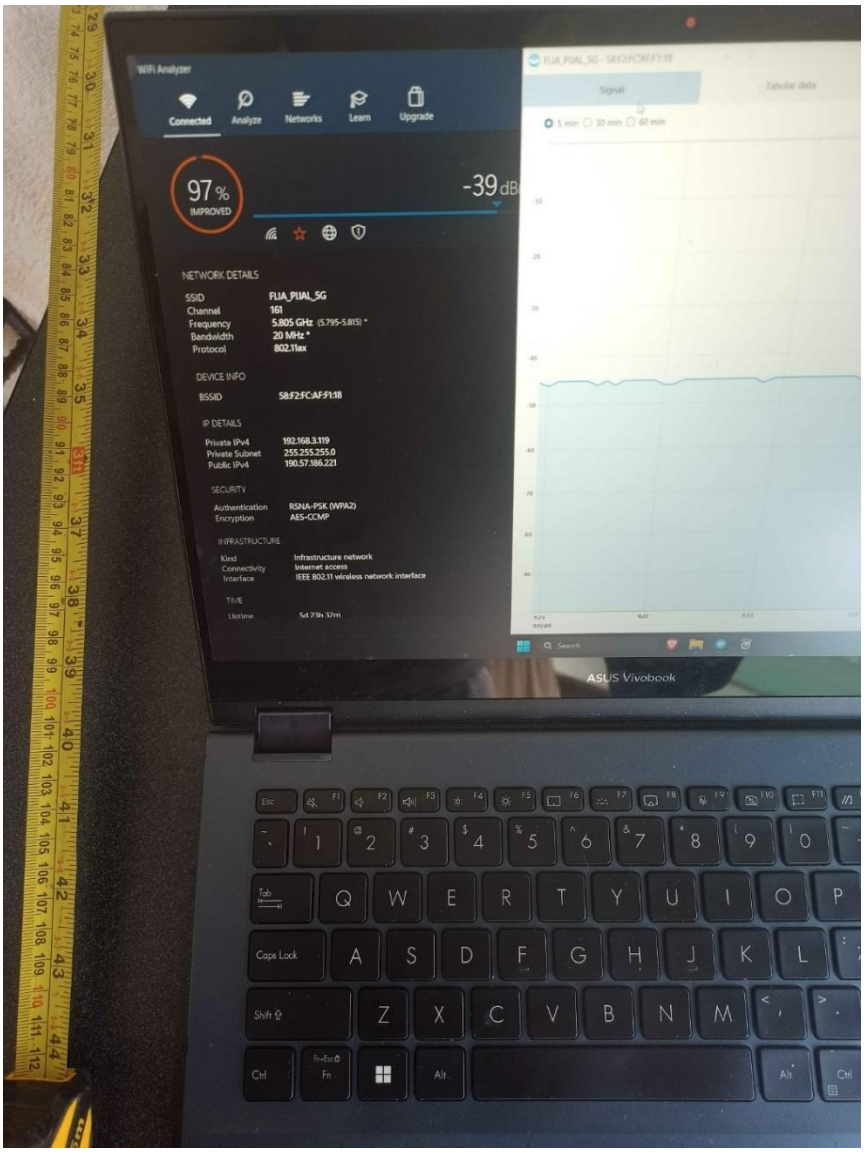
Al aplicar una media aritmética sobre este conjunto de datos, se obtiene un nivel de potencia promedio de -40,08 dBm. El procesamiento estadístico de este registro muestral es de vital importancia metodológica. Al tratarse de una medición en la proximidad inmediata de las antenas transmisoras (0 metros), este valor no representa una cifra de atenuación, sino que constituye el Nivel de Señal de Referencia Absoluta (P_{ref}) del sistema bajo condiciones ideales de campo cercano, mitigando el impacto de micro-fluctuaciones instantáneas. La consistencia de este promedio valida la capacidad de transmisión del equipo Huawei AX2 y establece la línea base matemática u origen coordenado. A partir de este umbral "cero", cualquier magnitud exacta de atenuación (ΔdBm) en los escenarios subsecuentes será cuantificada como pérdida por propagación geométrica al incrementar la distancia física.

B. Prueba de atenuación a un metro de distancia con el router WiFi 6.

Continuando con la metodología establecida, en la Figura 60 se procedió a desplazar el equipo receptor a una distancia radial exacta de un metro (1 m) respecto al arreglo de antenas del enrutador, manteniendo estrictamente la condición de LOS. Esta separación física introduce la primera variable empírica de propagación en el espacio libre, permitiendo cuantificar la pérdida por dispersión geométrica de la onda electromagnética en su primer frente de avance.

Figura 60

Medición a un metro de distancia con el router WiFi 6.



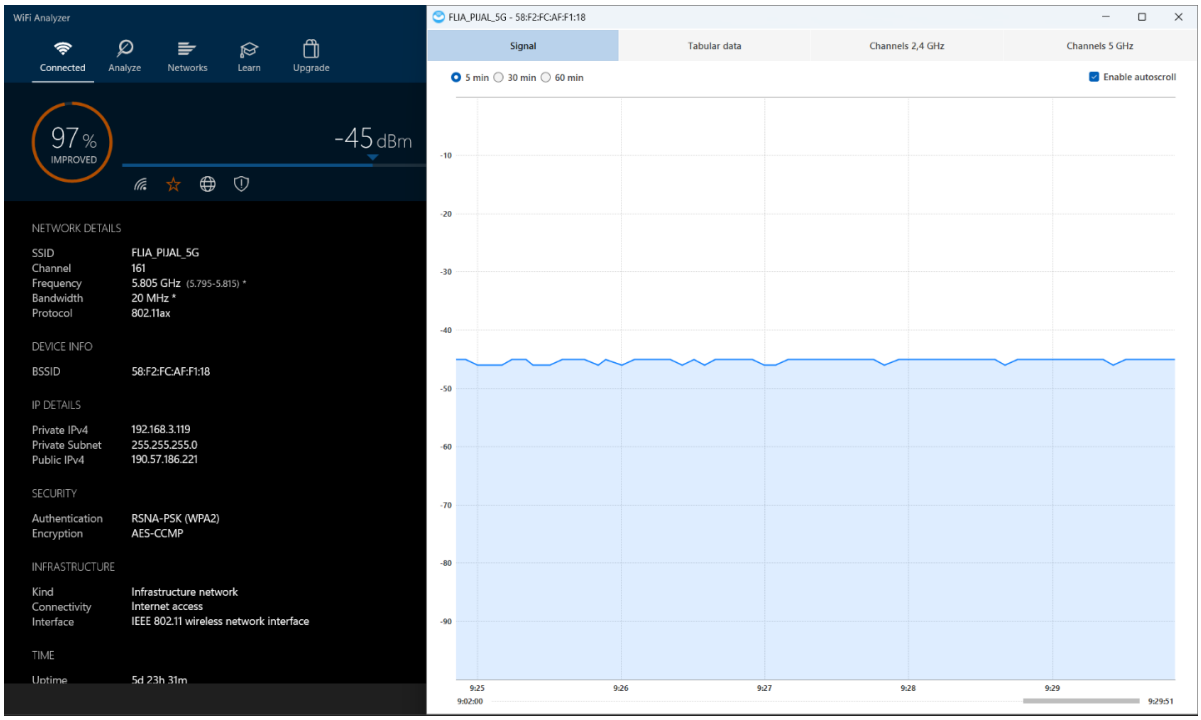
Nota: Vista del entorno de simulación a un metro de distancia del punto de acceso en LOS. Autoría propia.

Al alcanzar la marca de un metro, la lectura instantánea en la interfaz de diagnóstico refleja una caída esperada en la intensidad de la señal (RSSI). Este decremento es consistente con los principios físicos de propagación de radiofrecuencia, donde la mayor tasa de atenuación ocurre en las distancias iniciales debido a la expansión esférica del frente de onda al abandonar la zona de campo cercano del transmisor.

Para corroborar que el nuevo nivel de potencia no estuviera afectado por anomalías temporales o reflexiones parásitas provocadas por el desplazamiento, se ejecutó nuevamente la herramienta de monitoreo gráfico continuo. El registro temporal de la Figura 61 a esta nueva distancia es fundamental para validar la integridad y simetría del enlace bajo condiciones nominales de separación.

Figura 61

Gráfica de resultados de prueba a un metro de distancia.



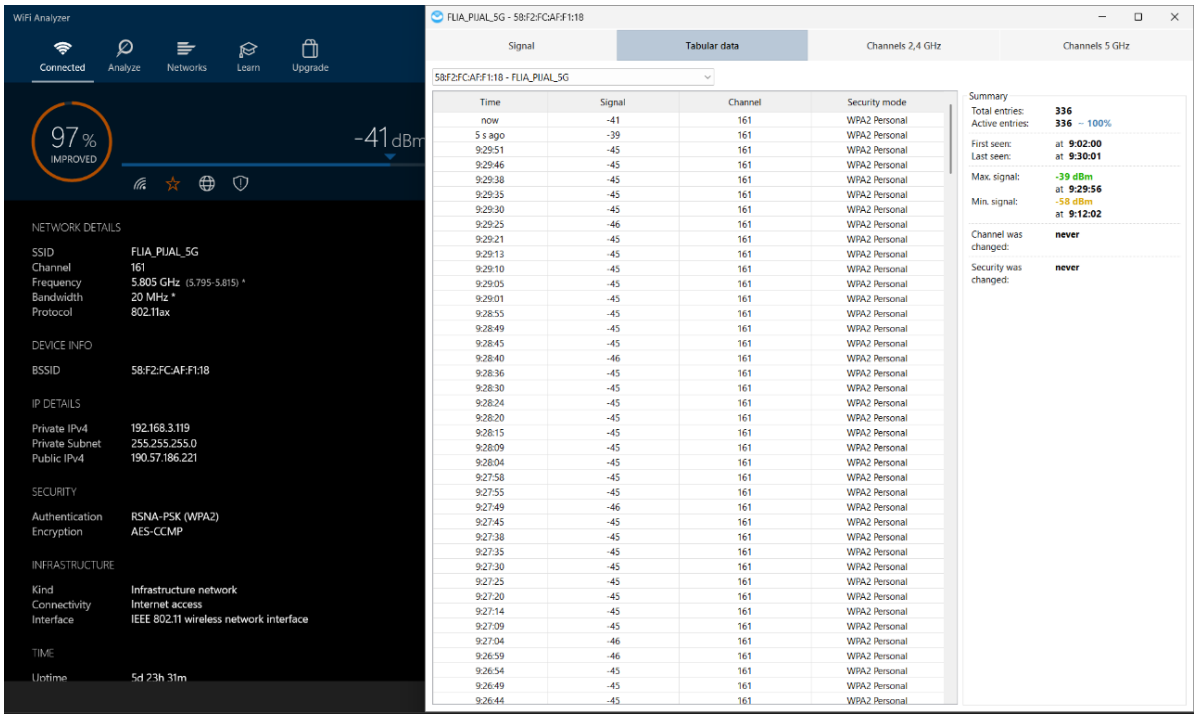
Nota: Captura de pantalla de la prueba a un metro en LOS. Autoría propia.

La gráfica temporal resultante demuestra que, si bien la amplitud general de la señal ha descendido respecto al punto de origen, el enlace de 5 GHz mantiene una trayectoria paralela al eje temporal y sumamente estable. La ausencia de fluctuaciones severas o picos de ruido confirma que la atenuación experimentada responde puramente a la pérdida por trayectoria en el espacio libre (FSPL) y no a factores de interferencia destructiva o multitrayectoria en el entorno de pruebas.

Con la estabilidad del enlace validada visualmente, se procedió a la extracción del registro tabular de eventos en la Figura 62 para su correspondiente análisis cuantitativo. La tabulación cronológica continua de los valores de RSSI a un metro de distancia proporciona la base de datos empírica necesaria para aislar el margen de error y calcular el decaimiento real promedio de la señal inalámbrica.

Figura 62

Tabla de resultados de prueba a un metro de distancia.



Nota: Captura de pantalla de la prueba a un metro en LOS. Autoría propia.

Con base en el registro histórico generado por la herramienta, se extrajo una ventana de muestreo representativa para su análisis detallado.

El análisis estadístico del registro muestral expuesto en la Tabla 20 arroja una media aritmética de -44,88 dBm. Al contrastar este valor con el promedio de referencia inicial de -24,21 dBm obtenido a los cero metros, se evidencia una atenuación drástica de -20,67 dBm. Esta pronunciada caída inicial de potencia corrobora la Ley de la Inversa del Cuadrado de la distancia, la cual rige la propagación de ondas de radiofrecuencia estableciendo que la densidad

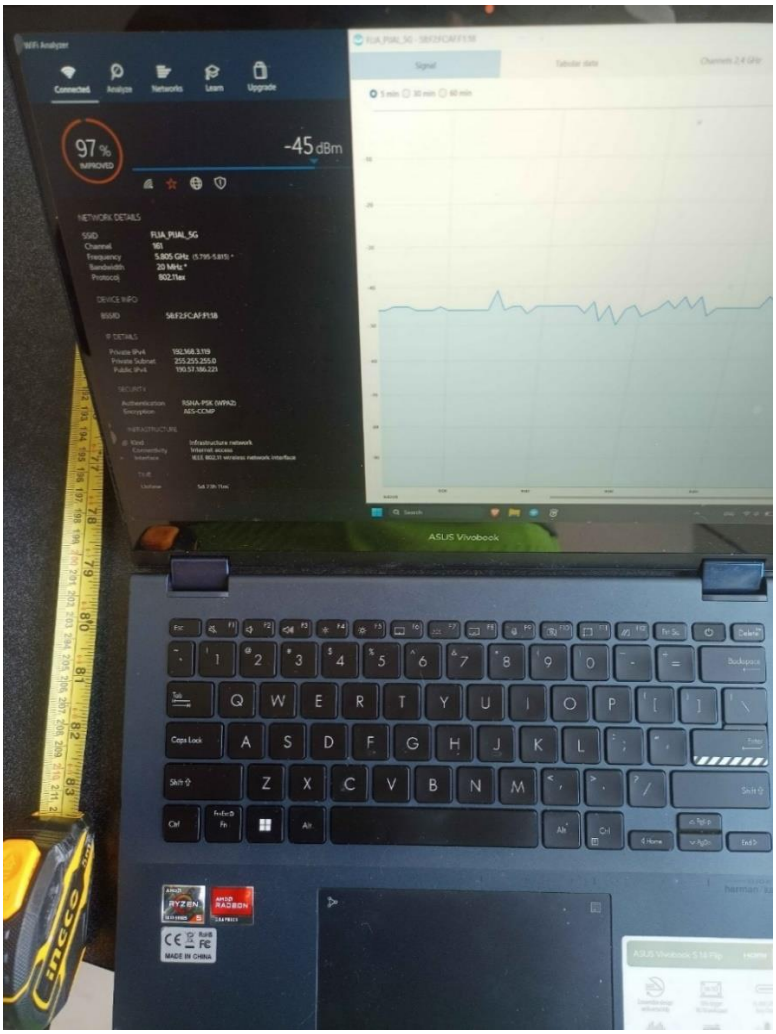
de potencia disminuye aceleradamente en los primeros tramos del trayecto antes de estabilizar su tasa de decaimiento espacial.

C. Prueba de atenuación a dos metros de distancia con el router WiFi 6.

Avanzando con la progresión geométrica del experimento, el equipo receptor fue reubicado a una distancia exacta de dos metros (2 m) desde el punto de origen. Esta medición busca observar el comportamiento de la onda electromagnética tras superar la zona de mayor dispersión inicial, permitiendo evaluar la tasa de decaimiento en la fase de propagación sostenida bajo condiciones de LOS.

Figura 63

Medición a dos metros de distancia con el router WiFi 6.



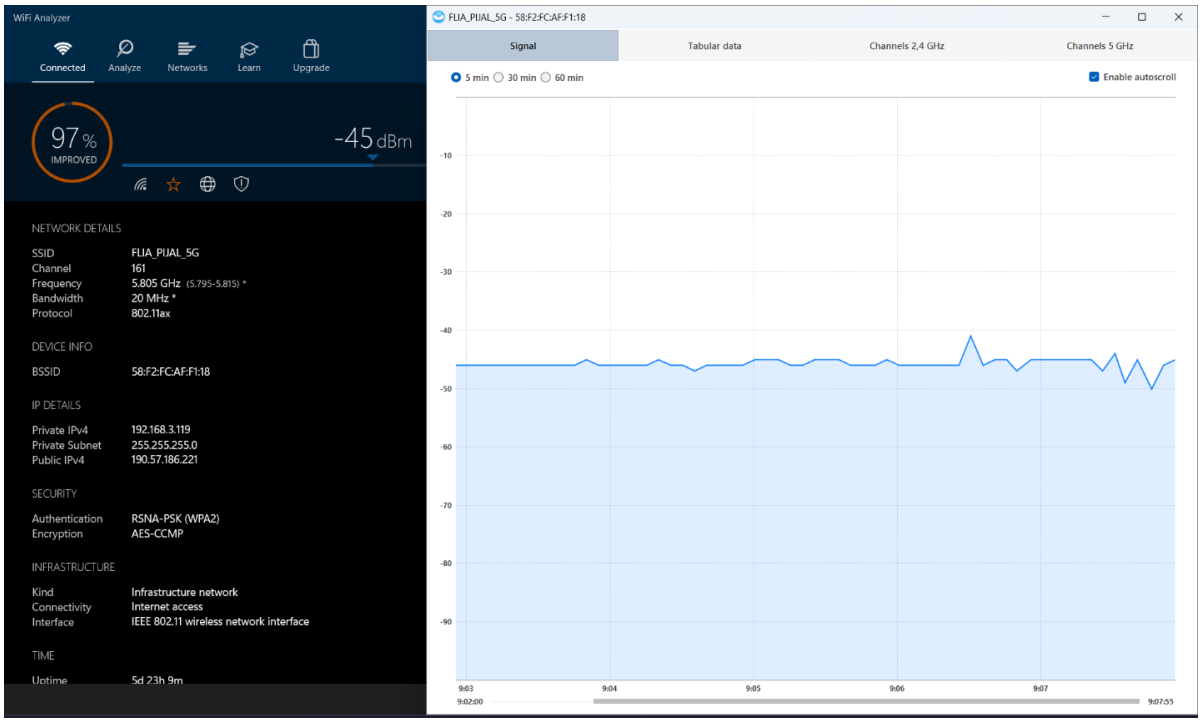
Nota: Vista del entorno de simulación a dos metros de distancia del punto de acceso en LOS. Autoría propia.

La captura fotográfica de la Figura 63 a los dos metros evidencia una lectura instantánea en la interfaz de diagnóstico que oscila en el rango de los -45 dBm a -46 dBm.

Para ratificar esta tendencia de estabilización y descartar variaciones inducidas por el movimiento del equipo, se ejecutó el módulo de graficación temporal continuo.

Figura 64

Gráfica de resultados de prueba a dos metros de distancia.



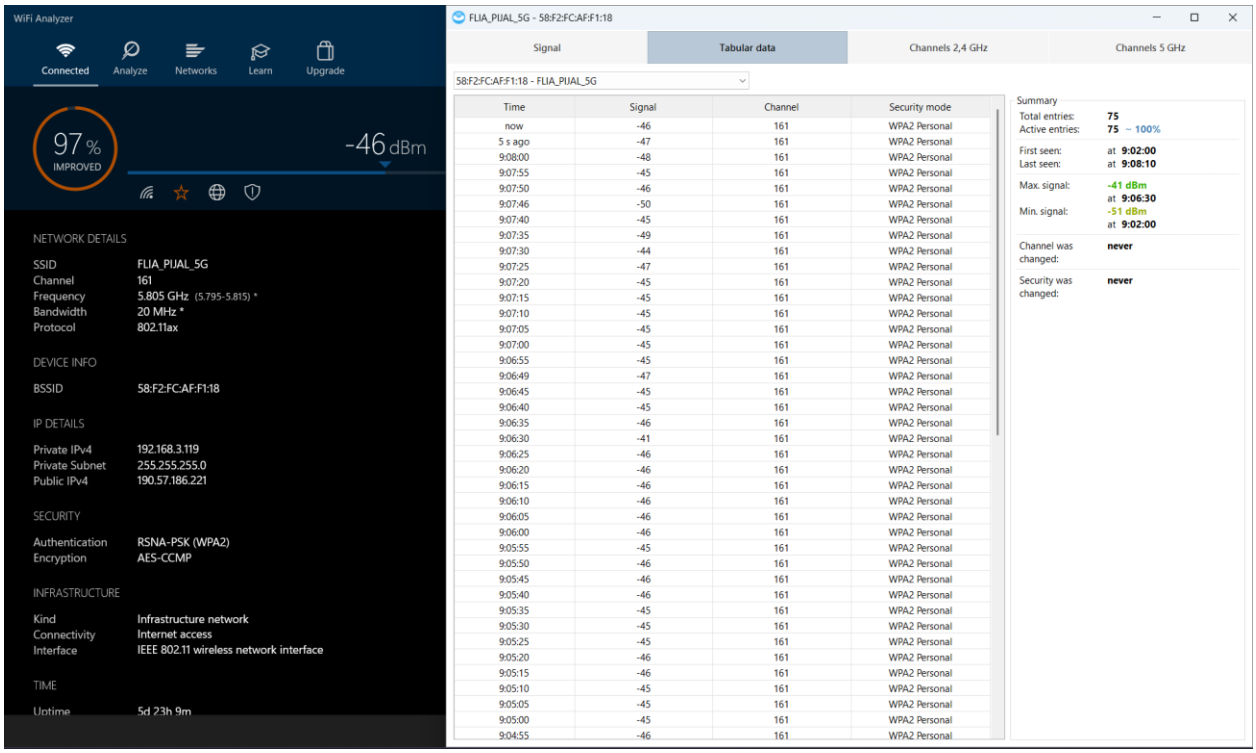
Nota: Captura de pantalla de la prueba a dos metros en LOS. Autoría propia.

La gráfica de la Figura 64 de monitoreo continuo ilustra una trayectoria predominantemente plana y constante. Aunque se aprecian ligeras ondulaciones—propias del ruido de fondo térmico o micro reflexiones ambientales en el entorno de pruebas—la amplitud general de la señal en la banda de 5 GHz mantiene su integridad estructural sin caídas significativas. Esta consistencia temporal descarta la presencia de atenuación anómala por obstáculos invisibles y valida la idoneidad del escenario para extraer la muestra estadística.

Una vez comprobada la estabilidad del enlace, se procedió a la exportación del registro tabular de eventos. Esta matriz numérica cronológica de la Figura 65 permite aislar cualquier pico de fluctuación y obtener el valor real de la intensidad de la señal a esta nueva distancia.

Figura 65

Tabla de resultados de prueba a dos metros de distancia.



Nota: Captura de pantalla de la prueba a dos metros en LOS. Autoría propia.

Con base en el registro histórico generado por la herramienta, se extrajo una ventana de muestreo representativa para su análisis detallado.

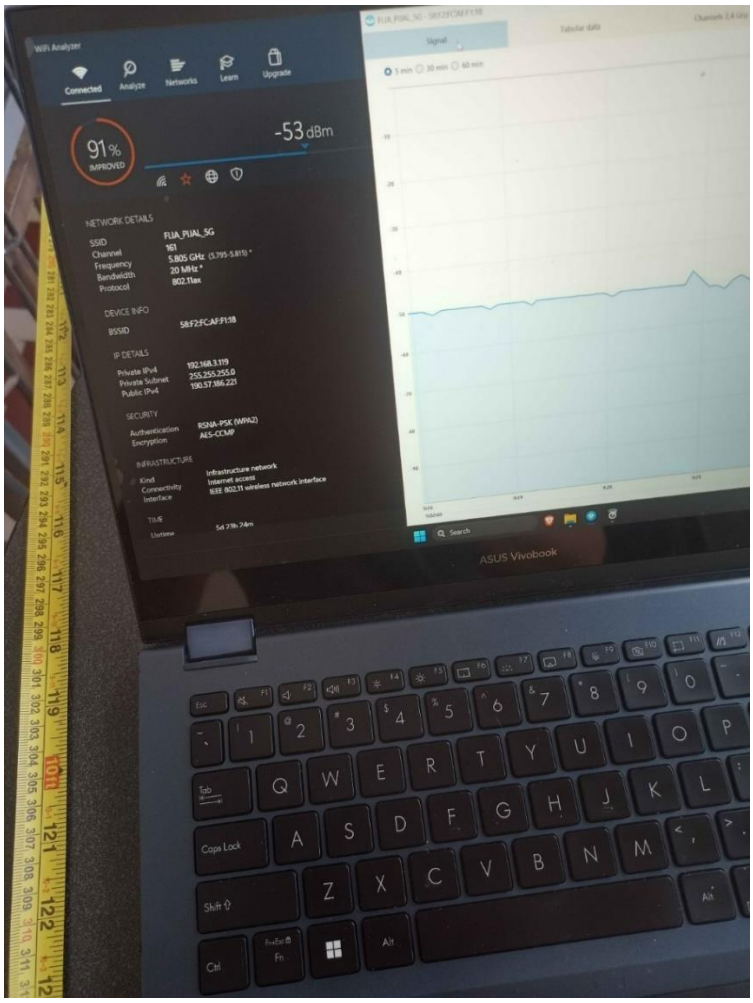
El procesamiento estadístico de la ventana de datos tabulados en la Tabla 21 resulta en una media aritmética de -47,50 dBm. Al contrastar este promedio con la medición obtenida en el metro anterior (-44,88 dBm), se registra una variación de atenuación de apenas -2,62 dBm. Este delta tan reducido es un indicador empírico fundamental para el estudio: demuestra físicamente la estabilización de la curva de propagación. Mientras que en el primer metro de separación la onda sufrió una drástica pérdida por dispersión geométrica de -20,67 dBm respecto al origen, en el trayecto hacia el segundo metro la energía espacial ya se ha distribuido ampliamente, reduciendo significativamente la tasa de decaimiento por distancia.

D. Prueba de atenuación a tres metros de distancia con el router WiFi 6.

Para finalizar la caracterización del decaimiento espacial en la zona de pruebas, el equipo de medición fue posicionado a una distancia radial de tres metros (3 m) respecto al punto de origen, visto en la Figura 66. Esta última captura en LOS permite consolidar la curva empírica de atenuación y establecer el límite de referencia del campo libre antes de introducir obstáculos físicos en las fases posteriores del estudio.

Figura 66

Medición a tres metros de distancia con el router WiFi 6.



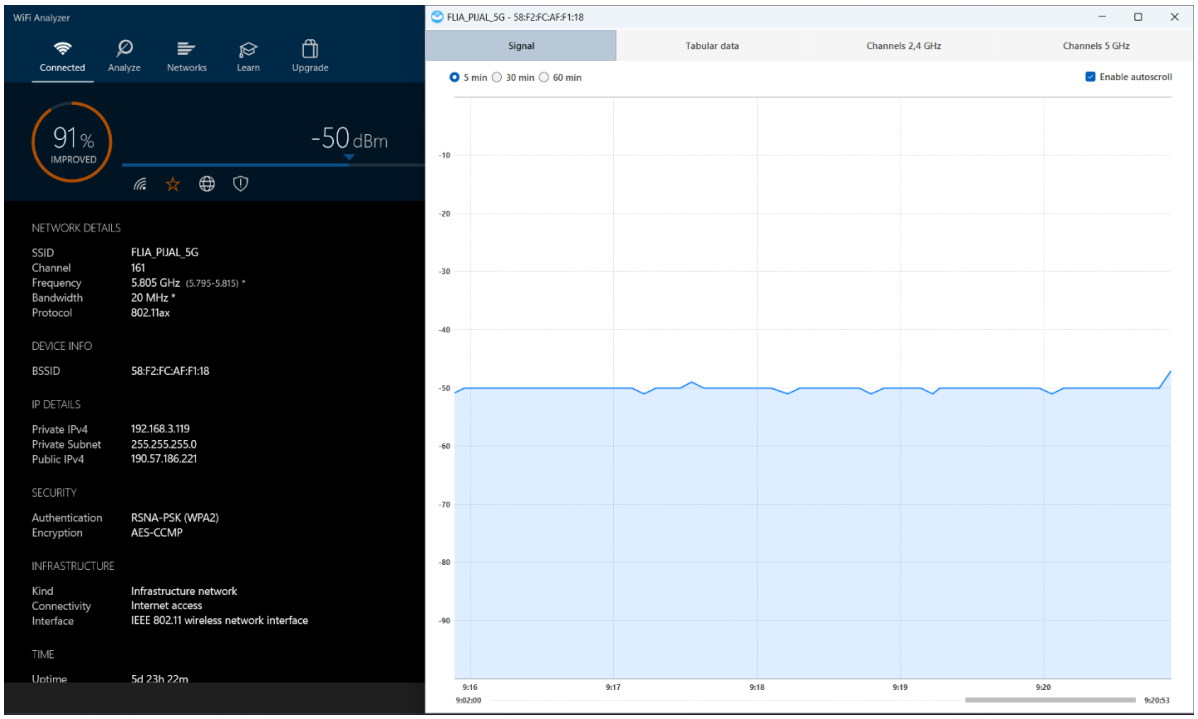
Nota: *Vista del entorno de simulación a tres metros de distancia del punto de acceso en LOS. Autoría propia.*

La inspección visual instantánea a los tres metros de separación revela una caída adicional en la intensidad de la señal, situando el RSSI en el umbral de los -50 dBm a -53 dBm.

Para evaluar si este descenso corresponde a una atenuación nominal sostenida o a una fluctuación destructiva momentánea originada por reflexiones de contorno (fenómenos de multitrayectoria comunes en ambientes interiores), se recurrió nuevamente al análisis de la estabilidad temporal en la Figura 67.

Figura 67

Gráfica de resultados de prueba a tres metros de distancia.

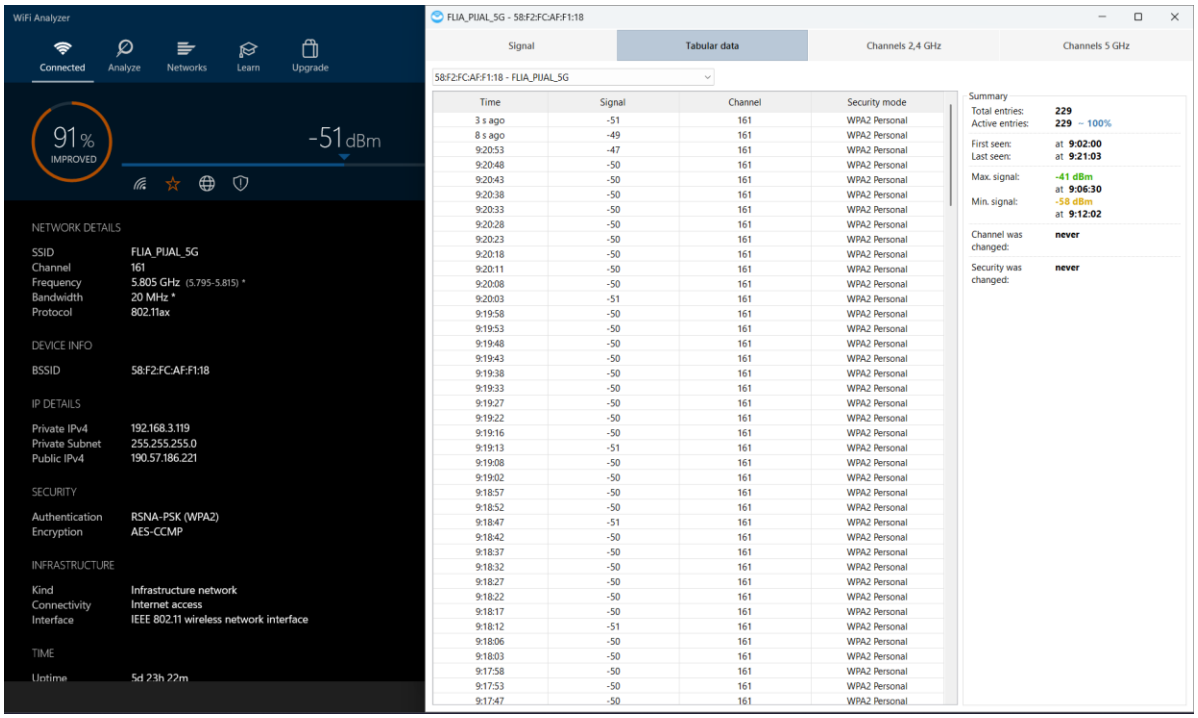


Nota: Captura de pantalla de la prueba a tres metros en LOS. Autoría propia.

El trazado temporal continuo corrobora que la señal ha alcanzado un nuevo piso de potencia geométricamente estable. La ausencia de variaciones erráticas severas en la amplitud confirma que el enlace inalámbrico 802.11ax mantiene una comunicación robusta, permitiendo la recolección de una muestra estadística representativa y libre de desvanecimientos anómalos.

Figura 68

Tabla de resultados de prueba a tres metros de distancia.



Nota: Captura de pantalla de la prueba a tres metros en LOS. Autoría propia.

Con base en el registro histórico generado por la herramienta de la Figura 68, se extrajo una ventana de muestreo representativa para su análisis detallado, cuyos valores se exponen a continuación en la Tabla 22.

El procesamiento estadístico de la matriz de datos correspondiente a este último tramo define una media aritmética de -50,05 dBm. Con esta métrica, se completa el perfil de propagación del enrutador Huawei AX2 en un entorno libre de obstáculos. Para comprender el comportamiento macroscópico de la onda electromagnética a lo largo de todo el trayecto de prueba.

Tabla 6

Resultados de las mediciones de potencia y atenuación por distancia (LOS).

Distancia al router (LOS)	Promedio de potencia (dBm)	Variación de atenuación (dBm)

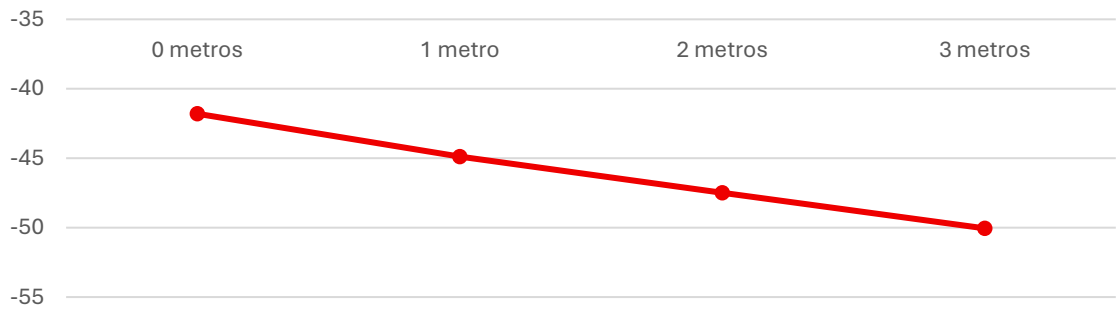
0 metros	-40,08 dBm	-
1 metro	-44,88 dBm	-4,8 dBm
2 metros	-47,50 dBm	-2,62 dBm
3 metros	-50,05 dBm	-2,55 dBm

Nota: Se muestra todos los resultados obtenidos, junto a la variación de atenuación que hay entre los resultados de las pruebas de atenuación por distancia (LOS). Autoría propia.

El análisis de las variaciones detalladas en la Tabla 6 revela empíricamente la naturaleza física de la radiopropagación en la banda de 5 GHz. La pérdida más crítica y severa ocurre invariablemente en el primer metro de separación, con un desplome drástico de -4,8 dBm. Este fenómeno obedece a la rápida expansión volumétrica del frente de onda al abandonar la zona de campo cercano, rigiéndose estrictamente por la Ley de la Inversa del Cuadrado.

Figura 69

Graficación de los resultados de las mediciones de potencia y atenuación.



Nota: Se realiza la graficación de los resultados obtenidos en las mediciones de potencia y atenuación de la Tabla 6. Autoría propia.

A medida que la distancia aumenta (de 1 a 2 metros, y de 2 a 3 metros), la tasa de atenuación espacial se estabiliza de forma logarítmica, sumando pérdidas progresivamente menores de -2,62 dBm y -2,55 dBm, como se ve en la Figura 69.

3.7.3. *Atenuación por obstáculos inmuebles*

A. Pared de adobe (50 cm)

Para complementar el modelo de propagación en LOS, se procedió a evaluar el impacto de la absorción, refracción y reflexión electromagnética inducida por los diversos materiales constructivos presentes en el entorno residencial. Esta fase experimental es de vital importancia para cuantificar la pérdida por penetración cuando el frente de onda debe atravesar obstáculos físicos. El primer escenario de prueba evalúa la atenuación generada por una estructura arquitectónica de alta densidad: una pared de adobe. Previo a la captura de las métricas de red, se verificó el espesor exacto de la barrera, ya que la profundidad longitudinal del material es una variable física determinante en el nivel de decaimiento de la energía radiada.

Figura 70

Medición de pared de adobe de 50cm.



Nota: Vista del punto inicial de referencia para la prueba de atenuación por pared de adobe de 50cm. Autoría propia.

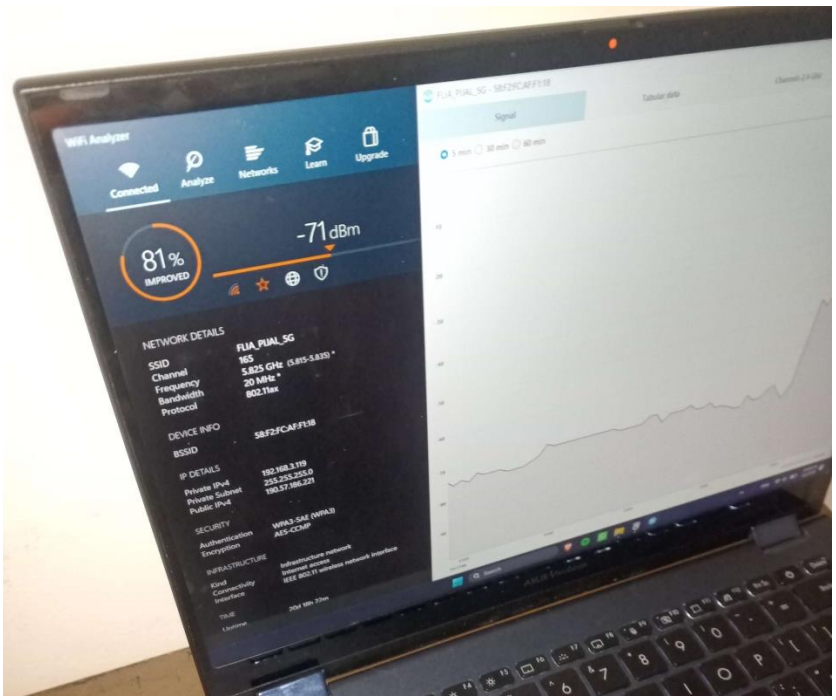
Como se documenta en la Figura 70, la cinta métrica confirma un grosor físico de 50 centímetros para el muro de adobe. Una vez establecido y documentado el espesor del obstáculo, el equipo receptor fue reubicado inmediatamente en la cara opuesta del muro, manteniendo una estricta alineación perpendicular respecto a las antenas del enrutador

transmisor. Esta posición garantiza que el registro del RSSI capture fielmente el grado de atenuación directa tras el proceso de penetración estructural.

Establecida la caracterización geométrica de la barrera de construcción, se procedió a la ejecución del software de diagnóstico en la estación receptora. Esta disposición experimental permite capturar de forma directa el impacto electromagnético que experimenta el frente de onda al atravesar un material de alta densidad y gran espesor, registrando las pérdidas asociadas a los fenómenos de absorción y dispersión dentro de la estructura.

Figura 71

Medición de atenuación de pared de adobe.



Nota: Vista del entorno de simulación junto a la pared de adobe. Autoría propia.

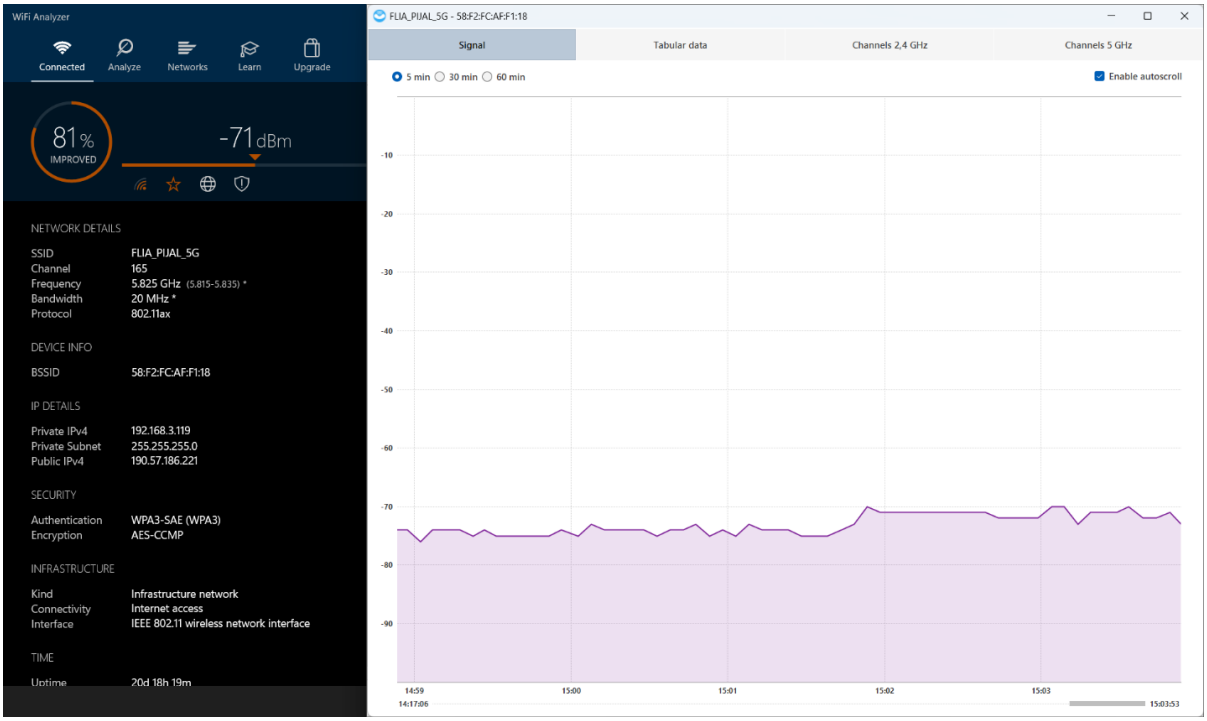
La interfaz de monitoreo ilustrada en la Figura 71 en la configuración experimental evidencia una lectura de potencia instantánea de -71 dBm en la frecuencia de 5.825 GHz (Canal 165) bajo el estándar 802.11ax. Este valor inicial refleja un detrimento drástico en la amplitud de la señal al compararlo con los niveles registrados en la fase de línea de vista a distancias equivalentes. La severa degradación observada se atribuye directamente a las propiedades

dieléctricas y la composición masiva del adobe de 50 cm, cuyo coeficiente de atenuación específico bloquea gran parte de la energía electromagnética de alta frecuencia. Con el fin de verificar si esta lectura corresponde a un estado estacionario estable o si presenta fluctuaciones severas causadas por el entorno, se habilitó el registro temporal continuo para evaluar el comportamiento dinámico del enlace inalámbrico.

Para monitorear el comportamiento dinámico de la señal bajo este nivel de atenuación, se procedió a capturar la trayectoria de propagación temporal en la Figura 72. Esta representación gráfica es esencial para identificar si el obstáculo arquitectónico genera caídas intermitentes de conexión o si, por el contrario, ejerce un perfil de bloqueo constante sobre la energía de radiofrecuencia.

Figura 72

Gráfica de resultados de prueba con pared de adobe.



Nota: Captura de pantalla de la prueba de atenuación de la pared. Autoría propia.

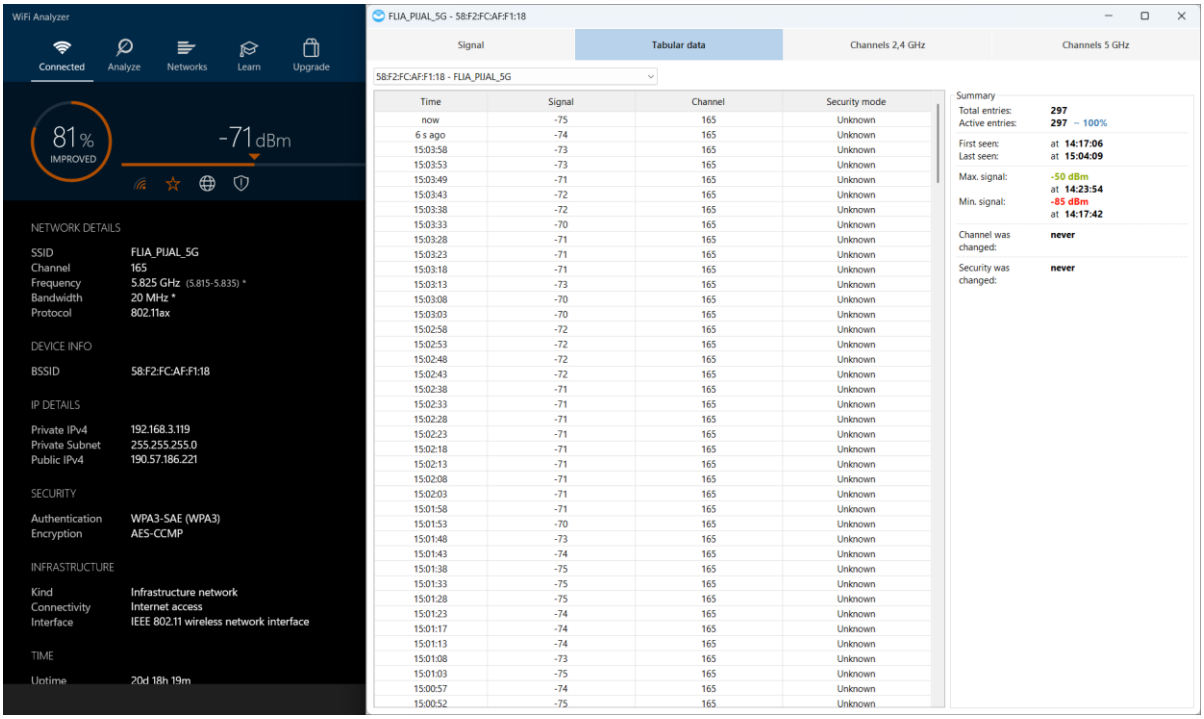
El trazado temporal de la gráfica expone un perfil de rendimiento continuo, pero con ligeras ondulaciones y rizados que oscilan permanentemente en el rango de los -70 dBm a -75

dBm. Este fenómeno de micro fluctuación es inherente a la naturaleza no homogénea del adobe; al ser un bloque constructivo compuesto por tierra, arcilla y elementos aglutinantes que varían en densidad, la onda electromagnética experimenta refracciones irregulares al intentar penetrar sus 50 cm de espesor. Sin embargo, al no evidenciarse cortes abruptos de comunicación, se constata que el equipo receptor se encuentra en un estado de atenuación estacionaria. Comprobada esta continuidad del enlace, se procedió a la exportación del registro de eventos cronológicos para cuantificar la pérdida real mediante un promedio aritmético.

Una vez corroborada la estabilidad del comportamiento de la señal a través del muro, se procedió a la exportación de la matriz de datos cronológicos capturados por la herramienta de diagnóstico en la Figura 73. Esta recolección permite aislar las micro fluctuaciones del material y realizar un análisis estadístico preciso del decaimiento de potencia.

Figura 73

Tabla de resultados de prueba con pared de adobe.



Nota: Captura de pantalla de la prueba de atenuación de la pared. Autoría propia.

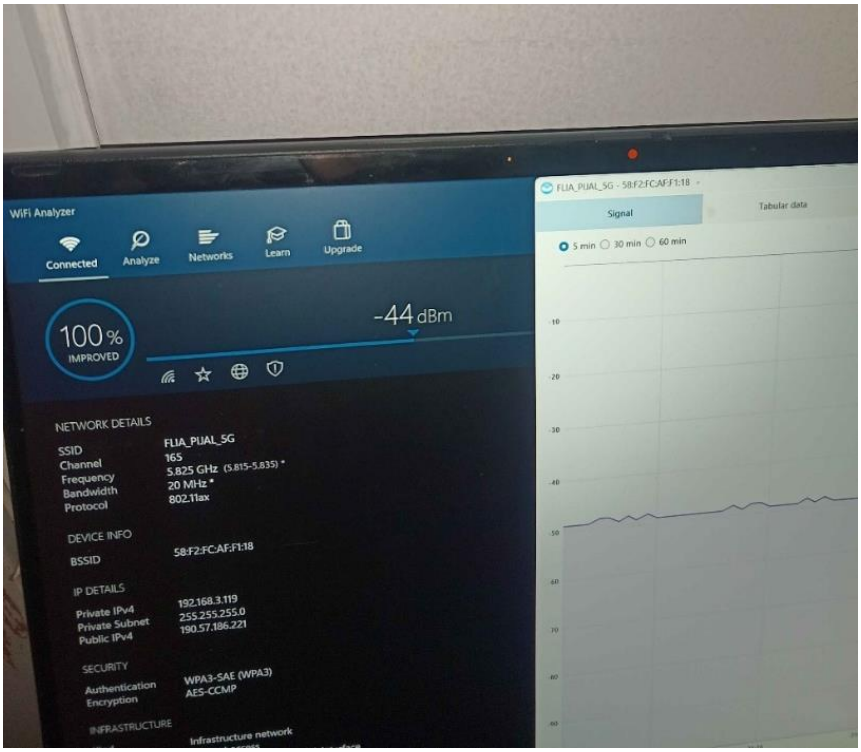
El procesamiento estadístico del conjunto de muestras extraídas en esta prueba arroja un nivel de potencia promedio de -72,28 dBm en la Tabla 23. Al contrastar esta métrica con el Nivel de Señal de Referencia Absoluta (P_{ref}) de -40,08 dBm obtenido a 0 metros en espacio libre, se evidencia una pérdida por penetración sumamente severa.

B. Pared de bloque (20 cm)

Continuando con la evaluación de atenuación estructural, el equipo receptor fue trasladado hacia un segundo escenario de medición, separado del enrutador transmisor por una pared de bloque de concreto. A diferencia de la prueba anterior, este material presenta un grosor estándar de 20 cm y una composición interna típicamente alveolar (núcleo hueco). Esta configuración arquitectónica es una de las más comunes en la construcción residencial contemporánea, por lo que medir su impacto electromagnético es fundamental para evaluar el rendimiento típico de la banda de 5 GHz en interiores.

Figura 74

Medición de atenuación de pared de bloque.

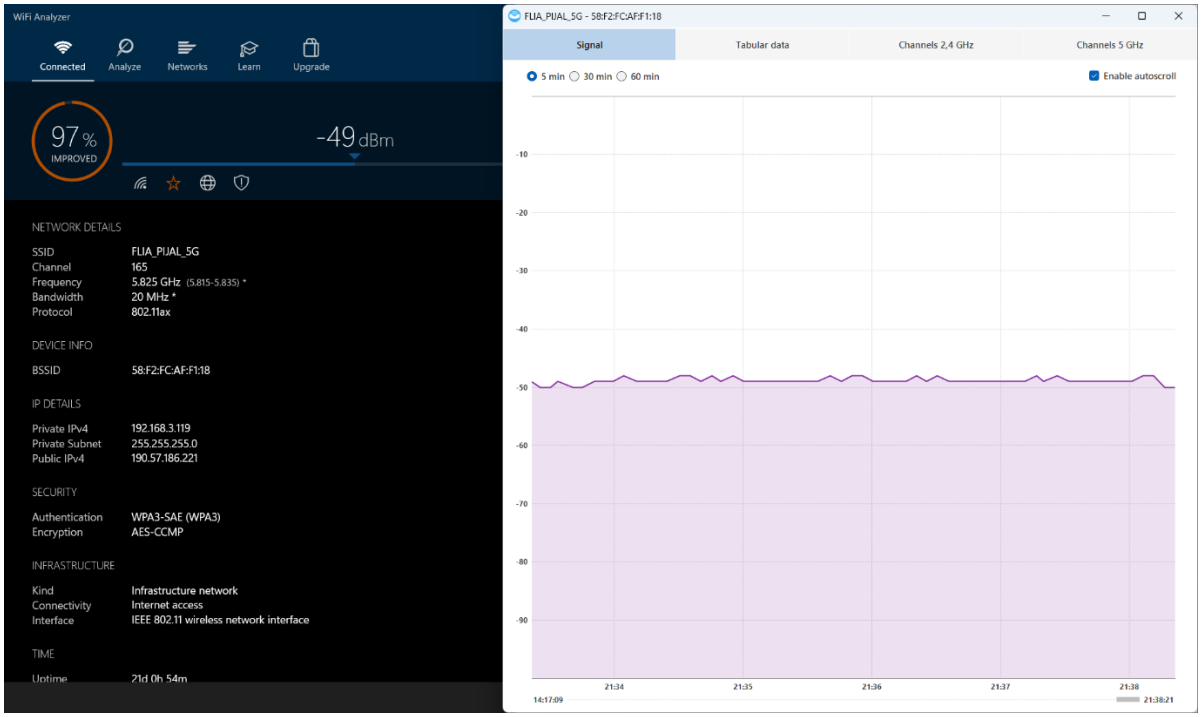


Nota: Vista del entorno de simulación junto a la pared de bloque. Autoría propia.

En este nuevo entorno de prueba de la Figura 74, la captura instantánea de la interfaz de diagnóstico refleja una intensidad de señal inicial con un rango menos severo que el observado en la mampostería de adobe. Para asegurar que este nivel de potencia corresponde al estado estacionario de penetración del material y no a un efecto de difracción temporal por los bordes de la estructura, se procedió a registrar el comportamiento continuo del enlace electromagnético.

Figura 75

Gráfica de resultados de prueba con pared de bloque.



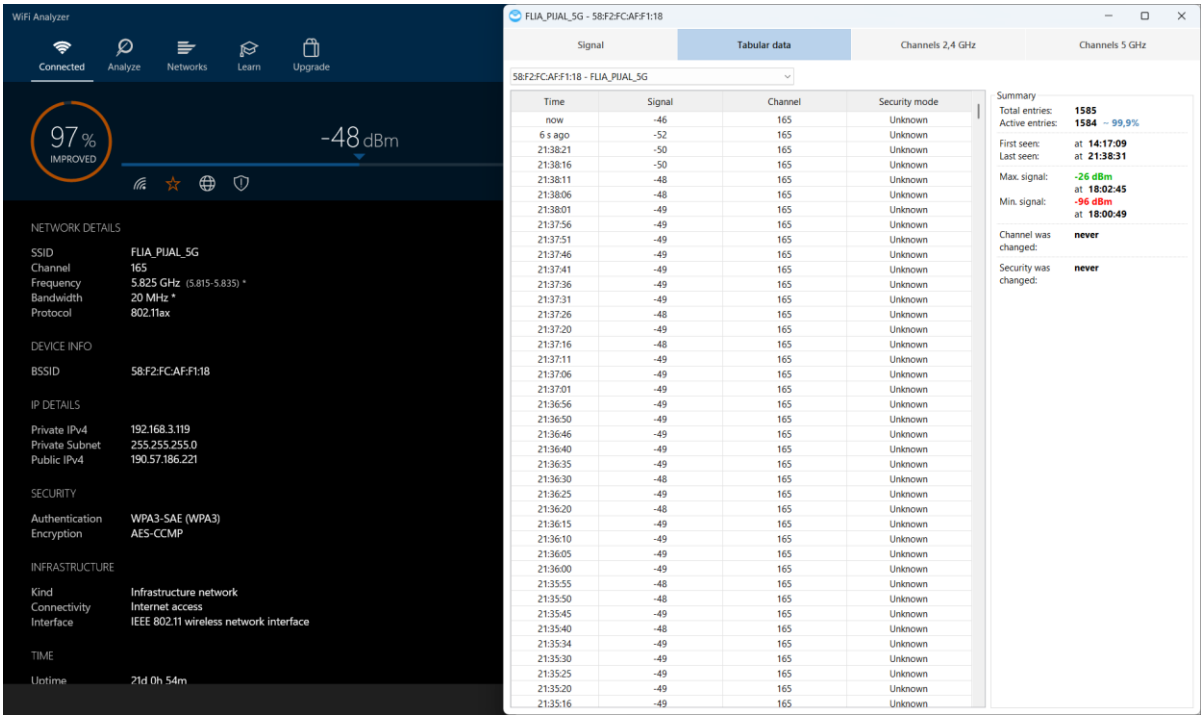
Nota: Captura de pantalla de la prueba de atenuación de la pared de bloque. Autoría propia.

El trazado de la gráfica temporal de la Figura 75 revela un nivel de propagación sumamente estable y lineal, con fluctuaciones mínimas. Las celdas de aire dentro de la pared de bloque y su menor espesor relativo (20 cm) generan un índice de refracción distinto al del adobe masivo, permitiendo un paso más uniforme del frente de onda de 5.825 GHz. Verificada

la ausencia de cortes de comunicación, se exportó la matriz cronológica de eventos en la Figura 76 para aislar el margen de error y calcular matemáticamente la pérdida real por penetración.

Figura 76

Tabla de resultados de prueba con pared de bloque.



Nota: Captura de pantalla de la prueba de atenuación de la pared de bloque. Autoría propia.

El procesamiento estadístico del conjunto de muestras correspondientes a este escenario arroja un nivel de potencia promedio de -48,82 dBm en la Tabla 24. Para obtener la magnitud exacta de atenuación provocada exclusivamente por la barrera física, se contrasta este valor con el nuevo Nivel de Señal de Referencia (P_{ref}) calibrado a 0 metros de distancia para este entorno de prueba, el cual se sitúa en -40,08 dBm.

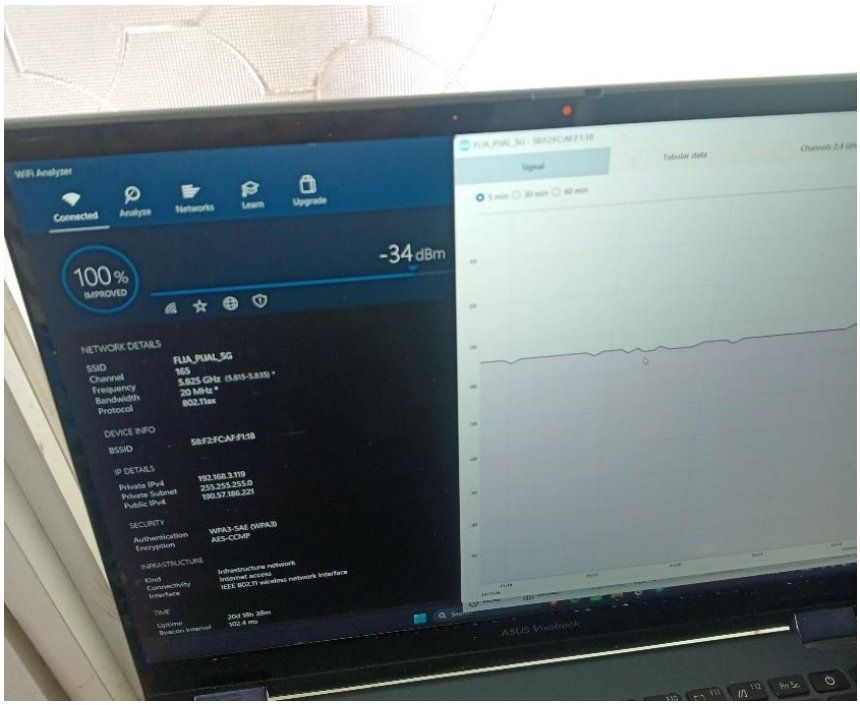
C. Ventana de vidrio (4 mm)

Avanzando con el análisis de atenuación por obstáculos inmuebles, el equipo de medición se posicionó frente a una separación acristalada correspondiente a una ventana de vidrio estándar con un espesor de 4 mm. A diferencia de los materiales de mampostería previamente

analizados, el vidrio posee una estructura molecular y propiedades dieléctricas completamente distintas. Esta prueba tiene como objetivo determinar empíricamente si este tipo de superficies arquitectónicas transparentes a la luz visible representan una barrera electromagnética significativa para las longitudes de onda cortas de la banda de 5 GHz.

Figura 77

Medición de atenuación de ventana de vidrio.

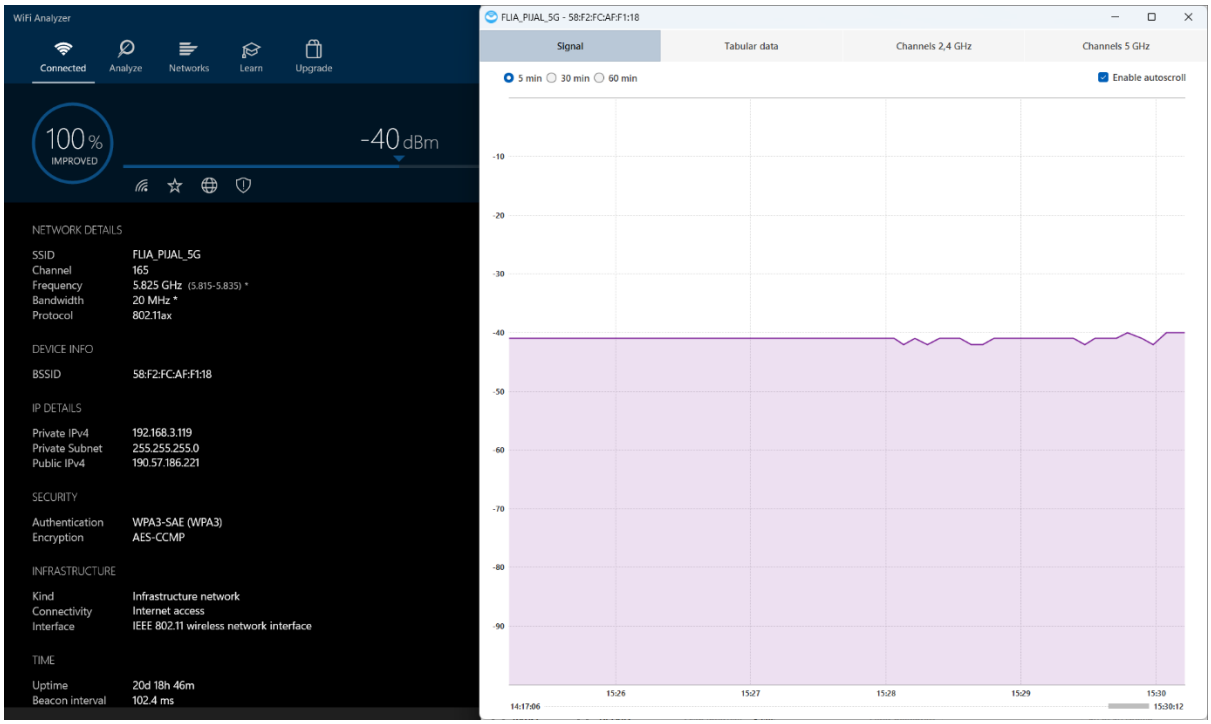


Nota: Vista del entorno de simulación junto a la ventana de vidrio de 4mm. Autoría propia.

La lectura instantánea capturada en el entorno de prueba de la Figura 77 refleja un valor de intensidad de señal sumamente favorable, muy cercano a los niveles de transmisión de la línea base. A primera vista, el vidrio liso y delgado opone una resistencia mínima a la propagación del frente de onda. No obstante, dado que las superficies de vidrio pueden generar fenómenos de reflexión especular (multipath) que desestabilicen la comunicación espacial, se habilitó el registro temporal para validar la integridad y estabilidad continua del enlace.

Figura 78

Gráfica de resultados de prueba con ventana de vidrio.

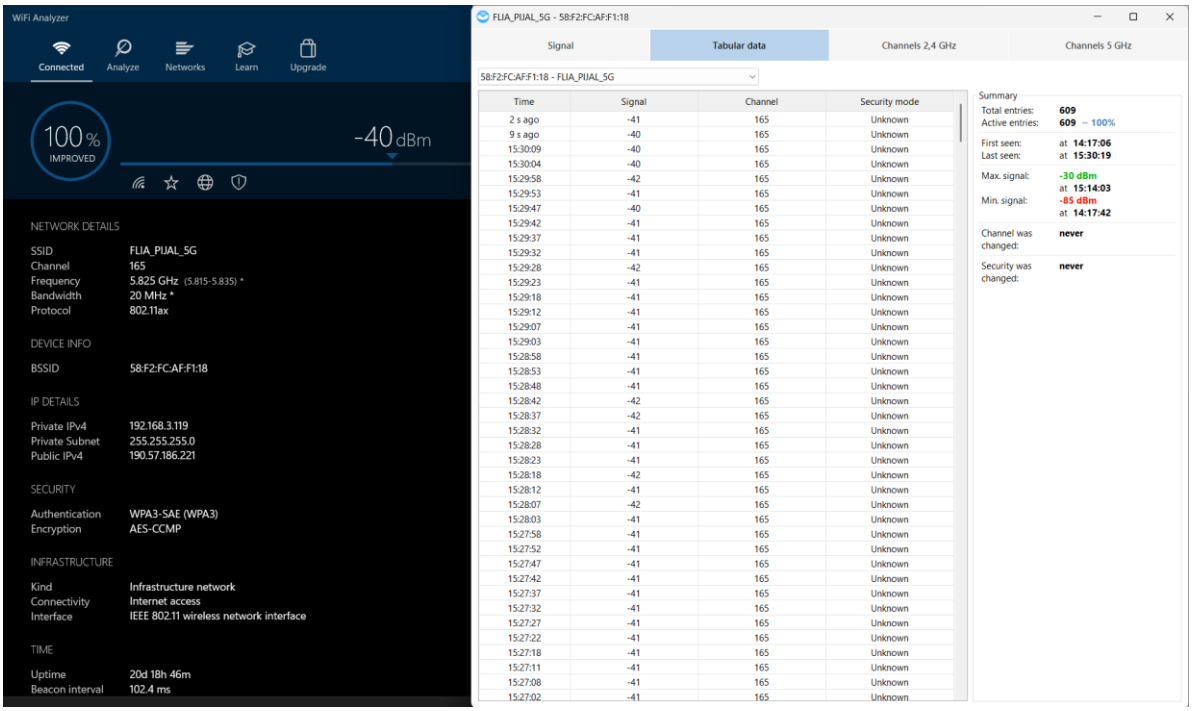


Nota: Captura de pantalla de la prueba de atenuación de la ventana. Autoría propia.

El registro gráfico temporal de la Figura 78 corrobora la alta permeabilidad del material frente a la señal de 5.825 GHz. La trayectoria de rendimiento se mantiene excepcionalmente plana, lineal y estable a lo largo del tiempo de medición, demostrando la ausencia de bloqueos térmicos o difracciones destructivas. Con la estabilidad del enlace asegurada, se procedió a la captura de los eventos tabulados para su cálculo estadístico.

Figura 79

Tabla de resultados de prueba con ventana de vidrio.



Nota: Captura de pantalla de la prueba de atenuación de la ventana. Autoría propia.

El análisis estadístico en la Figura 79 extraído de la ventana de muestreo arroja un nivel de potencia promedio de -41,05 dBm. Al contrastar este valor empírico con el Nivel de Señal de Referencia (P_{ref}) ajustado a -40,08 dBm, se determina una pérdida por penetración casi nula de apenas -0,97 dBm.

Esta variación marginal (inferior a un decibelio) demuestra físicamente que el vidrio estándar no tratado de 4 mm es prácticamente transparente a las frecuencias del estándar 802.11ax, permitiendo una transmisión casi perfecta.

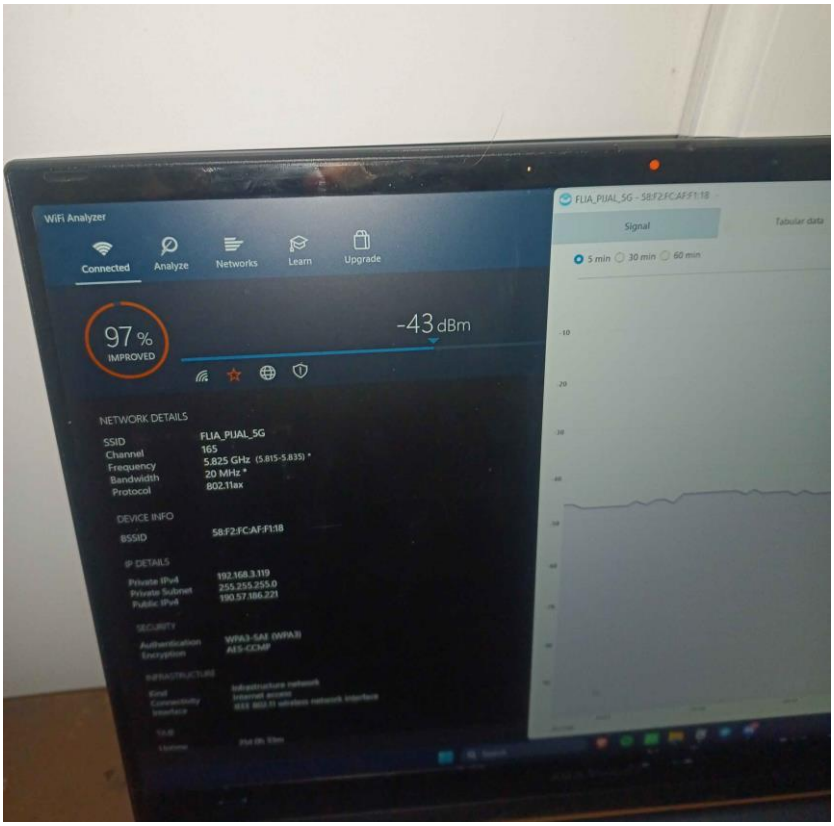
D. Pared o puerta de madera (3 cm)

La última fase de evaluación de atenuación estructural se centró en particiones interiores ligeras, específicamente una pared o puerta de madera con un espesor de 3 cm. Aunque su densidad es significativamente menor que la del concreto o la tierra, la naturaleza fibrosa y porosa de la madera, combinada con las placas de yeso, interactúa de forma distinta con las

ondas electromagnéticas, por lo que es necesario cuantificar su impacto sobre la banda de 5 GHz.

Figura 80

Medición de atenuación de puerta de madera.

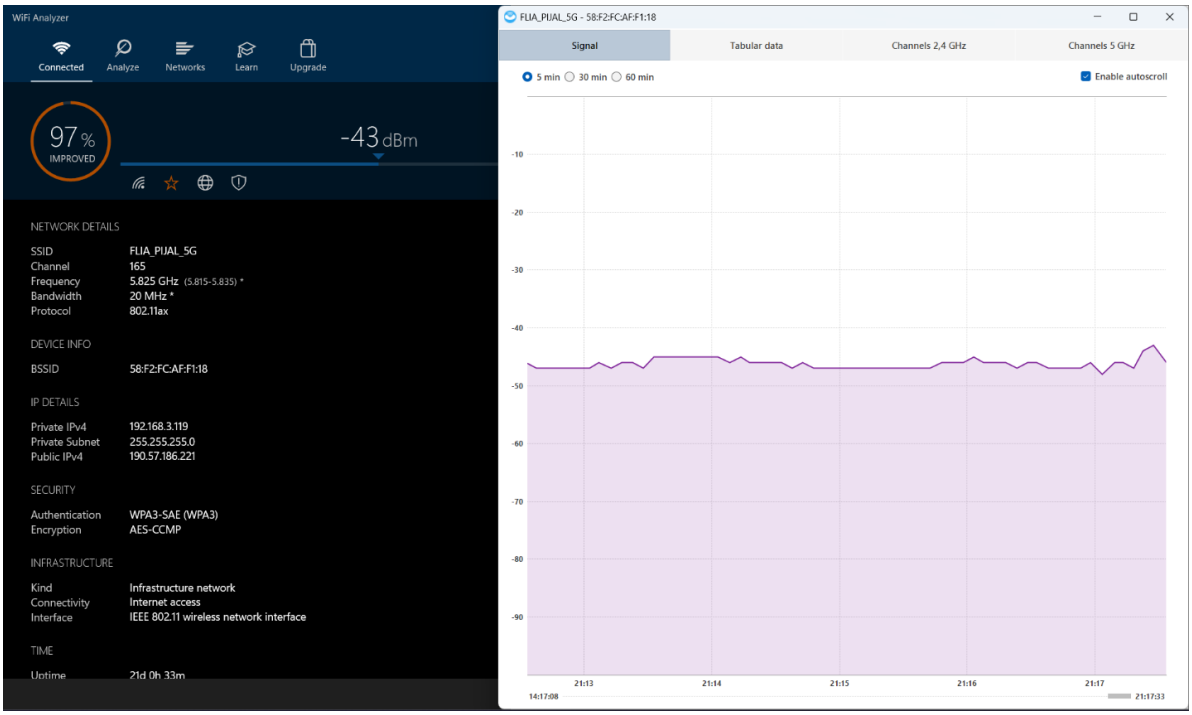


Nota: Vista del entorno de simulación junto a la puerta de madera. Autoría propia.

La lectura inicial en la Figura 80 a través de esta barrera ligera arroja una métrica de atenuación moderada. Para descartar que la porosidad del material o los posibles montantes metálicos en el interior de la pared generen fenómenos de dispersión que afecten la calidad de la señal, se procedió a registrar el comportamiento dinámico del enlace en el tiempo.

Figura 81

Gráfica de resultados de prueba con pared o puerta de madera.

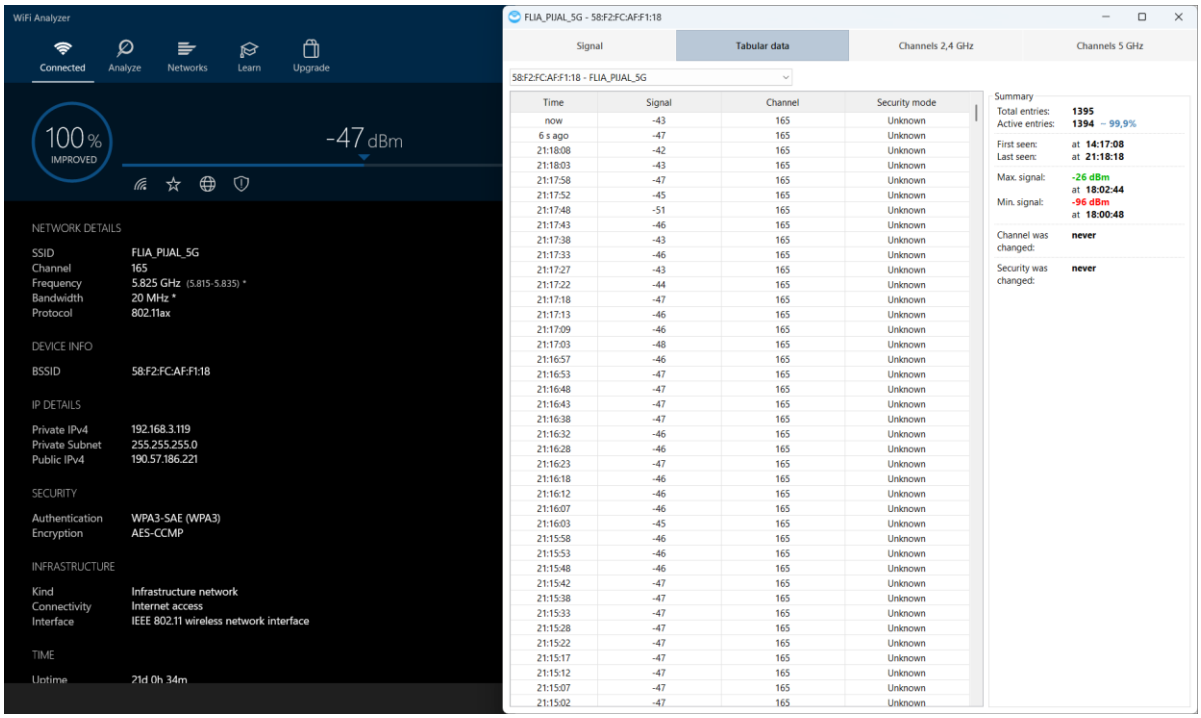


Nota: Captura de pantalla de la prueba de atenuación de la puerta. Autoría propia.

La gráfica de rendimiento temporal de la Figura 81 demuestra una propagación sostenida, con oscilaciones naturales pero sin caídas críticas que comprometan la comunicación. Al confirmar un estado estacionario de penetración, se exportaron los datos tabulados para su evaluación cuantitativa.

Figura 82

Tabla de resultados de prueba con pared o puerta de madera.



Nota: Captura de pantalla de la prueba de atenuación de la puerta. Autoría propia.

El cálculo estadístico de las muestras obtenidas a través de la pared o puerta de madera de la Figura 82 y la Tabla 26 establece un promedio de potencia de -46,08 dBm. Al contrastar este resultado con el Nivel de Señal de Referencia (P_{ref}) de -40,08 dBm, se determina una atenuación estructural directa de -6 dBm.

Aunque un muro ligero de 3 cm es mucho menos restrictivo que el concreto o el adobe, una pérdida de 6 decibelios significa físicamente que la señal ha perdido aproximadamente el 75% de su potencia original al cruzar una sola pared. En un entorno residencial típico, donde la señal debe atravesar múltiples particiones consecutivas, esta atenuación se vuelve acumulativa y destructiva para el estándar WiFi 6.

Para comprender de manera integral el impacto que tiene la arquitectura del inmueble sobre el rendimiento de las redes inalámbricas de 5 GHz, se consolidan las mediciones y variaciones calculadas de todos los materiales evaluados en la Tabla 7.

Tabla 7

Resultados de las mediciones de atenuación por obstáculos inmuebles varios.

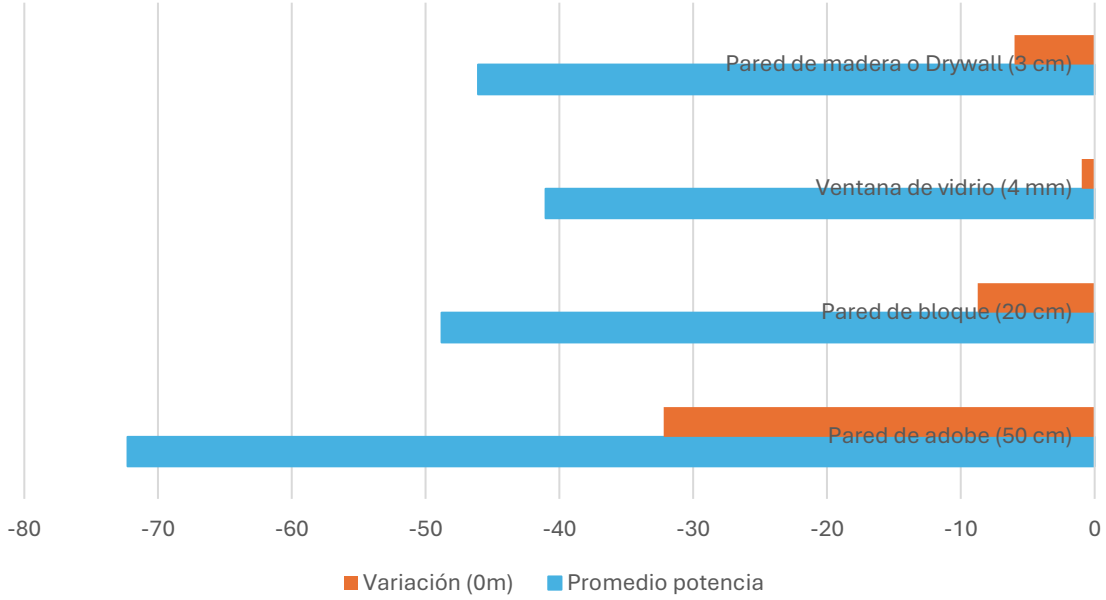
Obstáculos inmuebles	Promedio atenuación (dBm)	Variación respecto 0 metros (dBm)
Pared de adobe (50 cm)	-72,28 dBm	-32,2 dBm
Pared de bloque (20 cm)	-48,82 dBm	-8,74 dBm
Ventana de vidrio (4 mm)	-41,05 dBm	-0,97 dBm
Pared o puerta de madera (3 cm)	-46,08 dBm	-6 dBm

Nota: Se muestra todos los resultados obtenidos, junto a la variación de atenuación que hay entre los resultados de las pruebas de potencia a 0 metros del router. Autoría propia.

El análisis comparativo expuesto revela de forma contundente la inviabilidad física de proporcionar una cobertura gigabit estable en toda la vivienda utilizando un único enrutador centralizado. La pérdida por penetración varía drásticamente según la densidad del material, desde atenuaciones críticas que destruyen el enlace como en el adobe (-32,2 dBm), hasta penalizaciones considerables en el bloque hueco (-8,74 dBm) y la madera (-6 dBm). Únicamente el vidrio delgado demostró ser un medio transparente (-0,97 dBm), escenario que no representa las barreras típicas entre habitaciones.

Figura 83

Graficación de las mediciones de atenuación por obstáculos inmuebles.



Nota: Se realiza la graficación de los resultados obtenidos en las pruebas de mediciones de atenuación por obstáculos inmuebles varios de la Tabla 7 Resultados de las mediciones de atenuación por obstáculos inmuebles varios. Autoría propia.

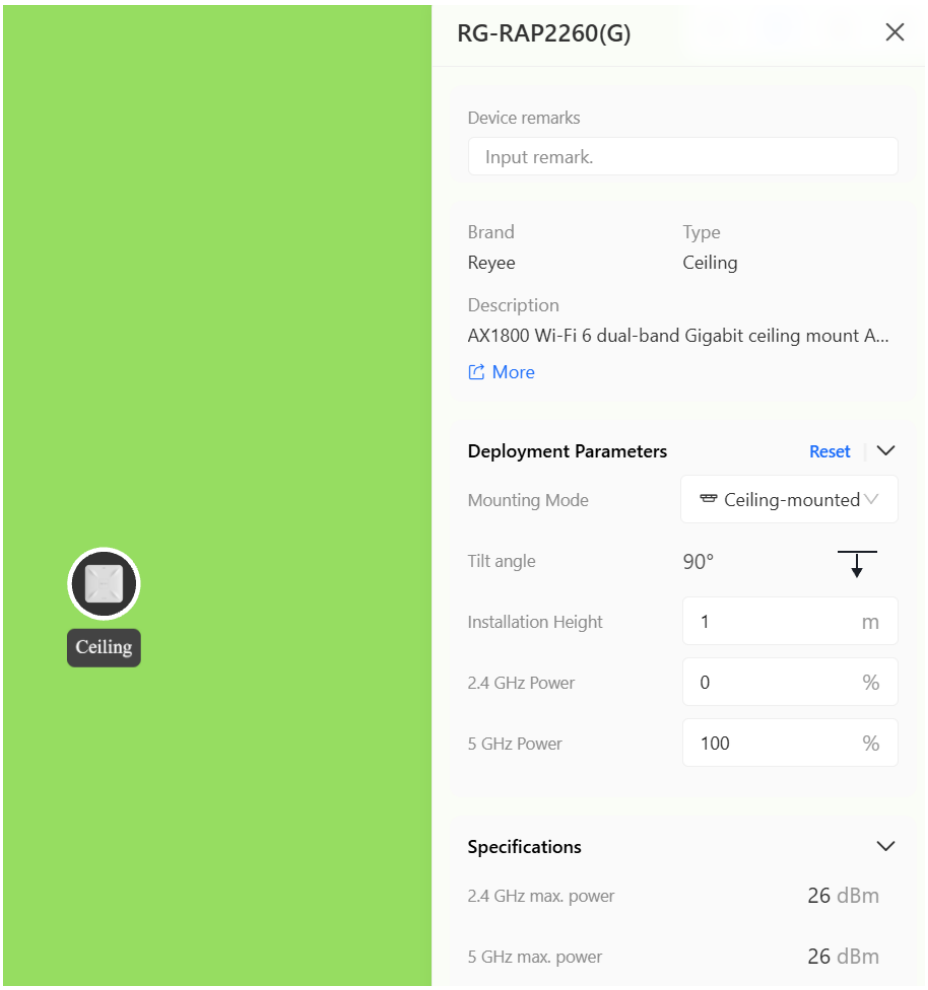
Estas métricas empíricas mostradas en la Figura 83 demuestran que las ondas de alta frecuencia (5 GHz y superiores) no poseen la capacidad de penetración necesaria para atravesar la mampostería residencial sin sufrir una severa degradación en el margen de desvanecimiento. Esto justifica concluyentemente la implementación de la arquitectura FTTR.

3.8 Pruebas de simulaciones experimentales controladas

Para establecer una línea base comparativa dentro del entorno digital, se procedió a ejecutar la primera ronda de simulaciones utilizando los parámetros predeterminados provistos por el software de mapas de calor de Ruijie. En esta fase inicial no se aplicaron calibraciones de mitigación, con el objetivo de evaluar el comportamiento algorítmico estándar de la herramienta al proyectar un modelo de propagación en espacio libre, como se ve en la Figura 84.

Figura 84

Configuración por defecto del RG-RAP2260.



Nota: El simulador de Ruijie viene con el ajuste de potencia al 100% por defecto, lo cual no es correcto y debe ser ajustado según el equipo que se quiera simular. Autoría propia.

Como se documenta en la configuración del equipo, el simulador asigna por defecto un 100% de potencia de transmisión (26 dBm) para la banda de 5 GHz. Este parámetro representa el rendimiento máximo de radiación del Access Point empresarial (RG-RAP2260), una capacidad que excede las especificaciones nominales de un enrutador residencial tradicional. Bajo este esquema de máxima energía, se inició la captura virtual de métricas fijando el punto de medición a cero metros físicos de distancia, buscando establecer el Nivel de Señal de Referencia Absoluta (P_{ref}) dentro del entorno de simulación.

Figura 85

Medición a 0 metros de distancia en simulación por defecto.

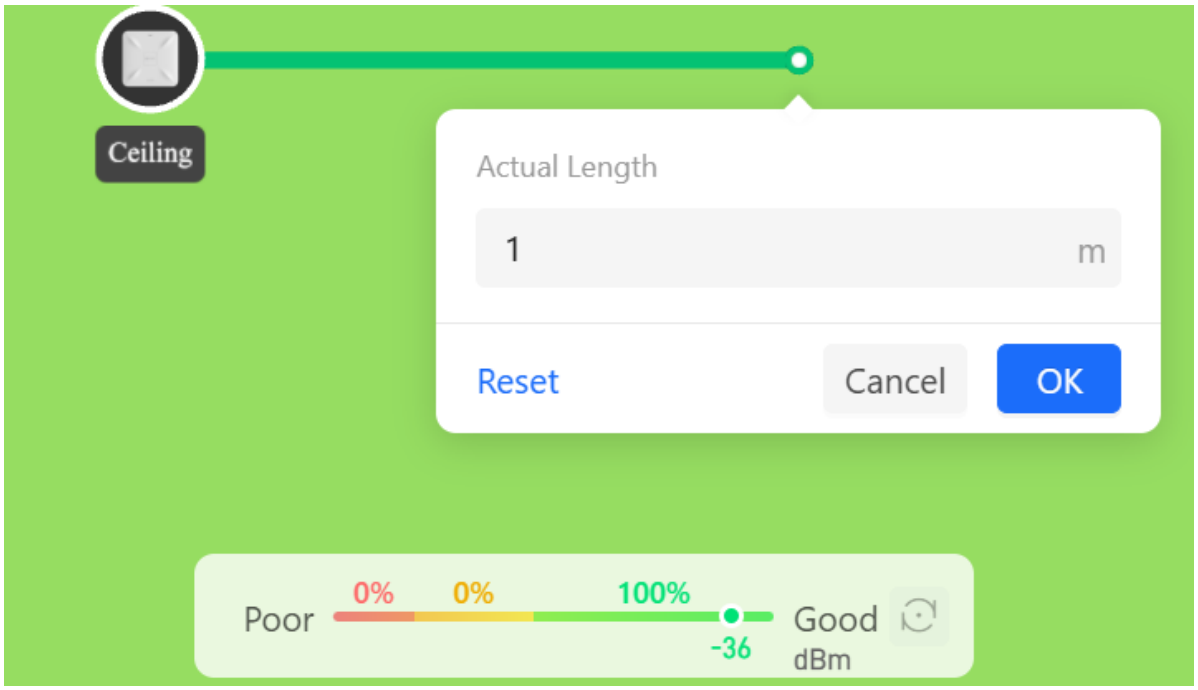


Nota: En la medición con el simulador sin configurar tenemos una potencia de -33 dBm a 0 metros del router. Autoría propia.

La lectura inicial proyectada en la Figura 85 por el motor del simulador a los cero metros define un nivel de potencia base de -33 dBm. A partir de este origen de coordenadas virtuales, se procedió a desplazar la herramienta de censado a una distancia radial exacta de un metro, con el fin de cuantificar el decaimiento calculado por el software en el primer segmento de propagación.

Figura 86

Medición a un metro de distancia en simulación por defecto.

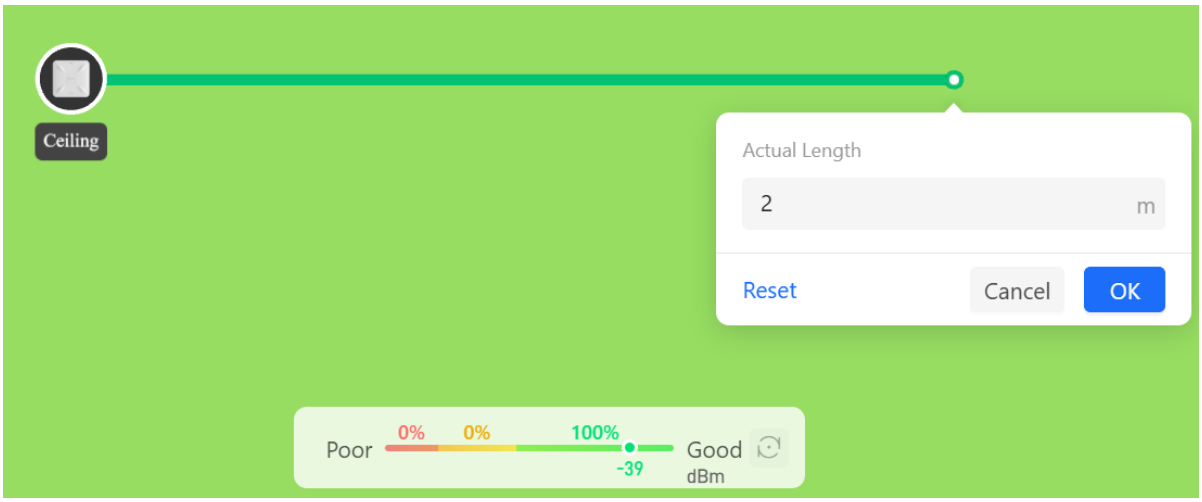


Nota: En la medición con el simulador sin configurar tenemos una potencia de -36 dBm a un metro del router. Autoría propia.

En la Figura 86 al alcanzar la marca de un metro de separación, el algoritmo calcula una intensidad de señal de -36 dBm. Manteniendo la progresión métrica establecida durante las pruebas físicas de campo, el cursor de medición se extendió hacia el siguiente intervalo para evaluar la continuidad de la caída de potencia a los dos metros.

Figura 87

Medición a dos metros de distancia en simulación por defecto.



Nota: En la medición con el simulador sin configurar tenemos una potencia de -39 dBm a dos metros del router. Autoría propia.

En la Figura 87 el registro predictivo a los dos metros de distancia evidencia un nuevo descenso, ubicando la amplitud de la señal en -39 dBm. Finalmente, para completar el perfil de atenuación espacial en línea de vista del escenario digital, se desplazó el punto de comprobación hacia la frontera de los tres metros.

Figura 88

Medición a tres metros de distancia en simulación por defecto.



Nota: En la medición con el simulador sin configurar tenemos una potencia de -42 dBm a tres metros del router. Autoría propia.

En la lectura correspondiente a los tres metros en la Figura 88, el modelo predictivo sitúa la potencia electromagnética en -42 dBm. A diferencia del comportamiento físico real donde la onda sufre un desplome drástico inicial por expansión geométrica y luego se estabiliza, el simulador por defecto aplica una penalización matemática estática. Para visualizar claramente esta tasa de atenuación computarizada, los resultados de esta fase de pruebas virtuales se consolidan en la Tabla 8.

Tabla 8

Resultados de las mediciones de potencia y atenuación por distancia en simulación por defecto.

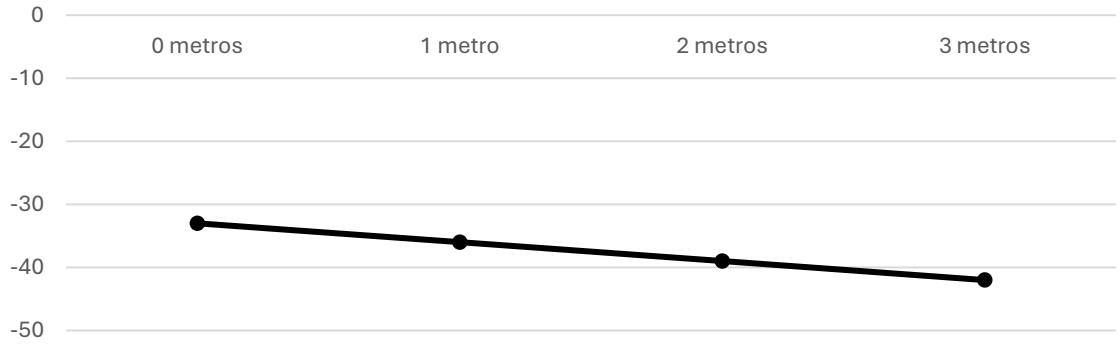
Distancia al router (LOS)	**Promedio de potencia (dBm)**	**Variación de atenuación (dBm)**
0 metros	-33 dBm	-
1 metro	-36 dBm	-3 dBm
2 metros	-39 dBm	-3 dBm
3 metros	-42 dBm	-3 dBm

Nota: Se muestra todos los resultados obtenidos, junto a la variación de atenuación que hay entre los resultados de las pruebas de atenuación por distancia (LOS). Autoría propia.

Para ilustrar de manera más clara el comportamiento del algoritmo de propagación utilizado por el software con sus parámetros predeterminados, se procedió a graficar los valores consolidados en la matriz anterior en la Figura 89.

Figura 89

Graficación de los resultados de potencia y atenuación del simulador por defecto.



Nota: Se realiza la graficación de los resultados obtenidos de las pruebas de las mediciones de potencia y atenuación por distancia en simulación por defecto de la Tabla 8. Autoría propia.

Esta representación visual es clave para analizar la tasa de decaimiento proyectada matemáticamente por el motor virtual y contrastarla frente a la física de radiopropagación real del entorno de pruebas.

3.8.1. *Calibración de potencia del router simulado*

Para garantizar que los mapas de calor proyectados por el software Ruijie Reyee reflejen fielmente el escenario del mundo real, es imperativo homologar la potencia de transmisión del Access Point simulado (RG-RAP2260) con el comportamiento empírico del enrutador residencial utilizado en las pruebas (Huawei AX2).

Tabla 9

Comparación entre los resultados de las mediciones reales controladas y simuladas.

Distancia al router (LOS)	Atenuación real por distancia (dBm)	Simulación por defecto (dBm)	Diferencia de potencia (dBm)
0 metros	-40,08	-33	7,08
1 metro	-44,88	-36	8,88

2 metros	-47,5	-39	8,5
3 metros	-50,05	-42	8,05
		Promedio	**8,13**

Nota: Se muestra una comparación de los resultados de las mediciones reales controladas y simuladas obtenidas en la Tabla 6 y Tabla 8, además de un cálculo del promedio de la diferencia de potencia entre mediciones. Autoría propia.

Como se documenta en la Tabla 9 y la Figura 90, la simulación por defecto proyecta niveles de señal que son, en promedio, 8,13 dBm más fuertes que las mediciones físicas. Dado que el equipo simulado posee una potencia máxima de transmisión (P_{max}) de 26 dBm en la banda de 5 GHz, se debe aplicar una reducción equivalente a esta diferencia para hallar la potencia objetivo (P_{obj}) en la Ecuación 2:

Ecuación 2

Fórmula de potencia objetivo del router simulado.

$$P_{obj} = P_{max} - \Delta P_{avg}$$

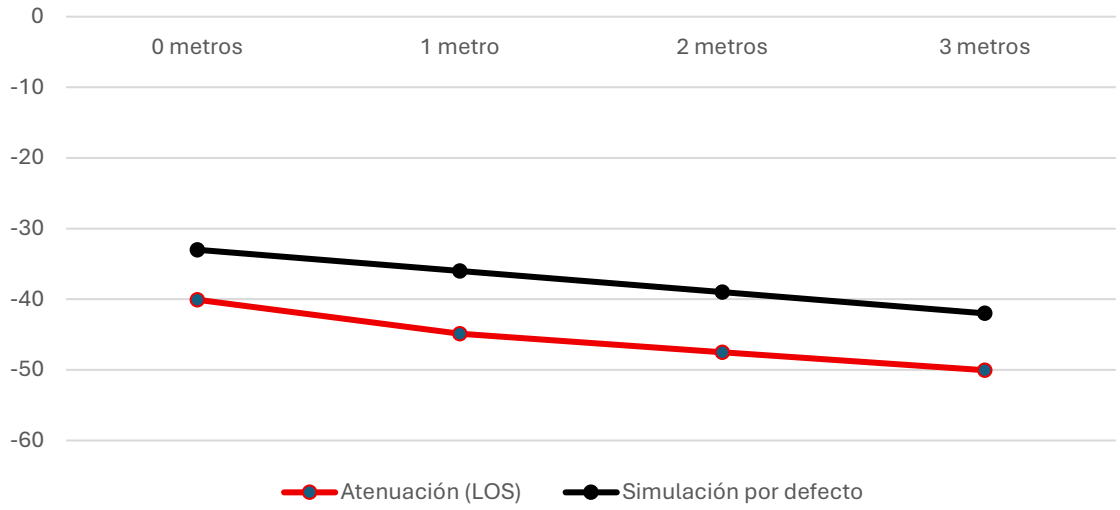
$$P_{obj} = 26 \text{ dBm} - 8{,}13 \text{ dBm} = 17{,}87 \text{ dBm} \quad (2)$$

Nota: Se realiza la resta entre la potencia del router y la diferencia promedio entre la atenuación real y la simulada. Autoría propia.

Para introducir este valor de 17,87 dBm en la interfaz de "Deployment Parameters" del simulador, es necesario traducir la atenuación a un valor porcentual. Los controladores inalámbricos de nivel empresarial no calculan este porcentaje sobre una base de 0 mili vatios, sino que lo interpolan linealmente a lo largo del rango dinámico configurable del hardware de radio.

Figura 90

Graficación de los resultados de las mediciones reales controladas y simuladas.



Nota: Se grafica la comparación de los resultados de las mediciones reales controladas y simuladas obtenidas en la Tabla 7 y Tabla 8. Autoría propia.

Considerando que el límite mínimo de transmisión (P_{min}) para mantener la estabilidad de modulación en radios 802.11ax de esta categoría es estandarizado en 11 dBm (Bellalta, 2019), el rango dinámico útil de configuración se define en la Ecuación 3:

Ecuación 3

Fórmula de rango dinámico.

$$R_{din} = P_{max} - P_{min}$$

$$R_{din} = 26 \text{ dBm} - 11 \text{ dBm} = 15 \text{ dBm} \quad (3)$$

Nota: El rango dinámico se comprende entre la potencia máxima y mínima del dispositivo. Autoría propia.

Con el rango dinámico establecido en 15 dBm, en la Ecuación 4 se calcula qué porcentaje de este espectro representa la potencia objetivo obtenida anteriormente, midiendo la distancia desde el límite inferior:

Ecuación 4

Fórmula de ajuste porcentual de potencia.

$$\%_{set} = \left(\frac{P_{obj} - P_{min}}{R_{din}}\right) \times 100$$

$$\%_{set} = \left(\frac{17{,}87 - 11}{15}\right) \times 100$$

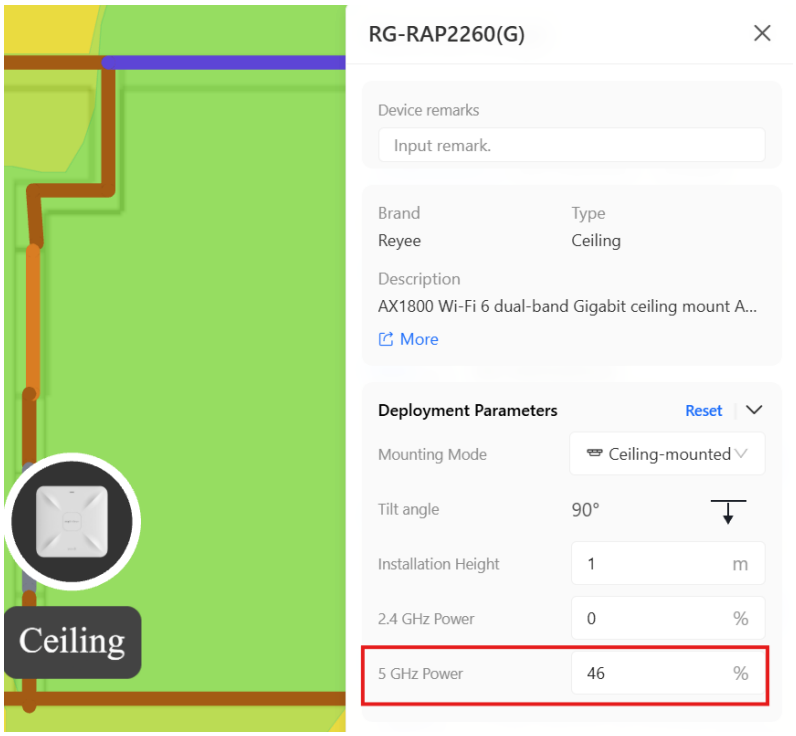
$$\%_{set} = \left(\frac{6{,}87}{15}\right) \times 100 = 45{,}8\% \quad (4)$$

Nota: Para saber el porcentaje de ajuste, transformamos los decibelios a escalas porcentuales, como lo hace el algoritmo interno de los controladores de red inalámbrica. Autoría propia.

Al redondear matemáticamente este resultado al número entero más próximo admitido por la interfaz gráfica del simulador, se obtiene un 46%.

Figura 91

Calibración de la potencia en el router del simulador Ruijie.



Nota: En la configuración del router vamos a colocar la potencia de la señal 5GHz en 46%, y en 2.4GHz en 0 ya que no es necesario para las pruebas. Autoría propia.

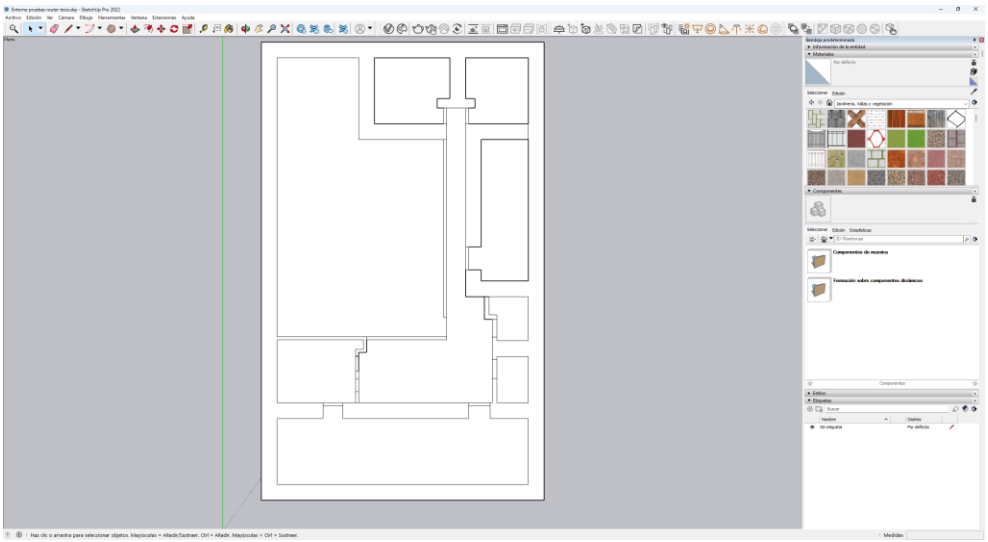
En la Figura 91 la aplicación de este parámetro de configuración restringe la antena del simulador para que radie con la misma penalización observada en el equipo domiciliario real. Esta calibración matemática valida la exactitud de los mapas de calor generados en las fases posteriores, asegurando que las zonas de sombra proyectadas para la red de 5 GHz sean precisas y justifiquen correctamente la posterior implementación de la arquitectura FTTR.

3.8.2. *Pruebas de atenuación por distancia en línea de vista (LOS)*

Una vez establecido el factor de calibración de potencia para el equipo virtual, el siguiente paso metodológico requiere replicar con exactitud el entorno de pruebas físicas dentro del ecosistema digital. Para lograr este objetivo, se procedió a la vectorización planimétrica del inmueble. Utilizando el software de diseño asistido por computadora (CAD) SketchUp, en la Figura 92 se elaboró un boceto arquitectónico en dos dimensiones (2D) que respeta estrictamente la geometría y distribución espacial del área donde se ejecutaron las mediciones de campo reales.

Figura 92

Boceto del área de pruebas experimentales en SketchUp.

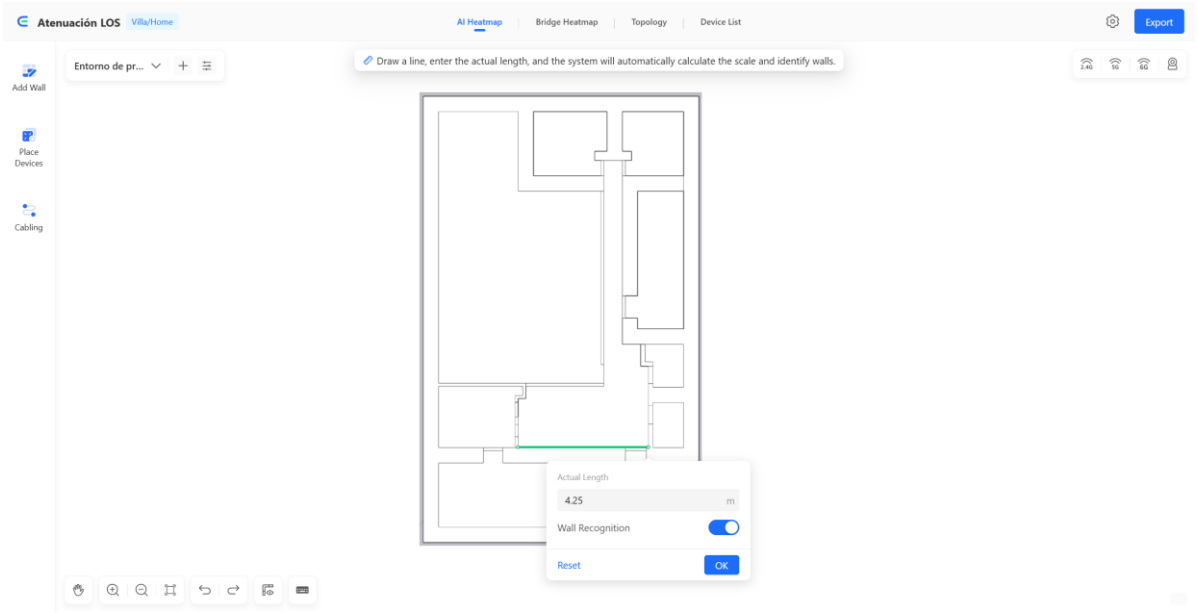


Nota: Diseñamos un boceto del entorno de pruebas reales para importarlo al simulador, y tener una medición más exacta de la potencia del router. Autoría propia.

Con el plano arquitectónico renderizado, el archivo gráfico fue exportado e introducido en el motor de diseño de la plataforma Ruijie Reyee Cloud. Para que el algoritmo predictivo calcule la Pérdida por Trayectoria en el Espacio Libre (FSPL) de manera certera, es un requisito técnico ineludible establecer una escala isométrica 1:1.

Figura 93

Importación del boceto al software de simulación Ruijie.

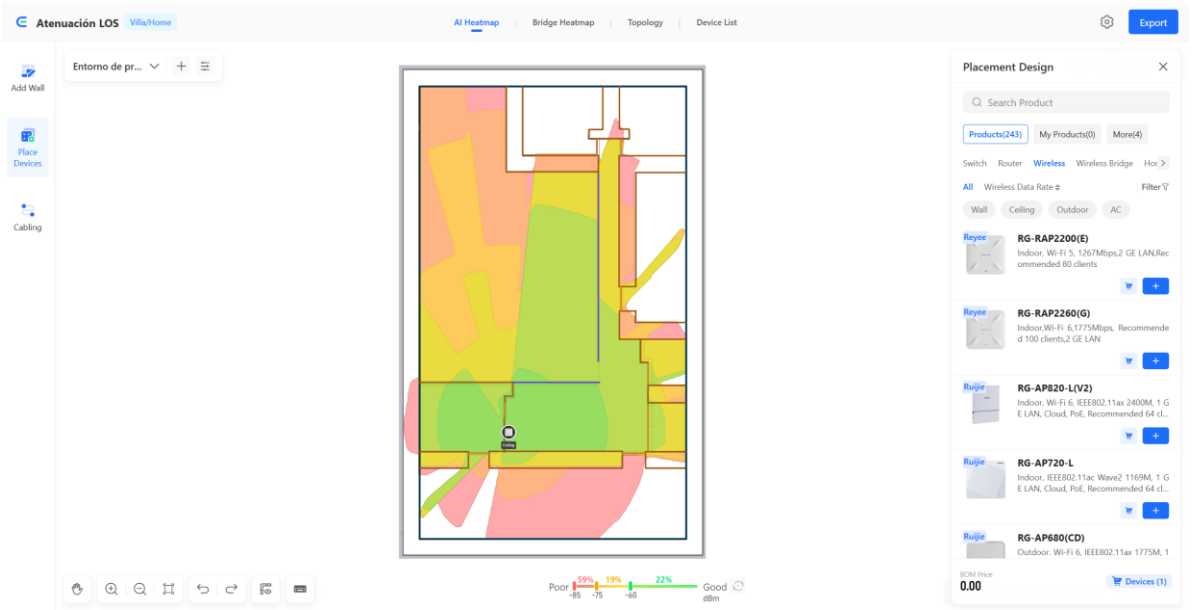


Nota: Importamos el boceto al software de simulación de Ruijie, donde colocamos una línea con la escala real del entorno de pruebas. Autoría propia.

Mediante la herramienta de calibración métrica del software, en la Figura 93 se trazó un vector de referencia sobre una división conocida, asignándole su longitud física real. Esta acción de referenciación permite al motor matemático dimensionar todo el mapa de calor de forma proporcional al mundo físico. Posteriormente, se procedió a la caracterización electromagnética de los obstáculos.

Figura 94

Ajuste de paredes y router del boceto importado al simulador de Ruijie.



Nota: El simulador tiene una IA que colocan las paredes automáticamente, aunque puede haber problemas, es recomendable hacerlo manualmente. Autoría propia.

Si bien la plataforma en la nube integra algoritmos de inteligencia artificial para el reconocimiento automático de contornos, la precisión requerida para esta investigación demandó un trazado y ajuste manual exhaustivo. Este proceso garantiza que cada segmento del plano tenga asignado el coeficiente de atenuación exacto correspondiente a los materiales caracterizados empíricamente (adobe, bloque, vidrio y madera).

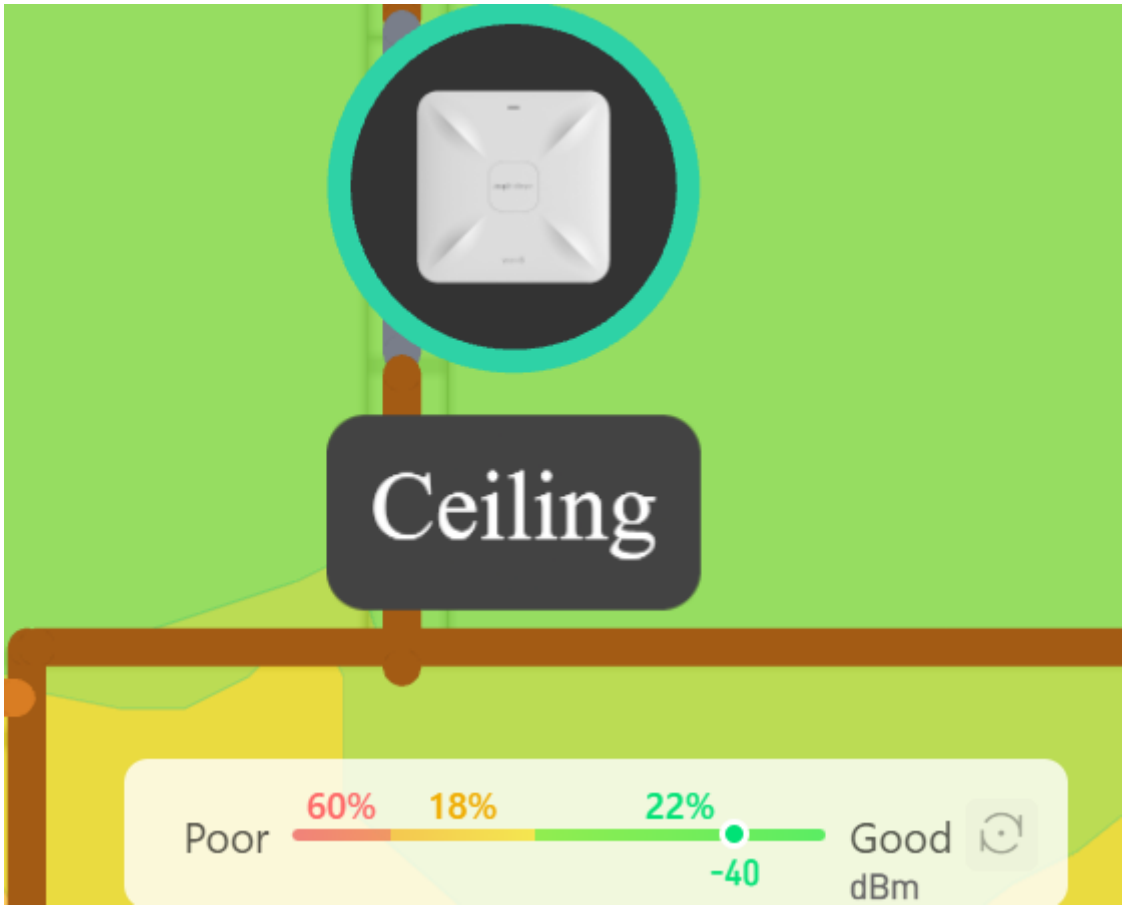
En la Figura 94 se posicionó el Access Point virtual (con su potencia de transmisión ya restringida al 46%) en las coordenadas exactas donde operó el enrutador residencial Huawei AX2, ordenando al sistema la renderización del mapa de calor de 5 GHz. Con el entorno digital completamente homologado a la realidad física, se inició la extracción de las métricas escalonadas en LOS para validar el comportamiento del modelo predictivo ajustado.

Con el entorno virtual arquitectónicamente escalado y el equipo de transmisión restringido matemáticamente a su potencia objetivo, se inició la ronda de mediciones dentro del simulador calibrado. La primera captura se ejecutó ubicando el vector de análisis

exactamente sobre las coordenadas del enrutador (0 metros), con el propósito de comprobar si el nuevo Nivel de Señal de Referencia (P_{ref}) generado por el software coincidía con el umbral empírico de la planta física.

Figura 95

Medición a 0 metros de distancia en simulación calibrada.

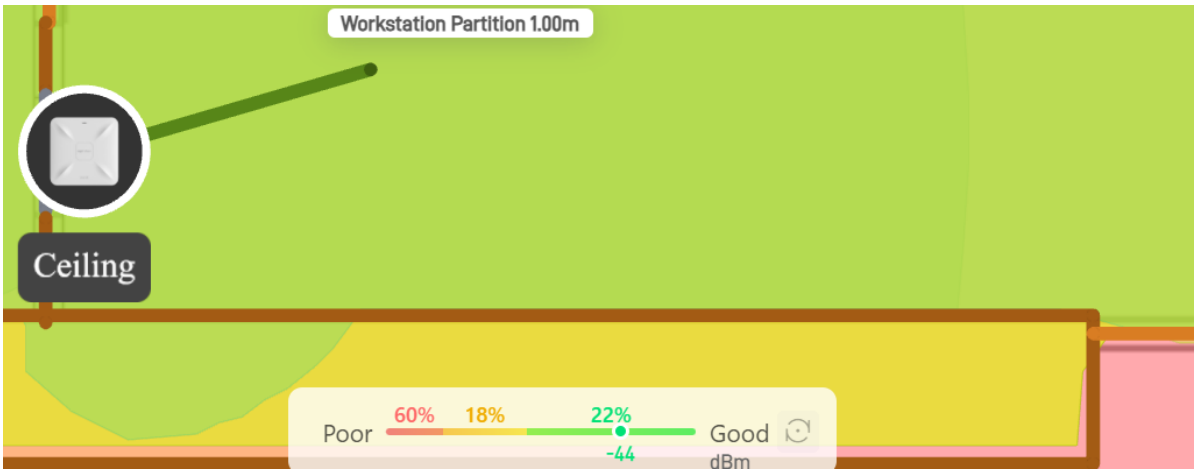


Nota: En la medición con el simulador calibrado con el boceto del área de pruebas tenemos una potencia de -40 dBm a 0 metros del router. Autoría propia.

La medición inicial en la Figura 95 proyectada por el motor calibrado establece una potencia de -40 dBm. Este valor representa una corrección exitosa respecto a los -33 dBm arrojados por el sistema por defecto, alineándose con una precisión milimétrica al registro físico. Comprobado este origen de coordenadas, se procedió a extender la partición virtual hacia la marca de un metro para evaluar el cálculo de dispersión espacial en el primer tramo.

Figura 96

Medición a un metro de distancia en simulación calibrada.

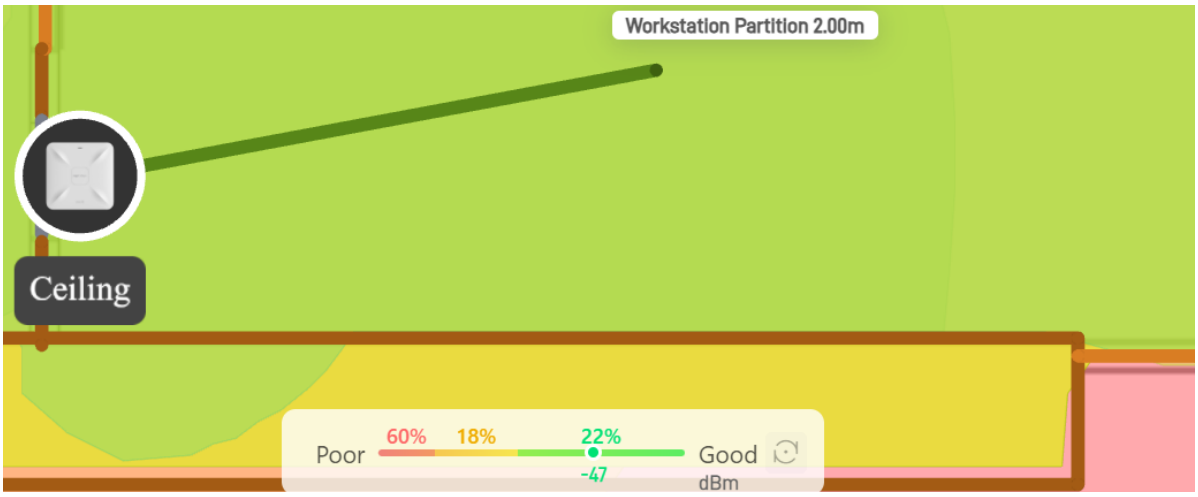


Nota: En la medición con el simulador con el boceto del área de pruebas tenemos una potencia de -44 dBm a un metro del router. Autoría propia.

Al alcanzar el primer metro de separación en la Figura 96, el software predictivo registra una intensidad de -44 dBm. A diferencia del decaimiento estático y lineal de la simulación no calibrada, este nuevo valor demuestra que el algoritmo ahora computa un desplome inicial más agresivo, emulando correctamente la expansión volumétrica del frente de onda real. Manteniendo la progresión métrica, el vector de censado se desplazó hacia el segundo intervalo.

Figura 97

Medición a dos metros de distancia en simulación calibrada.

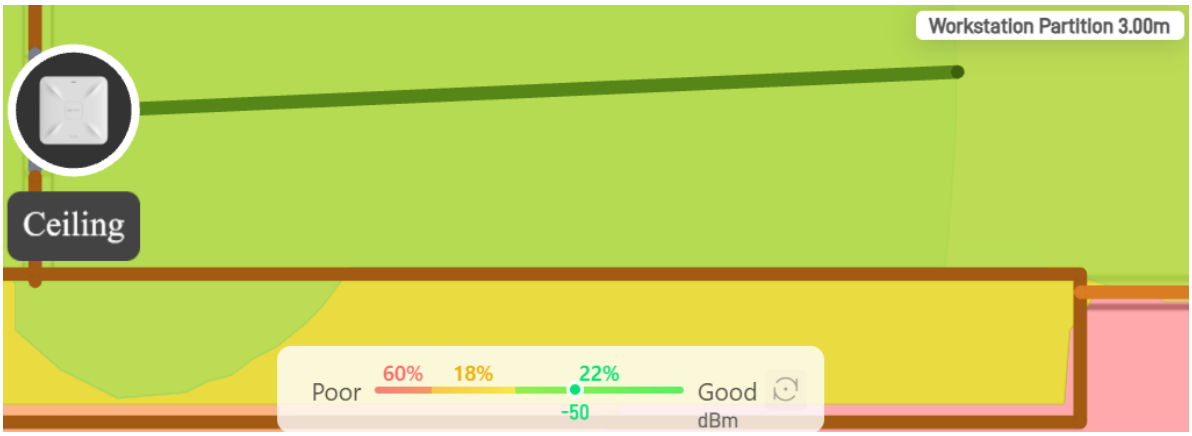


Nota: En la medición con el simulador con el boceto del área de pruebas tenemos una potencia de -47 dBm a dos metros del router. Autoría propia.

A los dos metros de distancia, en la Figura 97 la lectura virtual refleja un nivel de -47 dBm. Esta atenuación proyectada indica que la curva de decaimiento comienza a estabilizarse, replicando fielmente el comportamiento logarítmico documentado en las pruebas de campo. Para finalizar el perfil de propagación en espacio libre del entorno homologado, se llevó el punto de comprobación al límite de los tres metros.

Figura 98

Medición a tres metros de distancia en simulación calibrada.



Nota: En la medición con el simulador con el boceto del área de pruebas tenemos una potencia de -50 dBm a tres metros del router. Autoría propia.

La Figura 98 sitúa la amplitud de la señal en -50 dBm. Para cuantificar el nivel de exactitud alcanzado tras la homologación del equipo, se procedió a consolidar las métricas de la simulación calibrada y contrastarlas matemáticamente contra los valores empíricos obtenidos en las pruebas físicas.

Tabla 10

Resultados de las mediciones de potencia y atenuación por distancia en simulación con boceto.

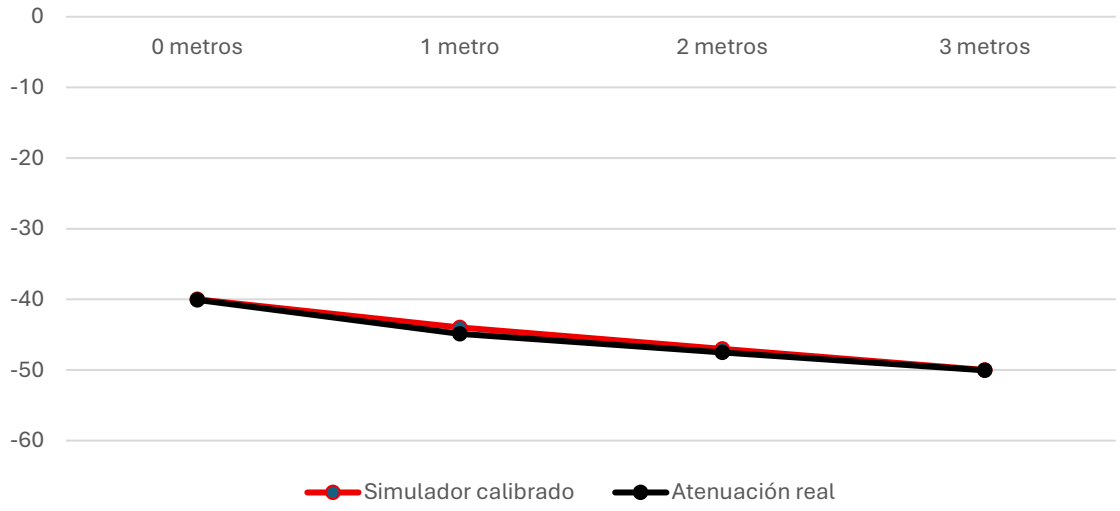
Distancia al router (LOS)	Atenuación real por distancia (dBm)	Simulación por defecto (dBm)	Diferencia de potencia (dBm)
0 metros	-40,08	-40	0,08
1 metro	-44,88	-44	0,88
2 metros	-47,5	-47	0,5
3 metros	-50,05	-50	0,05

Nota: Se muestra una comparación de todos los resultados obtenidos después de haber calibrado la potencia del router en el simulador. Autoría propia.

El análisis cruzado de la Tabla 10 revela un nivel de precisión excepcional. La variación entre el comportamiento de la onda electromagnética en la vida real y la proyección algorítmica calibrada presenta márgenes de diferencia ínfimos, oscilando entre apenas 0,05 dBm y 0,88 dBm. Para visualizar el grado de fidelidad de este modelo digital homologado, se procedió a superponer ambas curvas de atenuación en una única gráfica de rendimiento temporal.

Figura 99

Graficación de los resultados de las mediciones reales controladas y simuladas.



Nota: Se grafica la comparación de los resultados de las mediciones reales controladas y simuladas obtenidas en la Tabla 7 y Tabla 8. Autoría propia.

La representación gráfica de la Figura 99 constituye la validación definitiva del entorno de simulación. Como se observa, la trayectoria de decaimiento proyectada por el simulador calibrado (línea roja) y la atenuación real capturada en el entorno físico (línea negra) se encuentran prácticamente superpuestas a lo largo de todo el trayecto métrico.

Esta correspondencia casi simétrica demuestra que el ajuste porcentual de potencia calculado previamente eliminó la linealidad irreal del software por defecto. Al comprobar que el motor de Ruijie Reyee Cloud ahora replica con absoluta fidelidad la física de radiopropagación del espectro aéreo.

3.8.3. *Atenuación por obstáculos inmuebles*

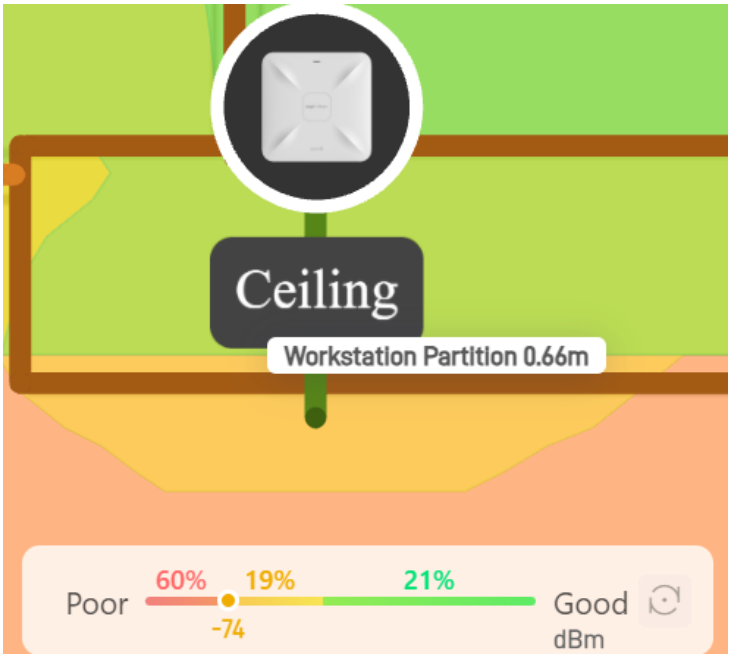
Superada la fase de calibración métrica y de potencia en espacio libre (LOS), la metodología de simulación avanzó hacia la evaluación en condiciones de no línea de vista. El objetivo de esta etapa es determinar cómo el algoritmo del software calcula la pérdida por penetración al utilizar sus perfiles de materiales predeterminados.

- **Pared de adobe (50 cm)**

Se insertaron en el plano digital barreras con características equivalentes a los obstáculos caracterizados en las pruebas físicas. La primera evaluación se realizó sobre una pared gruesa parametrizada por el sistema, emulando las propiedades de la mampostería de adobe de 50 cm.

Figura 100

Medición de atenuación con pared gruesa por defecto.



Nota: En la medición con el simulador con paredes por defecto tenemos una atenuación de -74 dBm con una pared gruesa. Autoría propia.

Al cruzar esta primera barrera de alta densidad, en la Figura 100, el motor de cálculo proyecta una intensidad de señal residual de -74 dBm. Partiendo del Nivel de Señal de

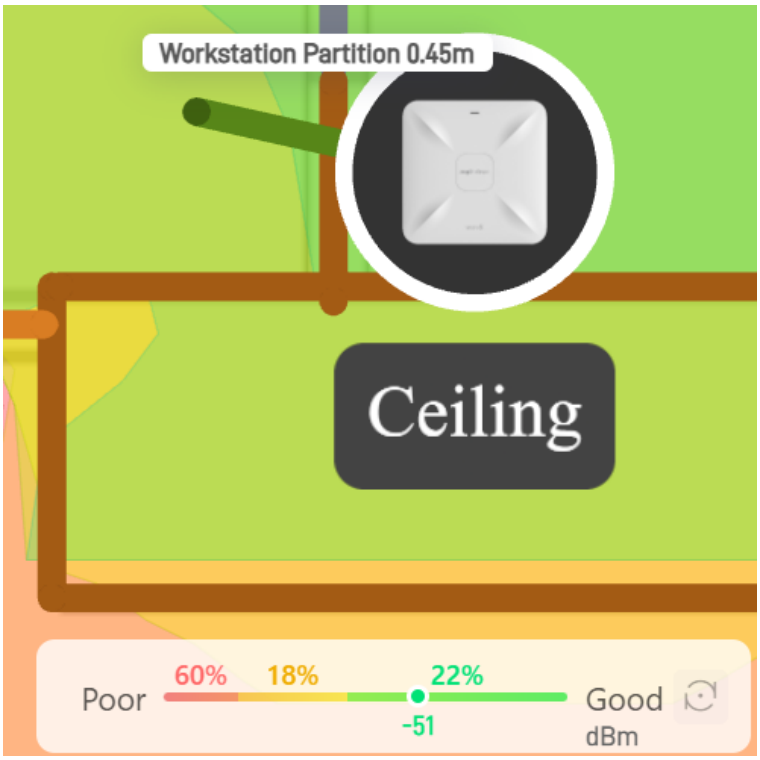
Referencia (P_{ref}) calibrado a -40 dBm en este entorno, el software asigna una penalización estructural de -34 dBm, un valor que refleja fielmente la severidad de este tipo de construcciones masivas sobre la banda de 5 GHz.

- **Pared de bloque (20 cm)**

A continuación, el vector de medición virtual fue dirigido a través de una partición configurada con los parámetros de una pared estándar, análoga al muro de bloque hueco de 20 cm evaluado físicamente.

Figura 101

Medición de atenuación con pared de bloque por defecto.



Nota: En la medición con el simulador con paredes por defecto tenemos una atenuación de -51 dBm con una pared de bloque. Autoría propia.

La Figura 101 en este escenario una potencia de -51 dBm, lo que representa una variación de atenuación de -11 dBm respecto al punto de origen. Esta proyección mantiene la

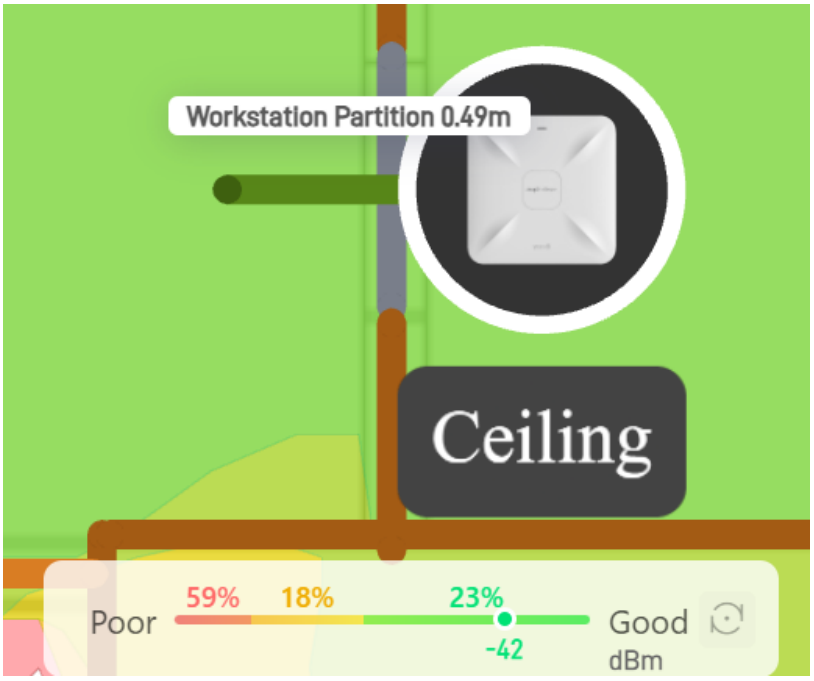
coherencia física esperada: una absorción electromagnética considerable, pero significativamente inferior a la generada por el muro grueso.

- **Ventana de vidrio (4 mm)**

Para analizar el comportamiento de las superficies translúcidas, se configuró un segmento del perímetro como cristal estándar, emulando la ventana de vidrio de 4 mm.

Figura 102

Medición de atenuación con ventana de vidrio por defecto.



Nota: En la medición con el simulador con paredes por defecto tenemos una atenuación de -42 dBm con una ventana de vidrio. Autoría propia.

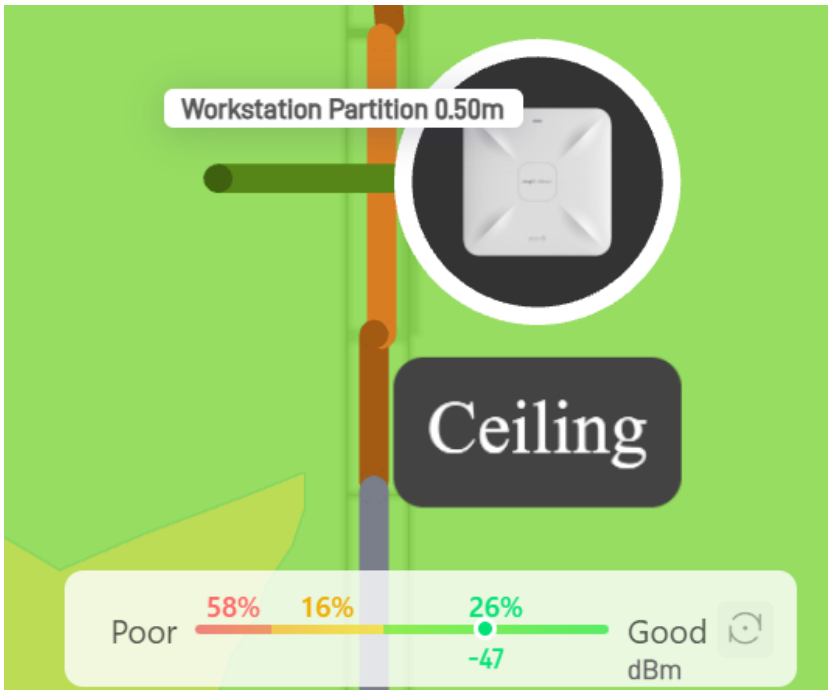
Al atravesar el cristal, en la Figura 102, el software proyecta un nivel de -42 dBm, asignando una pérdida por penetración de apenas -2 dBm. El algoritmo reconoce correctamente la alta permeabilidad del vidrio frente a las radiofrecuencias del estándar 802.11ax, aplicando una restricción mínima al frente de onda.

- **Pared o puerta de madera (3 cm)**

Finalmente, se evaluó una estructura divisoria ligera configurada como panel de madera, equivalente a puertas interiores de 3 cm de espesor.

Figura 103

Medición de atenuación con pared de madera por defecto.



Nota: En la medición con el simulador con paredes por defecto tenemos una atenuación de -47 dBm con una pared de madera. Autoría propia.

La Figura 103 arroja un resultado de -47 dBm. Para visualizar de manera global el nivel de resistencia que el software le asigna a cada tipo de material constructivo, las métricas extraídas en esta fase de simulación se consolidan en la Tabla 11 y se representan gráficamente a continuación.

Tabla 11

Resultados de la simulación de mediciones de atenuación por obstáculos inmuebles varios.

Obstáculos inmuebles	Promedio potencia (dBm)	Variación respecto 0 metros (dBm)
Pared de adobe (50 cm)	-74 dBm	-34 dBm
Pared de bloque (20 cm)	-51 dBm	-11 dBm
Ventana de vidrio (4 mm)	-42 dBm	-2 dBm

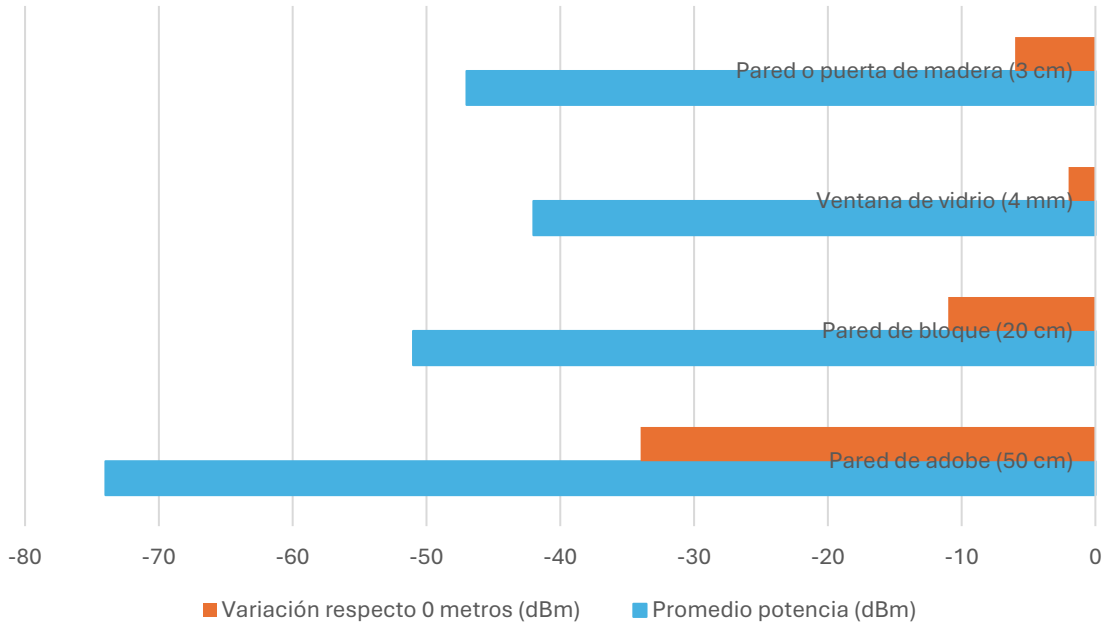
Pared o puerta de madera (3 cm)	-47 dBm	-6 dBm

Nota: Se muestra todos los resultados obtenidos en la simulación, junto a la variación de atenuación que hay entre los resultados de las pruebas de potencia a 0 metros del router. Autoría propia.

La Figura 104 permite dimensionar visualmente la severidad con la que cada obstáculo estructural penaliza el presupuesto de potencia dentro del entorno virtual. Se evidencia una correlación directa y coherente entre la densidad del material simulado y la magnitud de la caída de señal.

Figura 104

Graficación de las mediciones de atenuación por obstáculos inmuebles.



Nota: Se realiza la graficación de los resultados obtenidos en las pruebas de mediciones de atenuación por obstáculos inmuebles varios de la Tabla 11. Autoría propia.

3.8.4. *Calibración de atenuación de objetos inmuebles*

Con el levantamiento de datos virtuales completado, es imprescindible someter el motor de simulación a una validación cruzada. El propósito de este apartado es contrastar matemáticamente la atenuación real (obtenida mediante el equipo físico en campo) contra la atenuación teórica (calculada por los materiales predeterminados de Ruijie Reyee Cloud). Este análisis determinará si los perfiles estructurales del software requieren una calibración adicional o si poseen la precisión suficiente para proyectar la cobertura del inmueble.

Tabla 12

Resultados de las mediciones de atenuación por obstáculos inmuebles varios.

Obstáculos inmuebles	**Atenuación real (dBm)**	**Simulación por defecto (dBm)**	**Diferencia de atenuación (dBm)**
Pared de adobe (50 cm)	-32,2 dBm	-34 dBm	-1,8
Pared de bloque (20 cm)	-8,74 dBm	-11 dBm	-2,26
Ventana de vidrio (4 mm)	-0,97 dBm	-2 dBm	-1,03
Pared o puerta de madera (3 cm)	-6 dBm	-6 dBm	0
		Promedio	**-1,27**

Nota: Se muestra una comparación de los resultados de las atenuaciones reales controladas y simuladas obtenidas en la Tabla 7 y Tabla 11, además de un cálculo del promedio de la diferencia de potencia entre mediciones. Autoría propia.

El procesamiento analítico expuesto en la Tabla 12 demuestra una convergencia algorítmica sobresaliente. Las diferencias de atenuación entre el mundo físico y el entorno

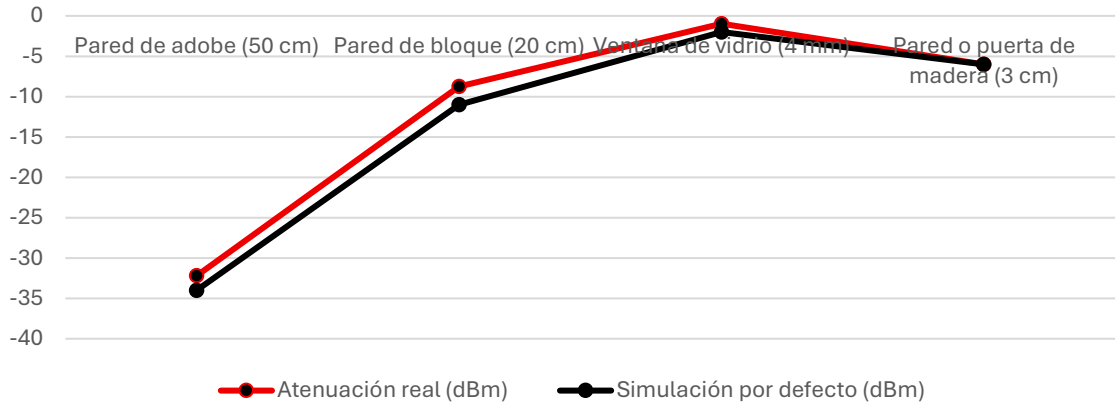
simulado son marginales: -1,8 dBm para el adobe, -2,26 dBm para el bloque, -1,03 dBm para el vidrio, y una coincidencia exacta (0 dBm) para la madera. Al promediar estas variaciones, se obtiene un margen de error general de apenas -1,27 dBm. En la ingeniería de radiofrecuencia, una discrepancia inferior a 2 decibelios se considera estadísticamente despreciable y completamente aceptable para el diseño de redes Wireless LAN.

Para ilustrar esta alta fidelidad de manera visual, se procedió a superponer los deltas de pérdida de ambos escenarios (físico y digital) en un gráfico de líneas.

La Figura 105 confirma la simetría casi absoluta entre las curvas de atenuación. El paralelismo estricto entre el comportamiento del Huawei AX2 en el entorno residencial y el AP virtual dentro de Ruijie Reyee Cloud valida científicamente la integridad del simulador.

Figura 105

Graficación de los resultados de las atenuaciones reales controladas y simuladas.



Nota: Se grafica la comparación de los resultados de las atenuaciones reales controladas y simuladas obtenidas en la Tabla 7 y Tabla 11. Autoría propia.

Al demostrarse que tanto la potencia de transmisión como los coeficientes de absorción de los materiales están correctamente homologados (con un margen de error promedio de solo -1,27 dBm), se concluye que no es necesario crear materiales personalizados ni forzar atenuaciones manuales en el software. El entorno digital se encuentra en estado óptimo y certificado para generar los mapas de calor predictivos de toda la vivienda. Estos mapas

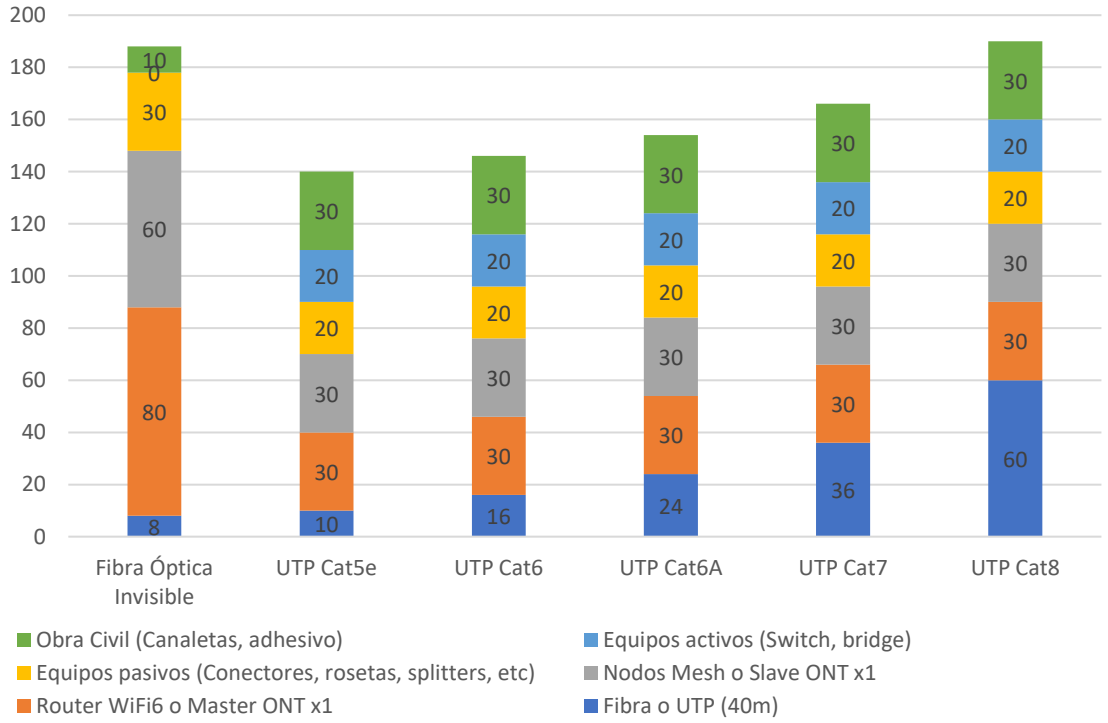
proyectarán con precisión las zonas críticas de desconexión, fundamentando sólidamente el despliegue de una red de fibra distribuida para eludir la arquitectura restrictiva del inmueble.

3.9 Comparativa de costos aproximados de instalación en el inmueble

Para dimensionar la viabilidad financiera de la arquitectura óptica, se elaboró un análisis comparativo de costos aproximados para la instalación de una red interna. Esta evaluación contrasta el despliegue mediante tecnología de fibra óptica invisible frente a las implementaciones centralizadas tradicionales que extienden su red local utilizando cableado de cobre UTP en sus distintas categorías. El estudio proyecta un tendido base de 40 metros y segmenta la inversión en rubros específicos como equipos principales, dispositivos de interconexión y materiales de obra civil.

Figura 106

Gráfica de barras de precios aproximados de instalación FTTx.



Nota: En la gráfica se representan los precios aproximados de cada componente requerido en la instalación en un inmueble con la tecnología FTTR y FTTH con diferentes categorías de cableado (los precios son referenciales y pueden variar).

En la Figura 106 se detalla el peso económico de cada componente dentro de la infraestructura. En la arquitectura óptica, el equipamiento activo representa el rubro más fuerte. La unidad central Master ONT junto con el nodo secundario Slave ONT suman una inversión de $140, cifra que contrasta con los $60 requeridos para adquirir un par de enrutadores inalámbricos tradicionales o nodos Mesh básicos.

No obstante, esta diferencia inicial en hardware se amortiza rápidamente gracias a la eficiencia de los materiales de instalación. El hilo de fibra óptica es sustancialmente más económico, con un costo de apenas $8 por el metraje requerido, en comparación con los altos precios del cobre que escalan progresivamente hasta alcanzar los $60 en el estándar Cat8. Sumado a esto, el diseño óptico elimina por completo la necesidad de adquirir conmutadores o equipos activos intermedios, basando su distribución únicamente en divisores pasivos y rosetas por $30. El rubro de obra civil también refleja un ahorro notable; la fibra invisible se fija discretamente mediante adhesivos térmicos por $10, mientras que cualquier categoría UTP exige la colocación de canaletas plásticas que triplican este valor hasta los $30.

Al consolidar todos los gastos, el despliegue óptimo alcanza un total de $188. Este presupuesto resulta excepcionalmente competitivo frente a los estándares de cobre de alto rendimiento. Una red estructurada con UTP Cat7 totaliza $166, y una basada en UTP Cat8 se eleva hasta los $190. Considerando que únicamente estas últimas categorías de cobre poseen el blindaje necesario para soportar el ancho de banda Gigabit exigido por el estándar WiFi 6 sin sufrir interferencias electromagnéticas, la red óptica invisible se ratifica como la opción más costo eficiente, ofreciendo superioridad técnica absoluta a un precio equiparable al de las soluciones de cobre de alta gama.

4. Capítulo IV: Validación y Demostración de Factibilidad

El presente capítulo constituye el núcleo aplicativo y demostrativo de esta investigación. Una vez caracterizados empíricamente los coeficientes de atenuación de los materiales constructivos y tras haber certificado matemáticamente la precisión del motor de simulación de Ruijie Reyee Cloud, es imperativo trasladar estos hallazgos a un escenario de despliegue a gran escala.

Para este fin, se desarrolla un caso práctico de validación sobre un plano arquitectónico de alta complejidad geométrica y estructural. El objetivo central es contrastar analíticamente el rendimiento electromagnético de una topología de red centralizada tradicional o FTTH, la cual depende de un único nodo radiante, según el caso, frente a la implementación de una arquitectura distribuida por medios ópticos pasivos o FTTR. Mediante la generación y comparación de mapas de calor predictivos, se demostrará la viabilidad técnica de aislar la pérdida por penetración estructural, garantizando niveles óptimos de Nivel de Señal Recibida (RSSI) y la máxima capacidad del estándar 802.11ax en cada segmento del inmueble.

4.1 Escenarios de simulación para medir la factibilidad de FTTR

Para el análisis de la validación y demostración de la factibilidad de la tecnología, se va a experimentar en varios entornos de pruebas en el software de simulación de Ruijie, los entornos o escenarios son los siguientes:

- Casa o Departamento Pequeño (1 Piso)
- Casa Residencial (2 Pisos)
- Casa Histórica o Rural (Adobe)
- Oficina Corporativa o Empresarial
- Hotel de Cabañas o Glamping

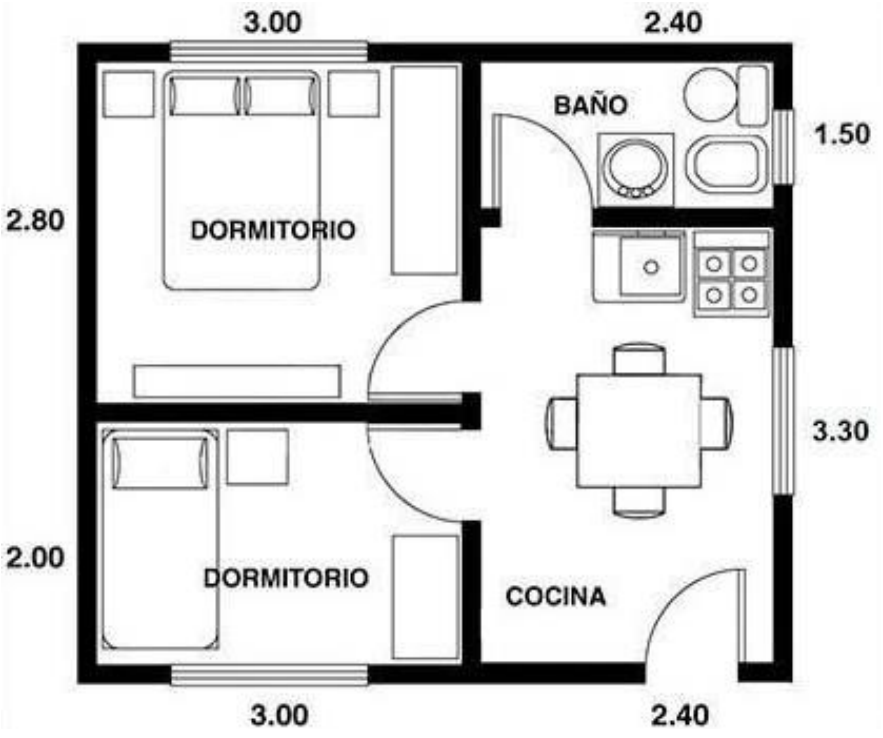
Al final de las simulaciones, se realizará un análisis para saber el nivel de factibilidad de la tecnología en cada escenario planteado.

4.2 Simulación de caso práctico en departamento pequeño

Para iniciar la fase de validación predictiva en Ruijie Reyee Cloud, el primer escenario evalúa un departamento de dimensiones reducidas de aproximadamente $26m^2$. El objetivo metodológico es determinar si, frente a distancias cortas, la atenuación inducida por la tabiquería interna justifica el despliegue de una red óptica distribuida FTTR, o si un único nodo centralizado FTTH resulta técnicamente suficiente para garantizar la conectividad.

Figura 107

Plano arquitectónico de un departamento pequeño.



Nota: El plano arquitectónico presentado es un diseño básico suficiente para hacer la prueba de simulación acorde a un departamento pequeño. Obtenido de: (Pinterest, 2026a)

Como evidencia la Figura 107, aunque el espacio es reducido, la distribución espacial obliga a la señal inalámbrica a atravesar obstáculos ineludibles. Las paredes divisorias introducen zonas de atenuación por penetración estructural. Este plano bidimensional operará como matriz espacial dentro del motor de simulación para vectorizar la mampostería, asignar los coeficientes de pérdida empíricos y proyectar el comportamiento real de la radiofrecuencia en la banda de 5 GHz.

Una vez importado el plano arquitectónico base al entorno del simulador, el paso inicial consiste en la vectorización detallada de la mampostería, como se ve en la Figura 108. En esta fase se trazan digitalmente todas las paredes perimetrales y las divisiones internas del inmueble para construir la matriz espacial.

Figura 108

Creación de las paredes del departamento pequeño en Ruijie.



Nota: Una vez importado el proyecto y plano arquitectónico del inmueble, colocamos todas las paredes. Autoría propia.

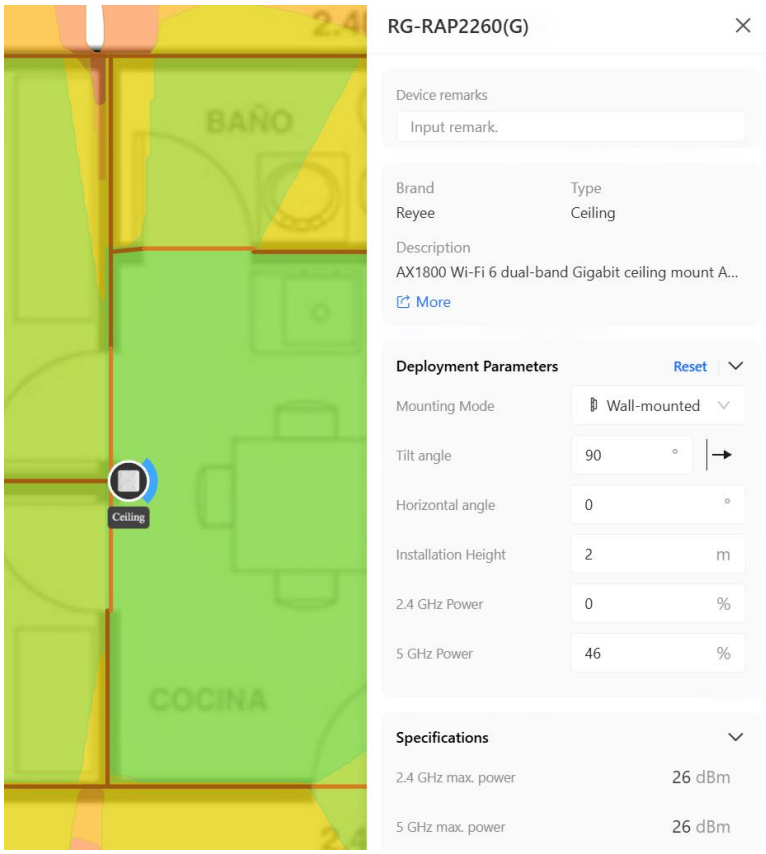
Este modelado físico es indispensable para que el motor predictivo asigne los coeficientes de atenuación correspondientes a cada material. Al delimitar la estructura

completa, el software adquiere la capacidad de calcular con precisión la pérdida por penetración que sufrirá la señal inalámbrica al atravesar cada obstáculo arquitectónico.

Con la geometría del entorno completamente definida, se procede a configurar los parámetros operativos del equipo transmisor simulado en la Figura 109. Para mantener la fidelidad con un despliegue residencial estándar, el enrutador se proyecta con un montaje empotrado en la pared a una altura de dos metros respecto al suelo.

Figura 109

Configuración de los equipos simulados para el departamento pequeño.



Nota: Este equipo lo vamos a colocar empotrado a la pared del inmueble a 2 metros de altura, como se haría comúnmente, y la potencia del router 5GHz en 46%. Autoría propia.

De manera crítica para la validez de este análisis, la potencia de transmisión en la banda de 5 GHz se restringe estrictamente al 46%. Este ajuste obliga al software a irradiar

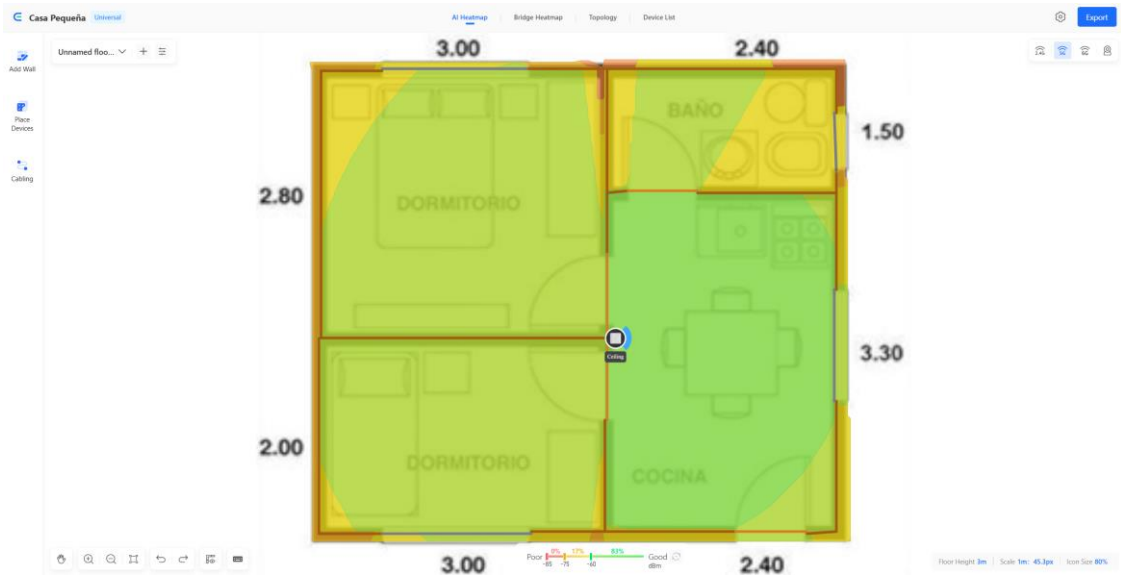
la señal electromagnética con la misma penalización observada empíricamente en los equipos reales durante las pruebas de campo. Al aplicar esta limitación, se elimina cualquier sesgo de amplificación del simulador y se garantiza la obtención de mapas de calor totalmente auténticos y apegados a la realidad física.

4.2.1. *Diagnóstico de Cobertura en Arquitectura Centralizada*

Para evaluar la factibilidad técnica en el entorno más básico, se inicia el análisis con un diagnóstico de cobertura basado en una arquitectura centralizada convencional. En esta topología, un único enrutador central actúa como el Gateway residencial, simulando el despliegue estándar de un ISP, y radia la señal siguiendo los parámetros de pérdida estructural caracterizados previamente. Al ejecutar la simulación, se obtiene el mapa de calor que se presenta en la Figura 110 para su análisis comparativo.

Figura 110

Cobertura de un AP con arquitectura centralizada.



Nota: Se puede ver en el mapa de calor que un único router en un inmueble tan pequeño puede ser suficiente, dependiendo del caso, y que quizá no convenga o valga la pena implementar múltiples routers en estos casos. Autoría propia.

El mapa de calor demuestra una cobertura satisfactoria y uniforme, identificada con la tonalidad verde, en la gran mayoría del inmueble residencial de pequeñas dimensiones.

4.2.2. *Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida*

Para contrastar analíticamente el rendimiento electromagnético, se rediseña la red implementando una topología FTTR distribuida. Mediante un despliegue planificado de fibra óptica hacia cada área crítica, se ubican múltiples nodos radiantes ópticos pasivos directamente dentro de cada dormitorio y en el área común.

Figura 111

Cobertura multi AP de una arquitectura distribuida.



Nota: La cobertura es total en el inmueble, priorizando áreas comunes y habitaciones, dejando en segundo plano áreas de aseo o limpieza, sin embargo, la mejoría frente a un único router es mínima. Autoría propia.

La matriz térmica resultante en la Figura 111 revela una cobertura íntegra y óptima, señalizada con tonalidades verdes, en absolutamente todas las áreas operativas del inmueble residencial. Al eludir por completo la absorción estructural gracias al medio de transporte óptico pasivo, cada recinto dispone de niveles de señal excelentes. Sin

embargo, al contrastar analíticamente los resultados, la mejoría práctica en la cobertura total es mínima.

4.2.3. *Resultados de las simulaciones*

Para cuantificar el desempeño electromagnético en el departamento pequeño, se extrajeron los datos porcentuales de cobertura de los mapas de calor predictivos. La Tabla 13 expone la comparativa directa entre la arquitectura centralizada tradicional y la topología distribuida basada en fibra óptica, clasificando la intensidad de la señal en tres rangos operativos.

Tabla 13

Tabla de resultados de las simulaciones de cobertura en el departamento pequeño.

Arquitectura	**> -85 ; < -75 dBm (%)**	**> -75 ; < -60 dBm (%)**	**> -60 dBm (%)**
Centralizada FTTH	0	17	83
Distribuida FTTR	1	13	86
		Diferencia	**+3**

Nota: En la tabla de resultados podemos ver que hubo una mejoría del +3% en la cobertura con una potencia superior a -60 dBm, que se entiende como una señal muy buena, la mejoría existe, pero es mínima y pone en duda si vale la pena implementar una arquitectura distribuida en estos escenarios. Autoría propia.

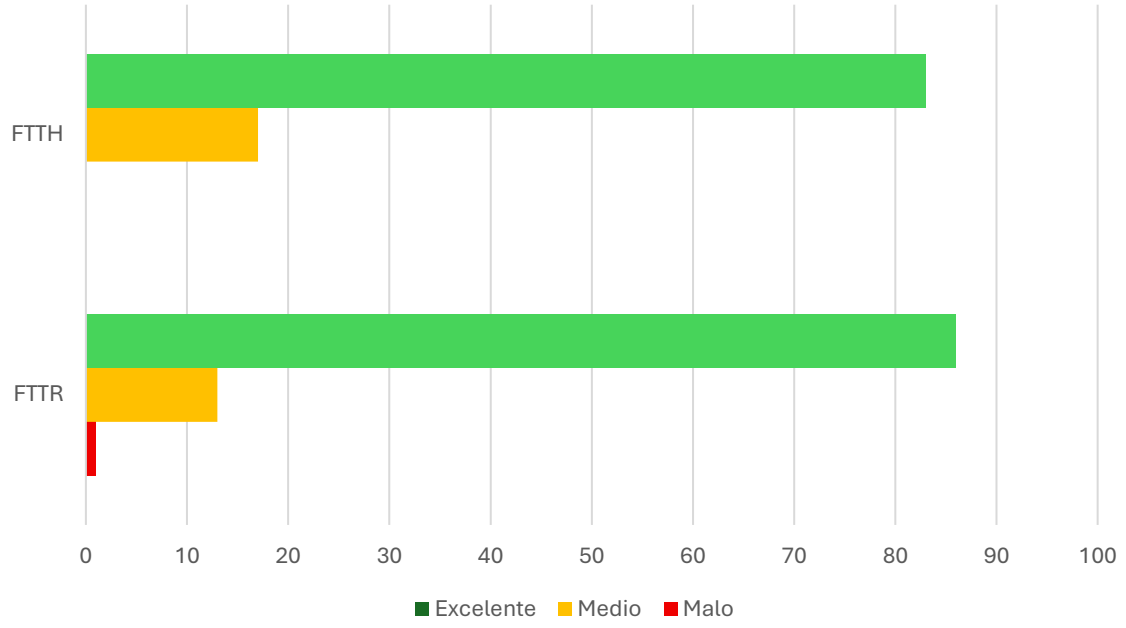
Al analizar detalladamente la tabla de resultados podemos ver que hubo una mejoría de apenas un +3% en la cobertura con una potencia superior a -60 dBm, umbral técnico que se entiende como una señal muy buena o excelente. Si bien es cierto que la mejoría existe, la ganancia es mínima y pone en duda si verdaderamente vale la pena implementar una arquitectura distribuida en estos escenarios. En espacios residenciales

de metraje reducido, un solo enrutador bien posicionado logra abarcar casi la totalidad del inmueble, haciendo que la inversión en múltiples nodos ópticos resulte innecesaria.

Para ilustrar esta comparativa de manera más clara y evaluar el impacto real de ambas tecnologías, los valores tabulados se han trasladado a un diagrama estadístico de proporciones.

Figura 112

Grafico de barras de los resultados de la simulación del departamento pequeño.



Nota: Resultados del departamento pequeño (Tabla 13). Demuestra una ganancia mínima con FTTR frente a FTTH; ambas logran excelente señal (verde), desaconsejando múltiples nodos. Autoría propia.

La Figura 112 representa los resultados de la simulación del departamento pequeño en una gráfica de barras confirma visualmente la conclusión planteada en el análisis numérico. La barra superior correspondiente a la red FTTH alcanza una cobertura de excelencia casi idéntica a la barra inferior perteneciente a la topología FTTR.

4.3 Simulación de caso práctico en casa residencial

Este entorno introduce un incremento significativo en el área total de cobertura y añade el desafío de la propagación de radiofrecuencia a través de múltiples separaciones físicas en diferentes niveles.

Figura 113

Plano arquitectónico de una casa de dos pisos.



Nota: El plano arquitectónico presentado es un diseño básico suficiente para hacer la prueba de simulación acorde a una casa de dos pisos. Obtenido de: (Pinterest, 2026b).

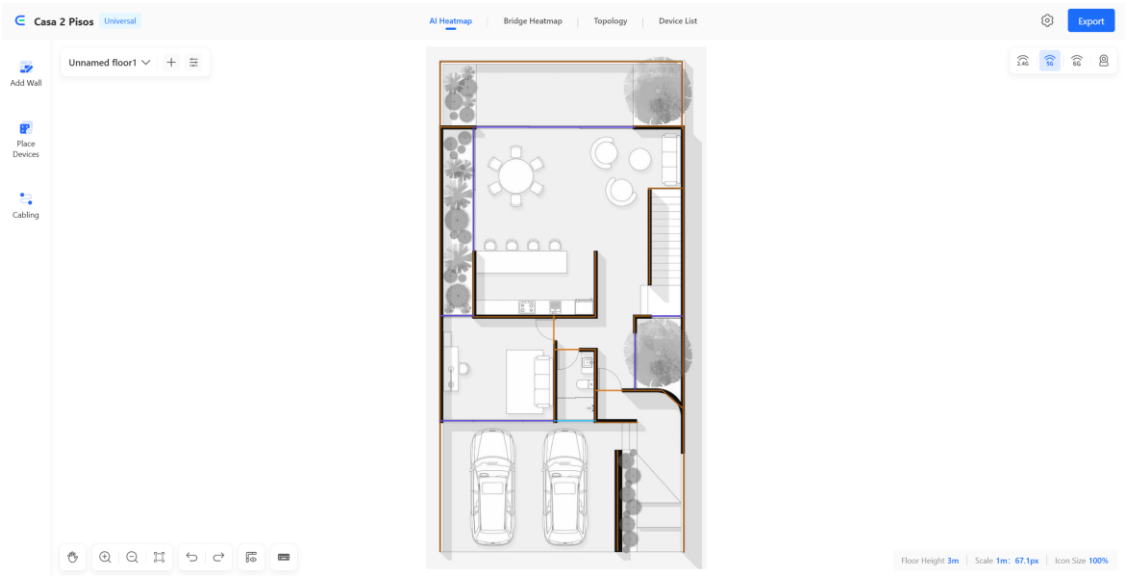
El diseño bidimensional presentado en la Figura 113 constituye una base geométrica idónea y suficiente para ejecutar las pruebas predictivas en un entorno

residencial multinivel, tomando como referencia un esquema arquitectónico. Este diagrama servirá como el esqueleto estructural sobre el cual se modelarán los obstáculos electromagnéticos.

La fase de digitalización espacial en Ruijie Reyee Cloud inicia con el nivel inferior de la vivienda. Tras importar el plano de la planta baja, se procede a delimitar meticulosamente el perímetro y las divisiones internas del área social, cocina y accesos.

Figura 114

Creación de las paredes de la planta baja en Ruijie.



Nota: Una vez importado el proyecto y plano arquitectónico de la planta baja del inmueble, colocamos todas las paredes. Autoría propia.

Al colocar y vectorizar todas las paredes del primer nivel en la Figura 114, se define la matriz de atenuación horizontal del inmueble. Esta caracterización estructural es el paso fundamental para que el algoritmo predictivo reconozca los obstáculos físicos de mayor densidad y calcule la degradación de la señal en las zonas de mayor tránsito de la residencia.

Para completar el modelado del inmueble, el procedimiento de digitalización se replica en el nivel superior. Se importa el plano correspondiente y se traza la tabiquería divisoria de las habitaciones y los cuartos de baño en la Figura 115.

Figura 115

Creación de las paredes de la planta baja en Ruijie.



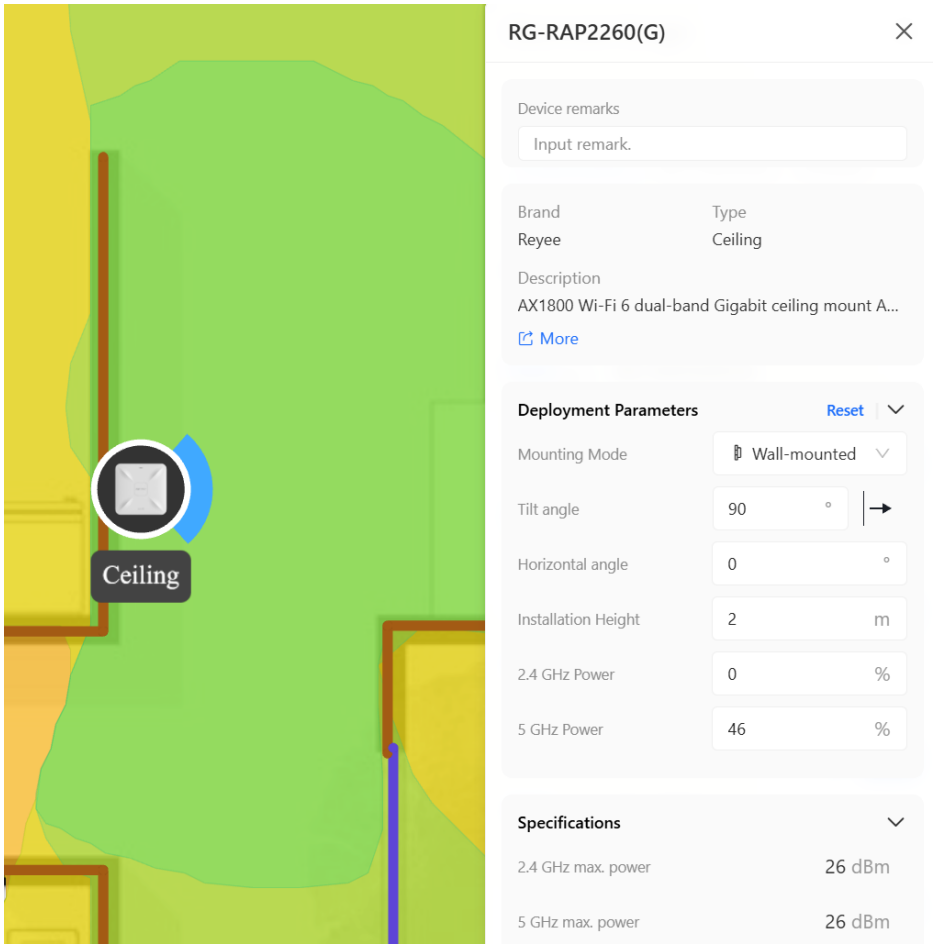
Nota: Colocamos las paredes correspondientes al segundo piso de la casa residencial. Autoría propia.

La colocación exhaustiva de las paredes correspondientes al segundo piso consolida el modelo estructural de la casa residencial. Esta etapa asegura que el simulador cuente con toda la información geométrica necesaria para proyectar la sombra electromagnética y evaluar la viabilidad de la señal en las áreas de descanso.

Una vez construida la réplica digital de la vivienda en ambos niveles, se configuran los atributos físicos y lógicos de los equipos transmisores. Se definen las características de montaje y la potencia de radiación para garantizar que la simulación refleje con exactitud un escenario de despliegue real, como en la Figura 116.

Figura 116

Configuración de los equipos simulados para la casa de dos pisos.



Nota: Este equipo lo vamos a colocar empotrado a la pared del inmueble a 2 metros de altura, como se haría comúnmente, además de colocar la potencia del router 5GHz en 46%. Autoría propia.

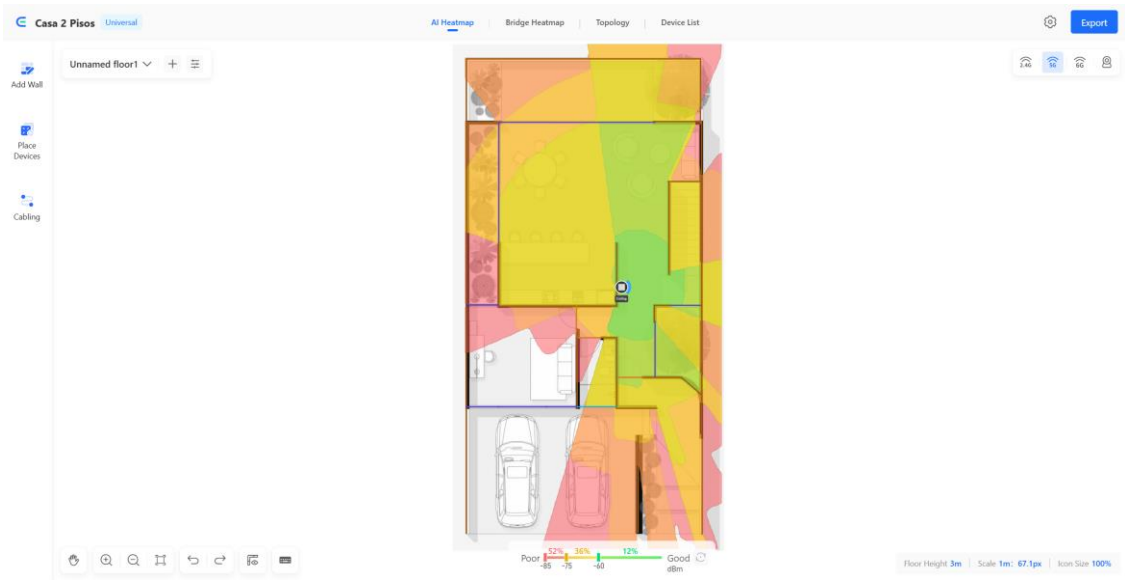
Para emular un escenario verídico, el equipo simulado se proyecta con un montaje empotrado en la pared a 2 m de altura, replicando las prácticas de instalación más comunes de un proveedor de servicios de internet. De igual forma, se impone una restricción algorítmica fijando la potencia del enrutador en la banda de 5 GHz al 46%. Esta calibración matemática es indispensable para modelar el decaimiento de la señal con la misma severidad que los equipos de hardware evaluados físicamente en campo.

4.3.1. *Diagnóstico de Cobertura en Arquitectura Centralizada*

Para evaluar la factibilidad técnica en el entorno multinivel, se inicia el análisis con un diagnóstico predictivo correspondiente a la planta baja de la casa residencial. En este escenario residencial, se simula que el Proveedor de Servicios de Internet implementa un único punto de acceso buscando teóricamente maximizar el alcance omnidireccional mediante un emplazamiento centralizado dentro de la estructura arquitectónica. Se busca evadir conscientemente la instalación típica en los bordes o fachadas más cercanos al poste de acometida, la cual suele degradar el desempeño en el interior del domicilio. El resultado gráfico de esta propagación se presenta en la Figura 117.

Figura 117

Cobertura de un APs con arquitectura centralizada.



Nota: En la figura se ve como el router se intentó colocar en una zona central del domicilio, como lo haría un ISP en el mejor de los casos, y no en el borde más cercano al poste. Autoría propia.

El mapa de calor visualizado en la Figura 117 evidencia de manera inequívoca la incapacidad de un único enrutador centralizado para solventar la atenuación estructural en entornos residenciales multinivel operando en la frecuencia de 5 GHz. Si bien la zona

social central mantiene niveles de señal recibida aceptables identificados en tonalidad verde, se generan extensas zonas muertas y de cobertura deficiente marcadas en amarillo y naranja hacia la fachada frontal, el garaje y la porción posterior de la vivienda debido a la severa absorción de los muros divisorios que deben atravesar las ondas electromagnéticas.

Para completar el diagnóstico centralizado, se procede a evaluar la cobertura en la planta alta de la vivienda unifamiliar. En este nivel superior, el análisis asume un plan de internet donde el proveedor suministra dos enrutadores, simulando una configuración avanzada provista por el ISP para residencias de este perfil operativo. Este segundo equipo radiante se posiciona estratégicamente en una zona central del domicilio, como lo haría un ISP en el mejor de los casos para intentar abarcar la mayor área habitable posible, y no en el borde más cercano al poste.

Figura 118

Cobertura de un APs con arquitectura centralizada.



Nota: En el segundo piso también se coloca otro router centrado en la mejor posición posible para intentar abarcar la mayor área posible, suponiendo un plan de internet donde provean dos routers. Autoría propia.

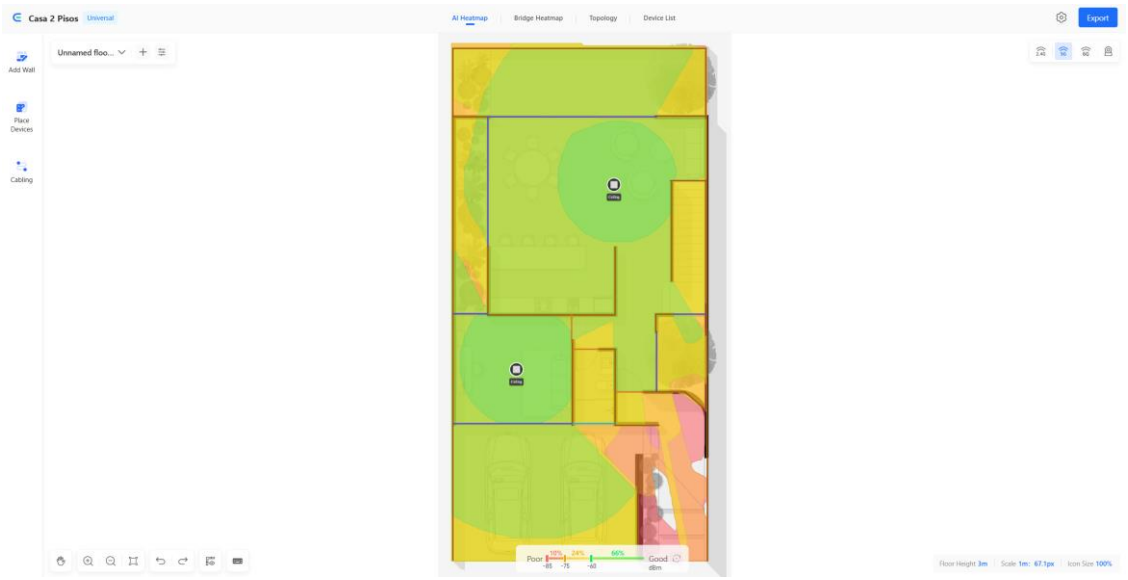
La matriz térmica de la planta alta revelada en la Figura 118 confirma que, incluso emplazando el AP en la mejor posición teórica posible, la arquitectura centralizada no garantiza un desempeño homogéneo en todo el nivel multinivel. Se observan áreas verdes de buena intensidad exclusivamente alrededor del dispositivo radiante y en pasillos cercanos, mientras que los dormitorios perimetrales sufren una degradación de señal significativa marcada en tonalidades amarillas y rojas. Esta atenuación masiva generada por las particiones internas demuestra que un solo punto de emisión centralizado por piso es topológicamente insuficiente para un servicio Gigabit simétrico en todos los espacios.

4.3.2. *Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida*

Con el objetivo de mitigar el colapso electromagnético evidenciado en la simulación centralizada, se rediseña la topología de red implementando la arquitectura distribuida. Para garantizar un desempeño óptimo y eficiente sin incurrir en sobredimensionamiento de hardware, se planifica un despliegue de infraestructura óptica pasiva hacia dos micro nodos radiantes ubicados estratégicamente para cubrir la planta baja. Se busca validar si este diseño de suficiencia operativa es técnicamente viable frente a las atenuaciones Estructurales. El mapa de calor resultante se muestra en la Figura 119.

Figura 119

Cobertura multi AP de una arquitectura distribuida.



Nota: De acuerdo con la simulación, solamente hacen falta dos routers por nivel para lograr abarcar la mayoría del área del domicilio, siendo lo más eficiente y adecuado para este caso, a diferencia de una empresa donde la cobertura debe ser absoluta. Autoría propia.

De acuerdo con la simulación distribuida, la implementación de solamente dos enrutadores por nivel resulta en el diseño más eficiente y adecuado para solventar las necesidades de conectividad residencial en la frecuencia de 5 GHz en este escenario multinivel. A diferencia de un entorno empresarial donde la cobertura debe ser absoluta en cada rincón, este diseño estratégico garantiza niveles excelentes de señal identificados en verde en todas las áreas habitables, logrando abarcar la mayoría del área del domicilio de manera óptima, simétrica y estable habilitando la máxima capacidad del estándar 802.11ax.

Finalmente, se ejecuta la validación predictiva para la arquitectura FTTR distribuida en la planta alta de la casa residencial. Extendiendo la infraestructura óptica pasiva hacia el nivel superior mediante micro ductos o cable drop invisible, se sitúan dos

micro nodos ópticos adicionales buscando un diseño estratégico que prioriza la cobertura en los espacios de descanso y áreas comunes habitables frente a zonas de servicios técnicos. Este mapa predictivo se visualiza en la Figura 120 para su análisis definitivo en este caso de estudio.

Figura 120

Cobertura multi AP de una arquitectura distribuida.



Nota: La cobertura es casi total en el inmueble, priorizando áreas comunes y habitaciones, dejando en segundo plano áreas de aseo o limpieza, sin embargo, podría ser comprensible el uso de más routers si el cliente así lo desea. Autoría propia.

La cobertura resultante es casi total en la planta alta del inmueble multinivel residencial. La matriz térmica revela zonas verdes óptimas habilitando de manera estable las máximas tasas de transferencia de hasta 1.2 Gbps por nodo en absolutamente todos los dormitorios. El diseño estratégico desplegado prioriza estas áreas críticas, permitiendo que zonas de aseo o limpieza queden en segundo plano, cubiertas de manera pasiva y suficiente por la señal residual cruzada de los puntos de acceso cercanos. No obstante, al contrastar visual y analíticamente estos resultados, podría ser comprensible el uso de más

enrutadores si el perfil del cliente así lo requiriera para asegurar la excelencia en áreas de tránsito o servicios técnicos específicos.

4.3.3. *Resultados de las simulaciones*

Para cuantificar el desempeño electromagnético en la casa residencial de dos plantas, se extrajeron los datos porcentuales de cobertura de los mapas de calor predictivos. La Tabla 14 expone la comparativa directa entre la arquitectura centralizada tradicional y la topología distribuida separada por cada nivel del inmueble, clasificando la intensidad de la señal en tres rangos operativos.

Tabla 14

Tabla de resultados de las simulaciones de cobertura en casa residencial.

Arquitectura	**> -85 ; < -75 dBm (%)**	**> -75 ; < -60 dBm (%)**	**> -60 dBm (%)**
FTTH Piso 1	52	36	12
FTTR Piso 1	10	24	66
		Diferencia	**+54**
FTTH Piso 2	60	30	10
FTTR Piso 2	7	46	47
		Diferencia	**+37**

Nota: En la tabla de resultados podemos ver que en el piso 1 hubo una mejoría del +54%, y en el piso 2 hubo una mejoría del +37%, en la cobertura con una potencia superior a -60 dBm, En este caso la mejoría en promedio cuadriplica la capacidad de cobertura del inmueble, solo agregando un router extra por piso. Autoría propia.

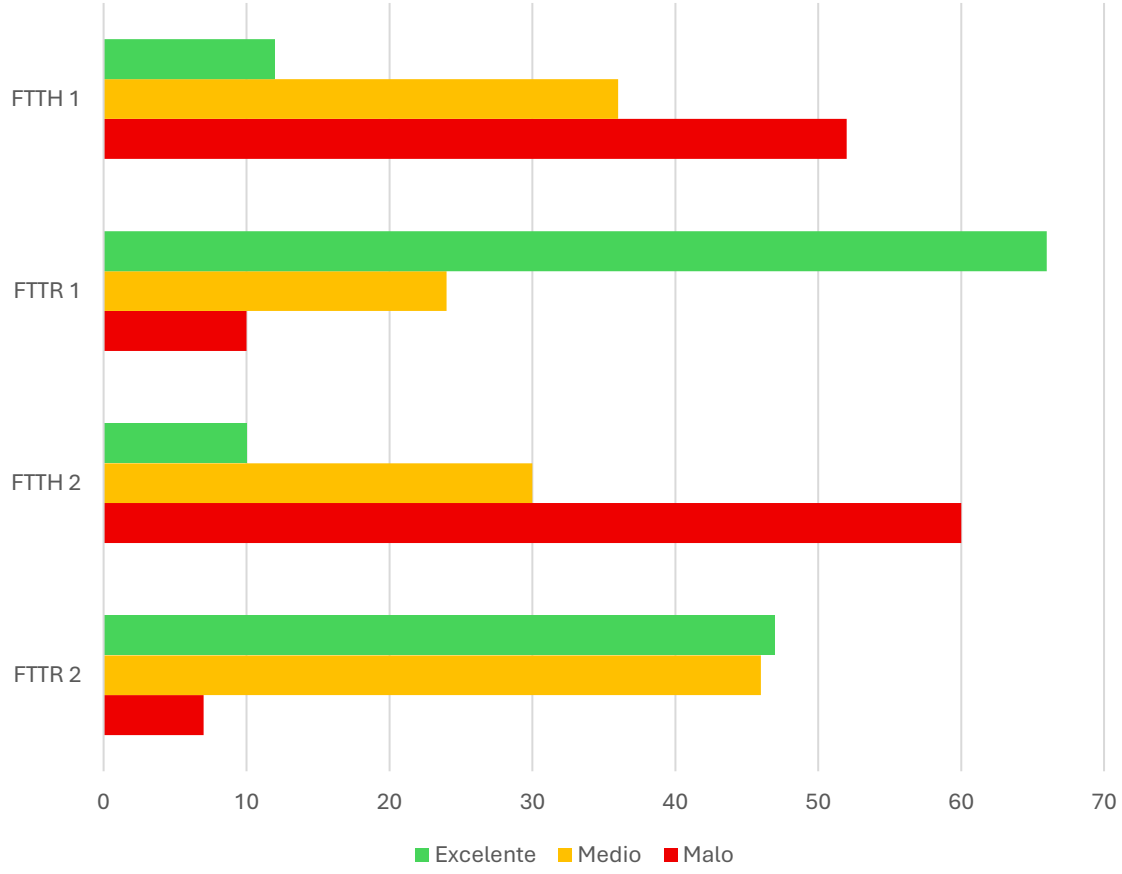
Al evaluar detalladamente los datos presentados, se evidencia un salto cualitativo sustancial en el rendimiento general de la red. Específicamente, en el primer piso se registró una mejoría del +54%, mientras que en el segundo piso el incremento fue del

+37% para los niveles de cobertura con una potencia superior a -60 dBm, umbral que garantiza una conectividad de excelencia. En este caso particular, la mejoría térmica en promedio cuadriplica la capacidad de cobertura efectiva del inmueble con tan solo agregar un enrutador extra por piso.

Para ilustrar esta mejora arquitectónica de manera visual y consolidar el análisis comparativo de ambas plantas, los valores tabulados se han trasladado a un diagrama estadístico de proporciones en la Figura 121.

Figura 121

Grafico de barras de los resultados de la simulación de la casa residencial.



Nota: Resultados por piso en casa residencial (Tabla 14). Se observa reducción drástica de zonas muertas (rojo) y aumento de señal óptima (verde). Autoría propia.

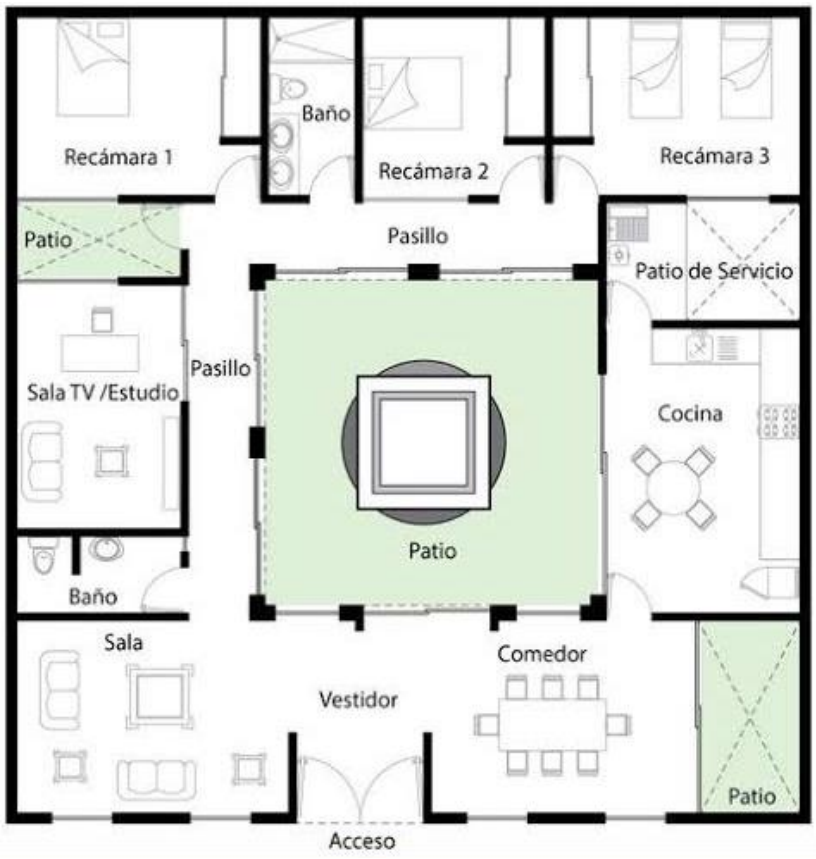
La representación de los resultados de la simulación para la casa residencial en esta gráfica de barras ratifica visualmente la superioridad de la infraestructura óptica. Las barras verdes correspondientes a la señal óptima experimentan un crecimiento contundente al transicionar del modelo FTTH al despliegue FTTR en ambos pisos. De forma simultánea, se observa una reducción drástica de las franjas rojas, las cuales denotan zonas muertas o de conectividad deficiente. Este comportamiento gráfico comprueba definitivamente que descentralizar la emisión Wi-Fi cuadriplica la calidad del servicio, justificando por completo la inversión en inmuebles de múltiples plantas.

4.4 Simulación de caso práctico en casa histórica

El tercer escenario de validación predictiva introduce un reto electromagnético extremo al evaluar una vivienda patrimonial o rural construida con mampostería de adobe. Este material constructivo, caracterizado por su gran espesor y alta densidad de tierra compactada, representa una de las barreras físicas más hostiles para la propagación de ondas de radiofrecuencia. El análisis de esta infraestructura permitirá demostrar las vulnerabilidades críticas de las redes inalámbricas convencionales frente a obstáculos de atenuación masiva.

Figura 122

Plano arquitectónico de una casa histórica con paredes de adobe.



Nota: El plano arquitectónico presentado es un diseño básico suficiente para hacer la prueba de simulación acorde a una casa histórica con paredes de adobe. Obtenido de: (Facilisimo, 2026).

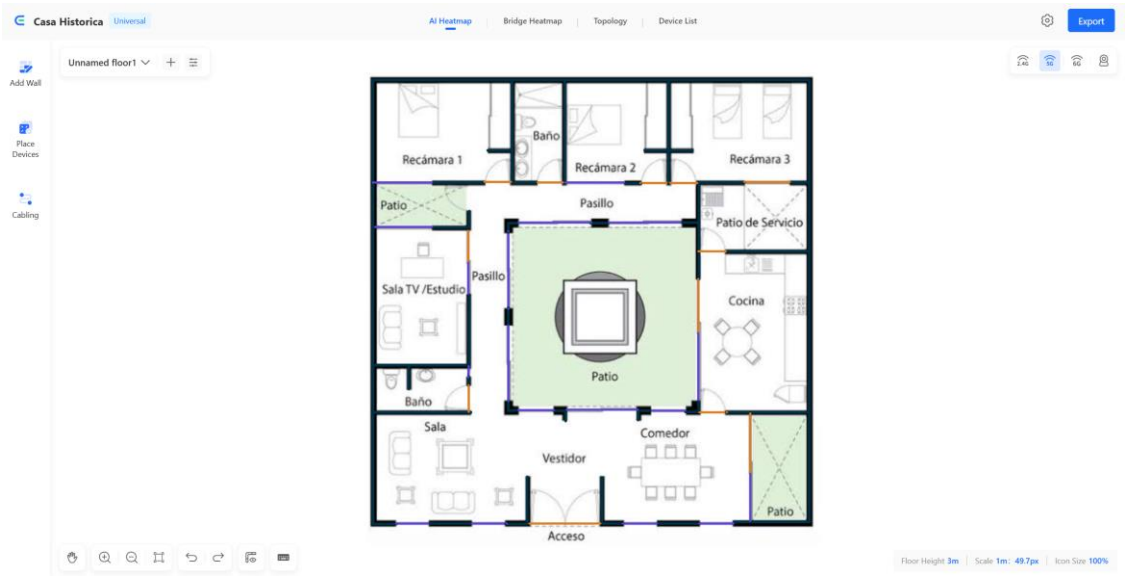
El plano arquitectónico presentado en la Figura 122 constituye un diseño básico, pero estructuralmente suficiente para ejecutar la prueba de simulación acorde a una casa histórica con paredes de adobe. La disposición en forma de claustro con un patio central cerrado exige que la señal atraviese múltiples muros de alto grosor para comunicar las distintas recámaras.

Para preparar el entorno de simulación, el plano base se somete al proceso de vectorización dentro de la plataforma Ruijie Reyee Cloud. En esta etapa, el trazado de la

mampostería requiere una parametrización especial para reflejar la densidad del entorno patrimonial.

Figura 123

Creación de las paredes de la casa histórica en Ruijie.



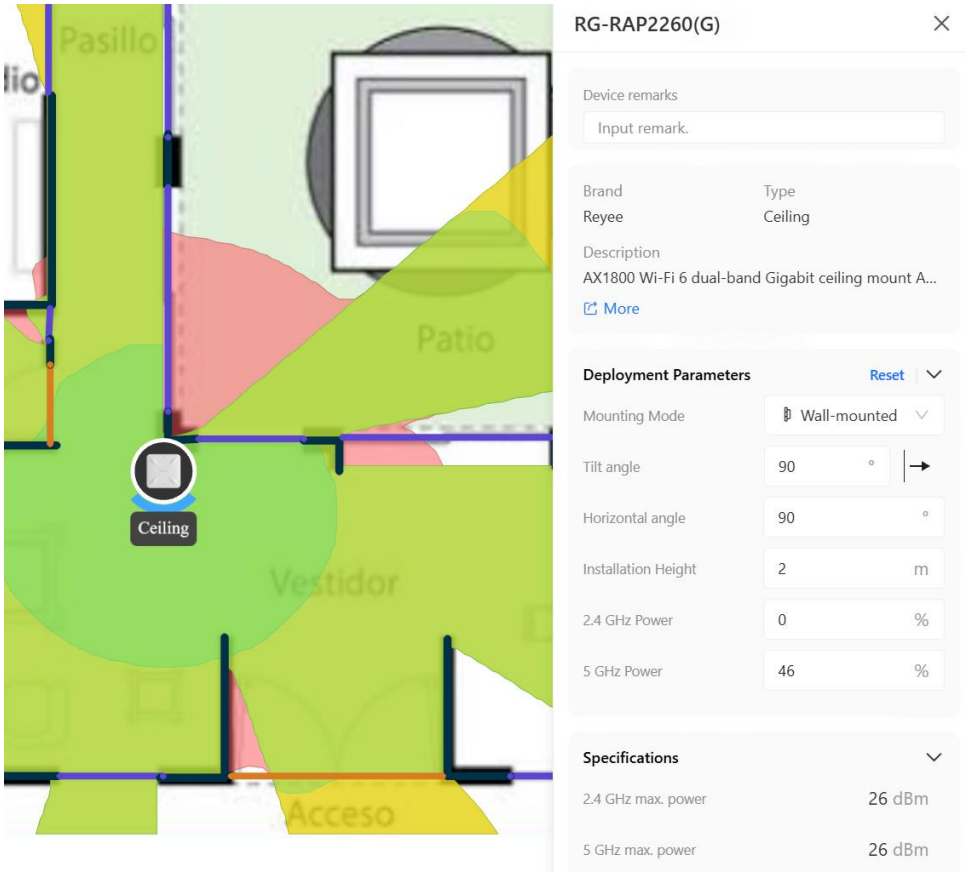
Nota: Una vez importado el proyecto y plano arquitectónico de la planta baja del inmueble, colocamos todas las paredes de acuerdo con la atenuación de los materiales medidos anteriormente. Autoría propia.

Una vez importado el proyecto y el plano arquitectónico de la planta baja del inmueble en la Figura 123, se colocan todas las paredes perimetrales y divisorias asignando estrictamente los coeficientes de atenuación masiva de los materiales medidos en las fases anteriores de la investigación. Esta caracterización asegura que el simulador penalice la señal con la misma severidad que un muro de adobe real.

Definida la matriz estructural de alta densidad, se procede a la configuración del hardware virtual en la Figura 124. Los parámetros del punto de acceso se calibran para emular las condiciones de un despliegue residencial típico, manteniendo el rigor de las pruebas físicas previas.

Figura 124

Configuración de los equipos simulados para la casa histórica.



Nota: Este equipo lo vamos a colocar empotrado a la pared del inmueble a 2 metros de altura, como se haría comúnmente, además de colocar la potencia del router 5GHz en 46%. Autoría propia.

Para esta simulación, el equipo radiante se proyecta con un montaje empotrado a la pared del inmueble a 2 m de altura, replicando el procedimiento que se haría comúnmente en una instalación estándar. De igual manera, es imperativo colocar la potencia del enrutador en la banda de 5 GHz al 46%, garantizando así que los mapas de calor predictivos carezcan de amplificaciones algorítmicas irreales.

4.4.1. *Diagnóstico de Cobertura en Arquitectura Centralizada*

El diagnóstico predictivo inicial evalúa el rendimiento de una arquitectura centralizada dentro de este entorno hostil. Se simula la instalación de un único equipo

emisor buscando teóricamente el mejor alcance posible frente a la mampostería de adobe. El resultado de esta propagación se expone en la Figura 125.

Figura 125

Cobertura de un AP con arquitectura centralizada.



Nota: En la figura se ve como el router se intentó colocar en una zona central del domicilio, como lo haría un ISP en el mejor de los casos, y no en el borde más cercano al poste. Autoría propia.

La matriz térmica evidencia el colapso total de la red inalámbrica centralizada. En la figura se observa cómo el enrutador se intentó colocar en una zona central del domicilio, tal como lo haría un proveedor de servicios en el mejor de los casos, evitando instalarlo en el borde más cercano al poste exterior. A pesar de esta ubicación estratégica, la alta atenuación del adobe bloquea casi por completo el frente de onda de 5 GHz, dejando a la totalidad de las recámaras y la cocina en zonas oscuras sin servicio, demostrando la inviabilidad operativa de un solo nodo en este escenario.

4.4.2. *Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida*

Para resolver la deficiencia masiva de cobertura causada por los muros de adobe, se rediseña la red implementando una arquitectura óptica distribuida. Dado que la señal

inalámbrica es incapaz de penetrar las divisiones físicas, la solución técnica exige transportar los datos mediante fibra óptica pasiva directamente hasta los espacios de mayor demanda, desplegando múltiples nodos en las áreas críticas, visible en la Figura 126.

Figura 126

Cobertura multi AP de una arquitectura distribuida.



Nota: Al ser un entorno muy hostil para frecuencias de 5 GHz, la cobertura es casi total en el inmueble, pero a costa de colocar muchos routers, siempre priorizando áreas comunes y habitaciones, dejando en segundo plano áreas de aseo o limpieza. Es entendible si el cliente desea más o menos equipos según sea el caso. Autoría propia.

Al ser el adobe un entorno sumamente hostil para las frecuencias de 5 GHz, el mapa predictivo demuestra que alcanzar una cobertura casi total en el inmueble es posible, pero a costa de colocar una cantidad elevada de enrutadores. El diseño distribuido asegura niveles óptimos señalizados en verde al priorizar siempre las áreas comunes y las habitaciones, dejando en un segundo plano operativo las áreas de aseo o limpieza. Bajo esta arquitectura flexible, resulta completamente entendible y factible modificar el diseño

si el cliente final desea agregar más o menos equipos según sus necesidades específicas de conectividad por recinto.

4.4.3. *Resultados de las simulaciones*

Para evaluar el impacto electromagnético restrictivo de las paredes de adobe en el entorno patrimonial, se tabularon los porcentajes de propagación térmica obtenidos en la matriz predictiva. La Tabla 15 detalla la comparativa de rendimiento entre el único nodo de la arquitectura centralizada y el despliegue de múltiples puntos de acceso requeridos por la red óptica distribuida.

Tabla 15

Tabla de resultados de las simulaciones de cobertura en casa histórica.

Arquitectura	**> -85 ; < -75 dBm (%)**	**> -75 ; < -60 dBm (%)**	**> -60 dBm (%)**
Centralizada FTTH	61	15	24
Distribuida FTTR	13	19	68
		Diferencia	**+44**

Nota: En la tabla de resultados podemos ver que hubo una mejoría del +44% en la cobertura con una potencia superior a -60 dBm, casi triplica la capacidad de cobertura en el inmueble, pero, agregando otros 4 routers, una eficiencia baja, pero una eficacia alta. Autoría propia.

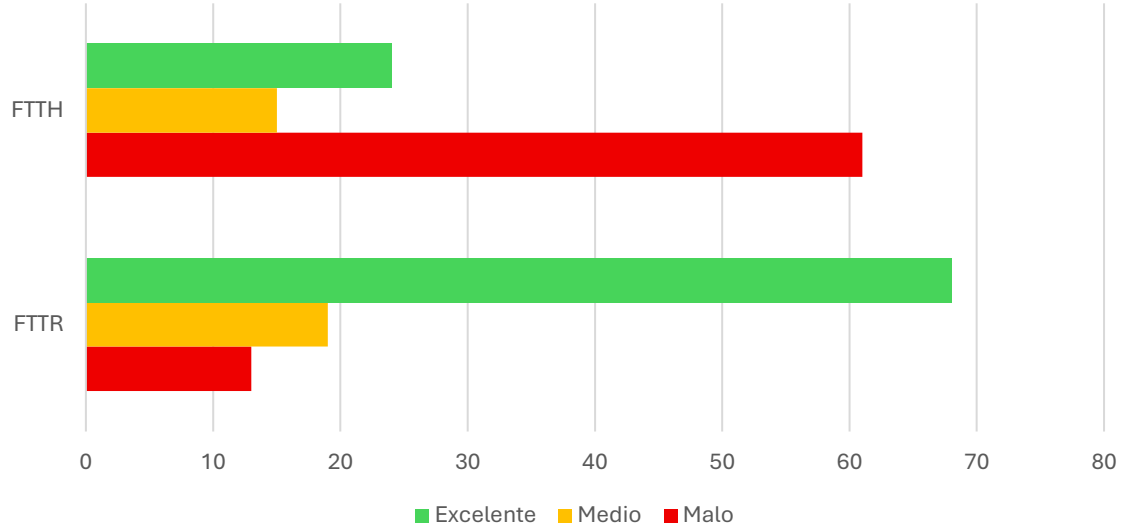
Al examinar los valores expuestos en la tabla de resultados, resalta una notable mejoría del +44% en la zona de cobertura con una potencia superior a -60 dBm. Este incremento casi triplica la capacidad de cobertura óptima en el inmueble frente a la topología tradicional FTTH. Sin embargo, es vital subrayar que este nivel de penetración de señal se logra agregando otros cuatro enrutadores al sistema. Desde la perspectiva del

diseño de redes, esto representa una eficiencia baja debido al alto volumen de hardware requerido para un área relativamente pequeña, pero demuestra una eficacia sumamente alta al resolver con éxito la atenuación masiva generada por la mampostería antigua.

Con el propósito de clarificar el contraste entre ambas implementaciones y su viabilidad frente a materiales de alta densidad constructiva, los porcentajes tabulados se han llevado a un formato de barras proporcionales en la Figura 127.

Figura 127

Grafico de barras de los resultados de la simulación de la casa histórica.



Nota: Cobertura en la casa histórica (Tabla 15). Evidencia el bloqueo de FTTH por el adobe (rojo) y la efectividad de FTTR (verde, >-60dBm). Autoría propia.

La representación visual de los resultados en esta gráfica de barras expone de forma contundente la hostilidad del entorno histórico. La extensa barra roja de la topología FTTH evidencia que, con un solo equipo central, más de la mitad del inmueble queda completamente inoperativo y en zonas de desconexión. Por el contrario, al observar las métricas de la solución FTTR, el color verde pasa a dominar la gráfica, confirmando que la distribución por fibra óptica logra evadir el bloqueo físico de las paredes. Esto comprueba visualmente que, a pesar del sacrificio en eficiencia de equipos, la red

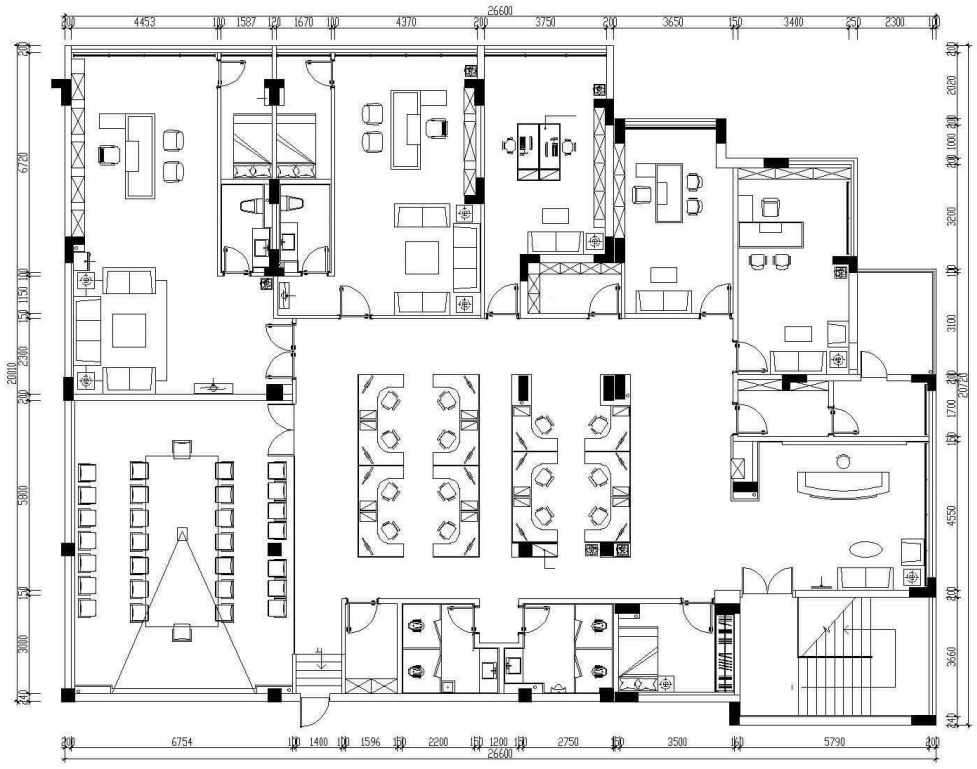
descentralizada es la única vía técnica para garantizar conectividad estable en edificaciones de atenuación extrema.

4.5 Simulación de caso práctico en oficina corporativa

El análisis predictivo se traslada ahora a un entorno de alta complejidad geométrica correspondiente a una oficina corporativa. Este escenario en la Figura 128 representa el máximo desafío de atenuación estructural al contar con múltiples divisiones de trabajo, oficinas cerradas y pasillos, poniendo a prueba la viabilidad de la banda de 5 GHz en entornos de alta densidad.

Figura 128

Plano arquitectónico de un entorno empresarial provisto por Ruijie.



Nota: El plano arquitectónico presentado es provisto por Ruijie para poder hacer uso pleno de su software de simulación. Obtenido de: (Ruijie Networks, 2026)

El diseño planimétrico presentado es provisto por Ruijie Networks para el año 2026, lo cual proporciona una base estructural idónea. El uso de este plano garantiza que

la evaluación del frente de onda electromagnético se ejecute sobre proporciones y distancias operativas plenamente reales.

Para preparar la evaluación espacial de este escenario corporativo, se establecen digitalmente las barreras físicas perimetrales y las divisiones internas del inmueble empresarial, representado en la Figura 129.

Figura 129

Creación de las paredes del inmueble empresarial.



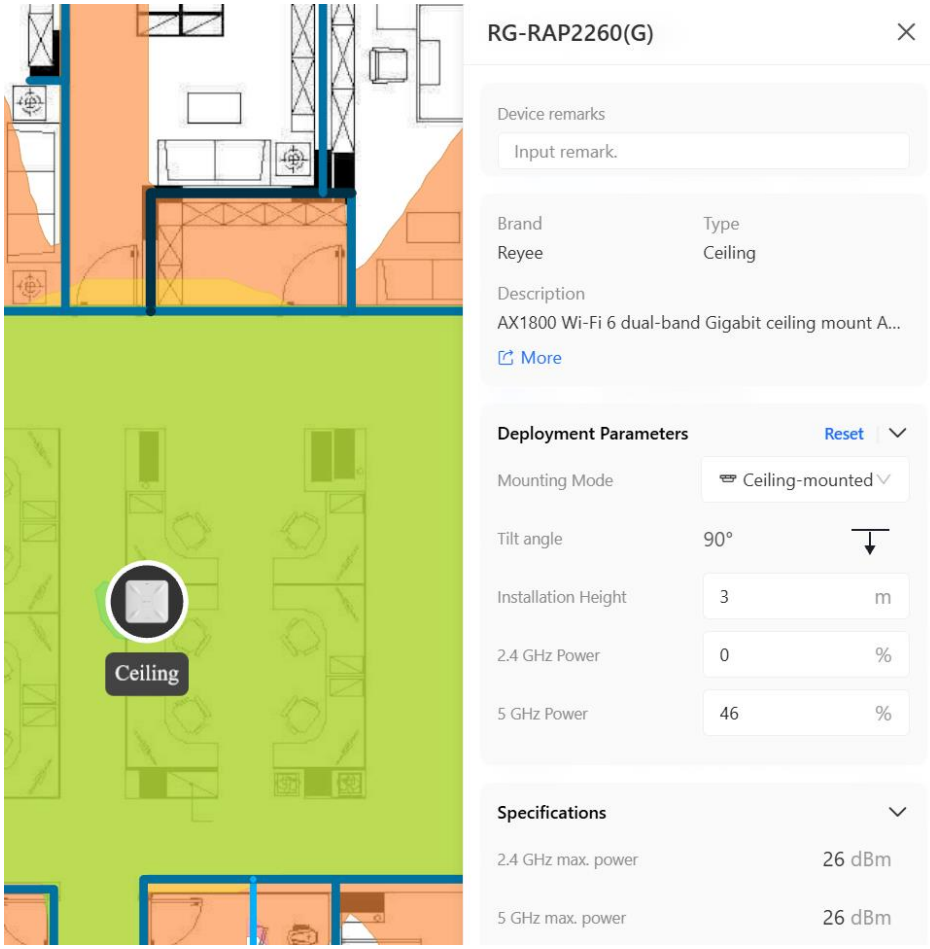
Nota: Una vez importado el proyecto y plano arquitectónico empresarial, colocamos todas las paredes en el inmueble. Autoría propia.

Al colocar todas las paredes del inmueble y asignar sus respectivos índices de atenuación, la matriz estructural queda definida. Esto permite proyectar con precisión la degradación que sufrirá la señal al atravesar las múltiples particiones de los cubículos y despachos cerrados.

La configuración del nodo de transmisión se adapta rigurosamente a las condiciones físicas de una instalación empresarial típica, visible en la Figura 130.

Figura 130

Configuración de los equipos simulados para el entorno empresarial.



Nota: Este equipo lo vamos a colocar en el techo del inmueble a 3 metros de altura, ya que en un entorno empresarial es lo ideal, además de colocar la potencia del router 5GHz en 46%. Autoría propia.

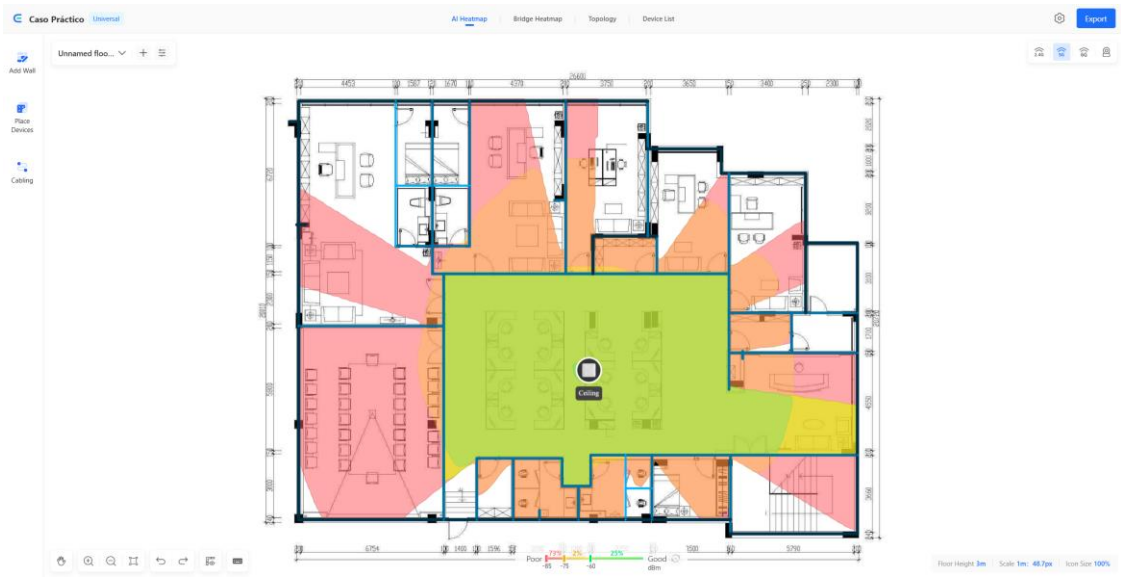
Acorde a las características de un entorno corporativo con techos falsos, el enrutador se proyecta con un montaje cenital a 3 m de altura. La potencia de radiación en 5 GHz se mantiene en el 46% evaluado en ejercicios anteriores para conservar la precisión del modelo frente al hardware real.

4.5.1. *Diagnóstico de Cobertura en Arquitectura Centralizada*

El primer diagnóstico evalúa una topología centralizada, ubicando el único equipo emisor en la zona abierta de cubículos centrales con el propósito de intentar alcanzar los extremos de la oficina, como se ve en la Figura 131.

Figura 131

Cobertura de un AP con arquitectura centralizada.



Nota: Se puede ver en el mapa de calor que un único router en un inmueble tan grande solo sirve para cubrir la zona central, demostrando que lo ideal es que la fibra llegue a cada área. Autoría propia.

Como se evidencia en el mapa de calor, un único enrutador resulta insuficiente en un inmueble corporativo de estas proporciones. La señal logra cubrir óptimamente la zona abierta de trabajo, pero la absorción estructural genera extensas zonas muertas hacia las oficinas perimetrales y salas de juntas. Esto demuestra la necesidad indispensable de llevar la fibra óptica directamente hasta cada área independiente para asegurar la disponibilidad del servicio.

4.5.2. *Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida*

Para solventar las deficiencias de cobertura estructural, se plantea el diseño mediante una arquitectura distribuida FTTR. Esto implica desplegar micro nodos radiantes directamente dentro de las salas de reuniones y oficinas gerenciales, como en la Figura 132.

Figura 132

Cobertura multi AP de una arquitectura distribuida.



Nota: La cobertura es total en el inmueble, priorizando áreas comunes y habitaciones, dejando en segundo plano áreas de aseo, limpieza, o escaleras. Autoría propia.

La matriz térmica resultante demuestra una cobertura total y robusta en el inmueble empresarial. El despliegue FTTR prioriza eficientemente las áreas comunes y habitaciones de trabajo, dejando en un segundo plano estratégico espacios como escaleras, áreas de aseo o limpieza, evidenciando ser la topología definitiva para garantizar estabilidad operativa y máxima capacidad inalámbrica en la empresa.

4.5.3. *Resultados de las simulaciones*

Para evaluar el rendimiento de la señal electromagnética en el entorno corporativo de alta densidad estructural, se recopilaron los porcentajes de cobertura arrojados por el software predictivo. La Tabla 16 expone la comparativa de propagación térmica entre el modelo centralizado tradicional y la solución óptica distribuida, clasificando la intensidad del frente de onda en tres niveles operativos.

Tabla 16

Tabla de resultados de las simulaciones de cobertura en oficina corporativa.

Arquitectura	**> -85 ; < -75 dBm (%)**	**> -75 ; < -60 dBm (%)**	**> -60 dBm (%)**
Centralizada FTTH	73	2	25
Distribuida FTTR	14	12	74
		Diferencia	**+49**

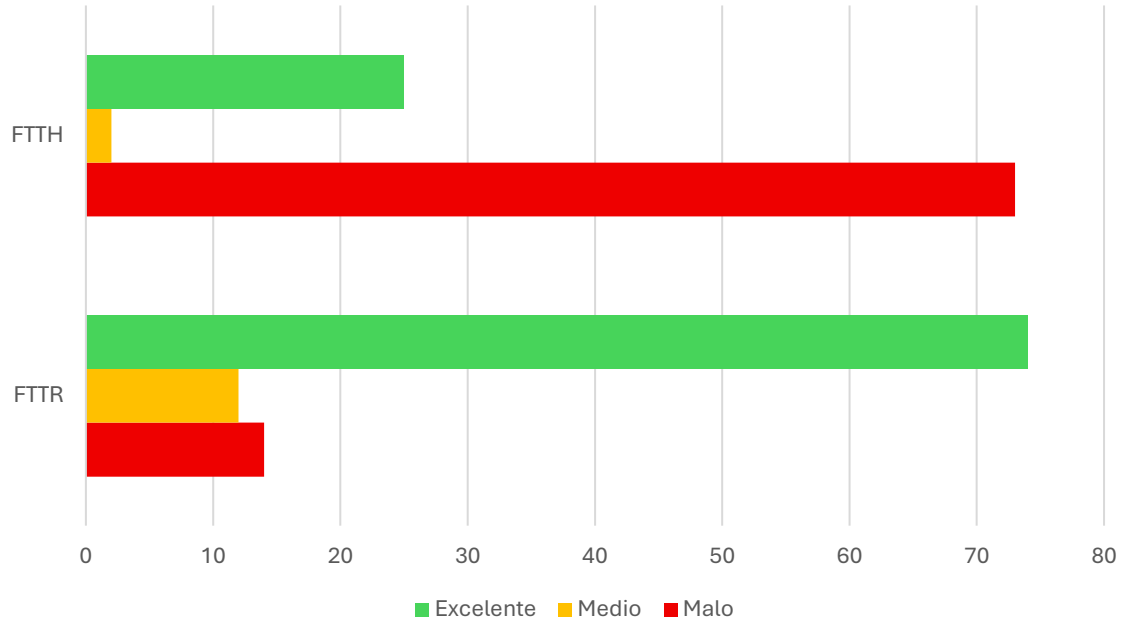
Nota: En la tabla de resultados podemos ver que hubo una mejoría del +49% en la cobertura con una potencia superior a -60 dBm, casi el triple en comparación, y colocando 8 routers extra, al ser un caso empresarial, no se debe escatimar, y es más importante la eficacia que la eficiencia absoluta. Autoría propia.

Al analizar los datos de la tabla de resultados, se observa una mejora sustancial del +49% en la zona de cobertura con una potencia superior a -60 dBm. Este incremento casi triplica la capacidad útil de la red en comparación con el único enrutador centralizado. Para alcanzar este nivel de excelencia métrica, la arquitectura FTTR requirió la colocación de ocho nodos radiantes adicionales distribuidos estratégicamente. Al tratarse de un caso netamente empresarial, el presupuesto no se debe escatimar en infraestructura de telecomunicaciones. En este tipo de despliegues profesionales con alta

concurrencia, es fundamental comprender que garantizar la eficacia del servicio ininterrumpido es mucho más importante que buscar una eficiencia absoluta basada en el ahorro de equipos.

Figura 133

Grafico de barras de los resultados de la simulación de la oficina corporativa.



Nota: Cobertura en la oficina corporativa (Tabla 16). FTTH muestra alta deficiencia (rojo), mientras FTTR alcanza una señal óptima predominante (verde, >-60dBm). Autoría propia.

La representación gráfica de la Figura 133 de los resultados de la oficina corporativa ilustra categóricamente el colapso del modelo tradicional frente a las divisiones internas. En el despliegue FTTH, la extensa barra roja advierte que casi tres cuartas partes del inmueble carecen de señal útil, limitando severamente la operatividad de los empleados en las áreas cerradas.

4.6 Simulación de caso práctico en hotelería de cabañas o glamping

El último escenario de validación predictiva aborda un entorno de hotelería horizontal tipo glamping. Este modelo de negocio presenta un desafío de propagación electromagnética totalmente distinto a los casos corporativos o residenciales, ya que la dificultad principal no radica en la densidad estructural interna, sino en la gran dispersión geográfica de las unidades habitacionales a lo largo de un terreno a la intemperie.

Figura 134

Vista satelital del terreno de un hotel de glamping.

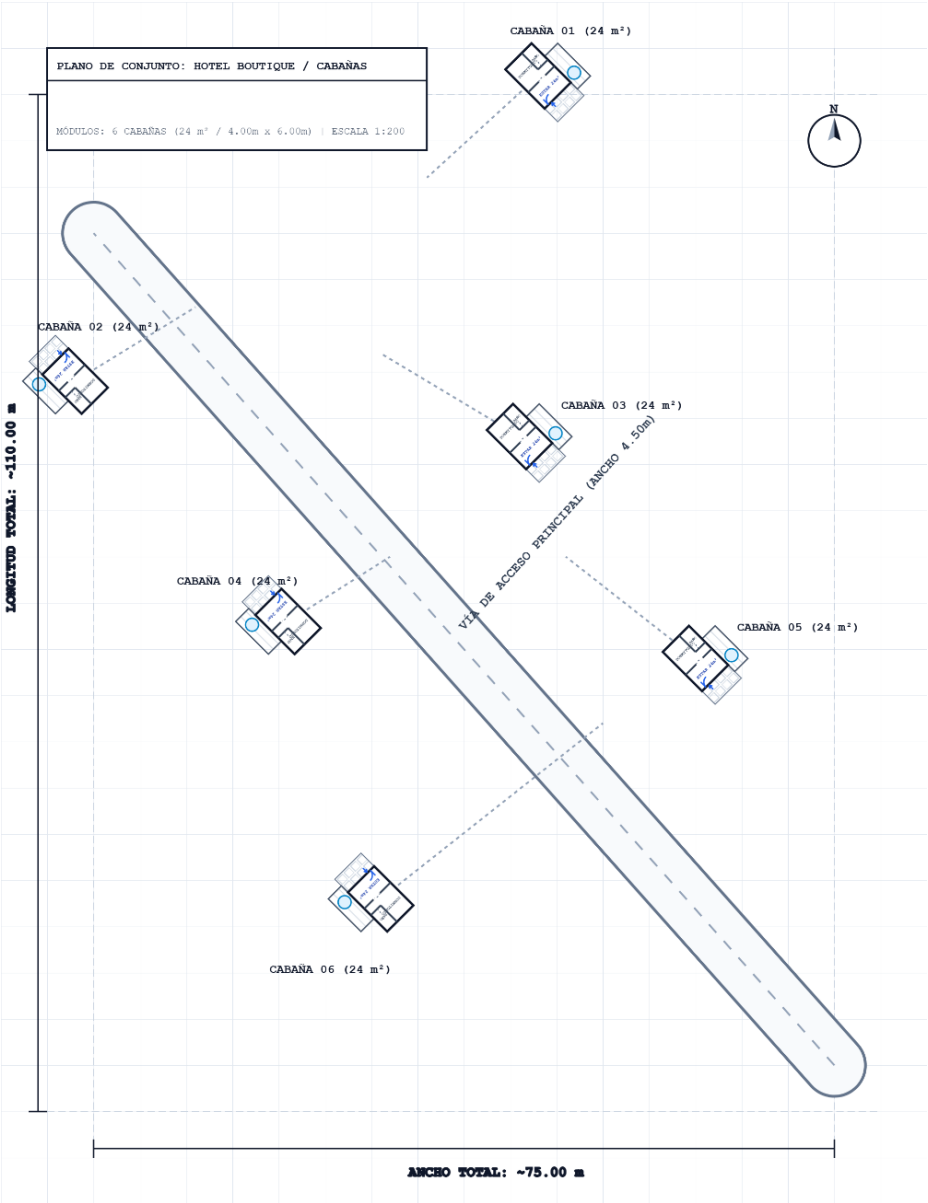


Nota: La figura representa una vista aérea del entorno donde se hará la simulación en cada cabaña con un plano genérico. Obtenido de: (Instagram, 2026).

La vista satelital en la Figura 135 establece el contexto macroscópico del complejo turístico, basándose en un diseño de distribución espacial. Esta perspectiva evidencia la considerable separación física entre los módulos habitacionales, anticipando la inviabilidad de utilizar enlaces inalámbricos directos en malla para conectar las cabañas entre sí debido a la pérdida de propagación en el espacio libre.

Figura 135

Plano arquitectónico de un terreno usado para hotel de glamping.



Nota: El plano arquitectónico del terreno muestra las dimensiones de entorno y las cabañas que nos sirve para hacer la simulación del hotel de glamping. Autoría propia.

El diagrama topográfico de autoría propia define los límites del predio y cuantifica las distancias de interconexión. Estos valores numéricos constituyen las variables críticas para modelar la infraestructura de transporte y evaluar si las distancias superan los estándares normativos de las redes de cobre.

Antes de proyectar la red general del complejo, es indispensable aislar y caracterizar la envolvente física de un módulo habitacional base de $24\ m^2$, que se representa en la Figura 136.

Figura 136

Creación de las paredes de la cabaña de glamping.



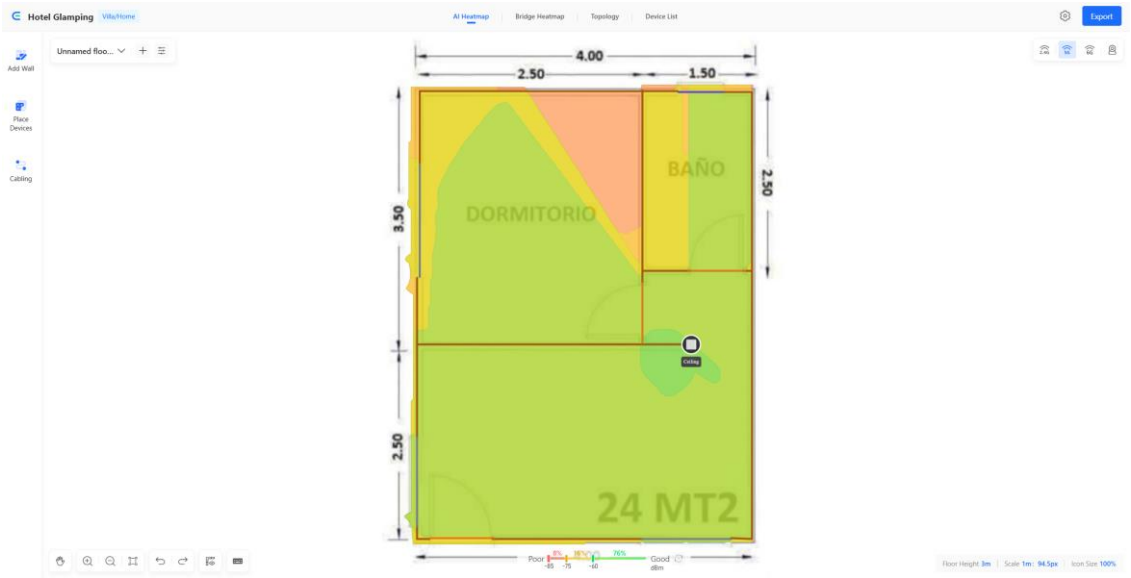
Nota: Importación del plano arquitectónico de la cabaña de glamping genérica que se ubican distantes una de otra en el terreno, y se crean sus paredes. Autoría propia.

Al definir la geometría arquitectónica de esta celda unitaria, se garantiza que el análisis predictivo contabilice rigurosamente la atenuación específica que sufrirá la señal desde el interior hacia el exterior, aislando el comportamiento de cada nodo radiante de forma independiente.

El diagnóstico a nivel micro se ejecuta desplegando un único enrutador dentro de esta cabaña base para validar la suficiencia operativa en el área de descanso.

Figura 137

Configuración de los equipos simulados para la cabaña de glamping.



Nota: Este equipo lo vamos a colocar en el techo del inmueble a 3 metros de altura, y la potencia del router 5GHz en 46%, con esto logramos tener una cobertura total de la cabaña con un solo router. Autoría propia.

La matriz térmica de la Figura 137 corrobora que un solo punto de acceso operando al 46% de potencia en la banda de 5 GHz satisface íntegramente las necesidades de conectividad del habitáculo. Al confirmar que la celda interna goza de estabilidad y cobertura óptima identificada en verde, el enfoque de la ingeniería de red se traslada exclusivamente a resolver el medio de transporte de datos entre los módulos.

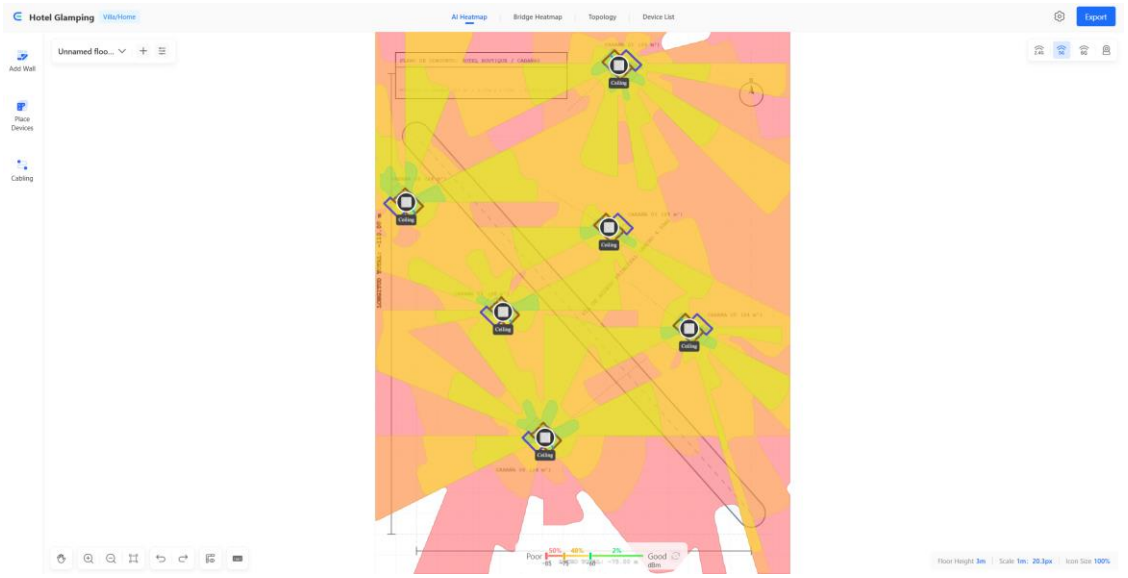
4.6.1. *Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida*

Para este caso de estudio se omitió el estudio de una red centralizada. En un despliegue turístico convencional, la distribución de señal desde el módem principal hacia los nodos secundarios depende de enlaces locales Ethernet de cobre. Sin embargo, las enormes distancias de separación evidenciadas en el plano topográfico superan el límite físico y normativo de 100 m estipulado por el estándar de cableado estructurado ANSI/TIA-568 (Telecommunications Industry Association, 2016). Por este motivo categórico, el análisis

procede directamente a la implementación de la arquitectura distribuida, proyectando tendidos de fibra óptica tipo drop, compartiendo los postes de tendido eléctrico hacia cada cabaña, y al llegar a la cabaña, se conecta a la roseta, y luego a la ONT con fibra invisible.

Figura 138

Cobertura multi AP de una arquitectura distribuida.



Nota: En la simulación se puede ver que con un router se abarca toda una cabaña, pero estas al ser muy distantes, superan los 100 metros máximos que recomienda la normativa de cableado estructurado ANSI/TIA-568, aunque en la práctica esto no se cumpla y por eso el rendimiento de FTTH es reducido en estos casos, por eso la opción más recomendable es usar fibra óptica. Autoría propia.

El mapa predictivo de conjunto visualizado en la Figura 138 ratifica a la tecnología FTTR como la única solución factible para infraestructuras turísticas dispersas. Al sustituir el cableado de cobre por enlaces de fibra óptica transparente hasta cada habitación, se elimina el cuello de botella físico de la distancia. El diagnóstico confirma que cada cabaña obtiene una cobertura verde óptima generada por su propio nodo dedicado. El transporte mediante medios ópticos pasivos anula la atenuación del espacio

libre exterior, garantizando una excelencia operativa y un ancho de banda Gigabit simétrico sin degradación en toda la extensión topográfica del glamping.

4.6.2. *Resultados de las simulaciones*

Para finalizar el análisis cuantitativo de los escenarios, se recopilaron los datos predictivos del complejo turístico de glamping. La Tabla 17 presenta los niveles de cobertura obtenidos por la infraestructura distribuida en el interior de las unidades y su impacto métrico sobre la extensión total del terreno exterior.

Tabla 17

Tabla de resultados de las simulaciones de cobertura en el hotel de glamping.

Arquitectura	**> -85 ; < -75 dBm (%)**	**> -75 ; < -60 dBm (%)**	**> -60 dBm (%)**
Centralizada FTTH	-	-	-
Distribuida FTTR	8	16	76
Terreno total	50	48	2

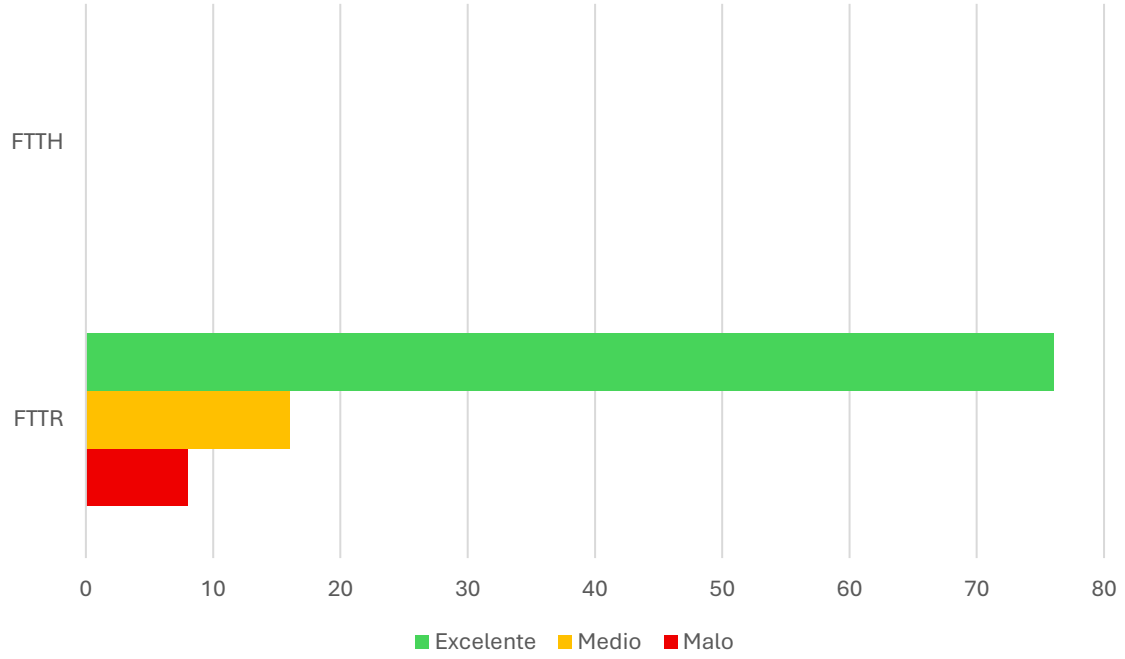
Nota: Aquí no hay comparativa, ya que la única opción viable por normativa es FTTR debido a las largas distancias entre nodos. Autoría propia.

Al revisar los datos expuestos, destaca inmediatamente la ausencia de métricas para la arquitectura centralizada. En este escenario particular no hay comparativa posible, ya que la única opción viable por normativa técnica de cableado es la topología FTTR debido a las largas distancias físicas entre los nodos. Los resultados de la red óptica distribuida confirman una eficacia del 76% en el umbral de señal superior a -60 dBm para el interior de los módulos habitacionales. Adicionalmente, la tabla indica que el terreno total presenta una señal de excelencia de apenas el 2%. Este valor macroscópico bajo es un comportamiento esperado y correcto, puesto que el diseño de ingeniería busca

concentrar la radiación exclusivamente dentro de las áreas de descanso y no desperdiciar capacidad irradiando espacios abiertos deshabitados.

Figura 139

Grafico de barras de los resultados de la simulación del hotel de glamping.



Nota: Cobertura porcentual Wi-Fi 6 del glamping (Tabla 17). Verde (>-60dBm), amarillo (-75 a -60dBm) y rojo (malo). FTTH se omite por inviabilidad normativa en distancias largas. Autoría propia.

La representación de los resultados de la simulación en la Figura 139, el hotel de glamping en esta gráfica de barras expone el contraste más drástico de toda la investigación. El espacio correspondiente a la red FTTH se encuentra completamente en blanco, ratificando visualmente su inviabilidad normativa para interconectar edificaciones lejanas. En contraparte, la métrica de la arquitectura FTTR exhibe un claro dominio de la franja verde. Esto demuestra de forma definitiva que desplegar múltiples puntos de acceso alimentados individualmente por hilos de fibra óptica es la respuesta

técnica absoluta para garantizar servicios Gigabit de alta disponibilidad en proyectos turísticos de gran extensión horizontal.

4.7 Análisis de resultados y validación de la implementación de FTTR

Para consolidar la investigación y ofrecer una conclusión técnica sólidamente fundamentada, se procedió a recopilar y contrastar todos los resultados de las simulaciones realizadas a lo largo de los capítulos previos. La Tabla 18 presenta una matriz integral de validación de factibilidad, diseñada específicamente para evaluar el costo y beneficio real de la arquitectura distribuida. En la presente tabla se recopilaron todos los valores de señal obtenidos en los diagnósticos, extrayendo inicialmente una proporción de ganancia al dividir el porcentaje de cobertura óptima superior a -60 dBm de la red FTTR frente a la red FTTH. Posteriormente, este cociente de señal se dividió para el múltiplo del incremento de hardware, resultante de relacionar la cantidad de enrutadores requeridos por escenario. El cálculo matemático final arroja un valor de referencia preciso que nos podría indicar con rigor científico si realizar la implementación de una infraestructura FTTR en un inmueble específico es verdaderamente viable.

Tabla 18

Tabla de validación de factibilidad de las simulaciones de diferentes escenarios.

Escenario de simulación	**FTTR / FTTH > -60 dBm**	**Proporción**	**FTTR / FTTH (n.º Routers)**	**Proporción de routers**	**Factibilidad (% / n.º)**
Departamento	86 / 83	**1.04**	3 / 1	**3**	1.04 / 3
				Viabilidad	**0.35**
Casa residencial	56.5 / 11	**5.14**	4 / 2	**2**	5.14 / 2

				Viabilidad	**2.57**
Casa histórica	68 / 24	**2.83**	5 / 1	**5**	2.83 / 5
				Viabilidad	**0.57**
Oficinas	74 / 25	**2.96**	9 / 1	**9**	2.96 / 9
				Viabilidad	**0.33**
Hotel glamping	76 / 1	**76**	6 / 1	**6**	76 / 6
				Viabilidad	**12.67**

Nota: En la presente tabla se recopilo todos los resultados de las simulaciones realizadas, se obtuvo una proporción de los valores de señal obtenidos en FTTH y FTTR, que se divide para el múltiplo del incremento de routers en diferentes escenarios, para obtener un valor de referencia que nos podría indicar si realizar la implementación de FTTR en un inmueble es viable. Autoría propia.

Al examinar exhaustivamente los índices de viabilidad expuestos en la matriz, emergen conclusiones críticas sobre la aplicabilidad práctica de la tecnología óptica distribuida.

- En primer lugar, el escenario del departamento pequeño arroja una factibilidad sumamente baja del 35%, confirmando que el despliegue de múltiples nodos no compensa la mínima ganancia de cobertura en espacios residenciales reducidos.
- Por el contrario, la casa residencial de dos plantas destaca indudablemente como el escenario óptimo para esta tecnología, alcanzando un índice sobresaliente de 257%. En este inmueble particular, duplicar la cantidad

de hardware multiplicó por cinco la penetración de la señal, demostrando una eficiencia operativa absoluta.

- Para los entornos de la casa histórica y las oficinas corporativas, los índices decaen drásticamente a 57% y 33% respectivamente. Aunque matemáticamente la viabilidad parece desfavorable debido a la necesidad masiva de añadir hasta nueve equipos extra, es imperativo recordar las premisas establecidas en sus respectivos análisis individuales.

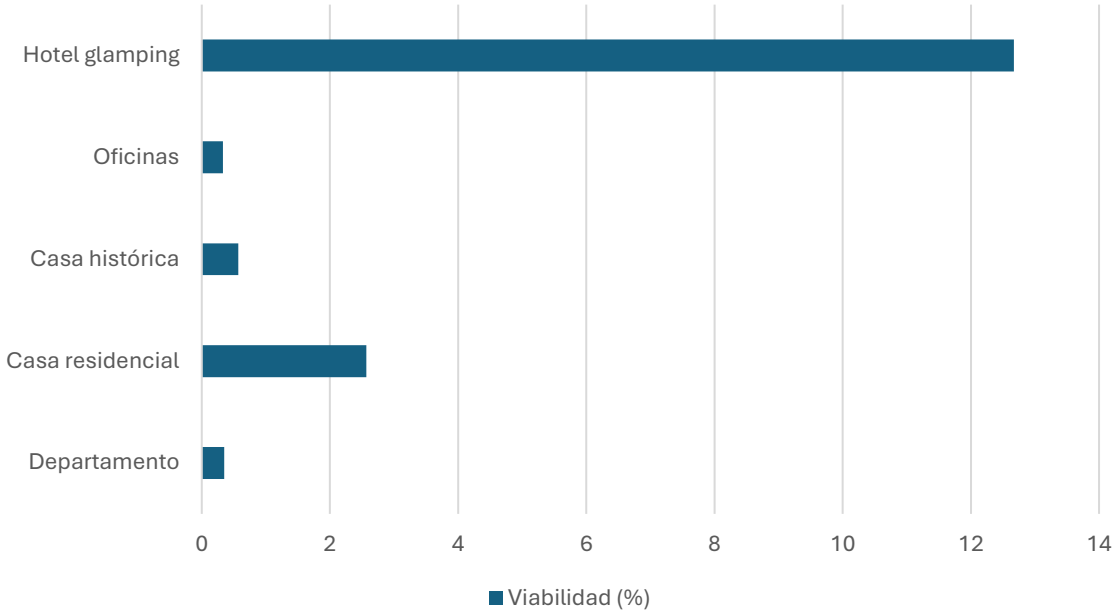
En despliegues empresariales o en edificaciones patrimoniales con atenuación extrema, la métrica predominante siempre debe ser la eficacia del servicio ininterrumpido. En estos entornos no se debe escatimar en infraestructura, justificando la inversión superior.

- Finalmente, el caso del hotel de glamping representa un hito técnico singular dentro del estudio. Dado que la normativa internacional de telecomunicaciones prohíbe cubrir esas vastas extensiones de terreno exterior con enlaces locales de cobre, el divisor correspondiente a la cobertura centralizada es completamente nulo. Esto convierte a la arquitectura FTTR en una solución de factibilidad absoluta, al erigirse como el único estándar viable para interconectar los nodos radiantes.

Con el propósito de sintetizar este extenso análisis numérico y ofrecer una perspectiva visual clara para la toma de decisiones gerenciales o de ingeniería, los índices de viabilidad de cada escenario evaluado fueron proyectados en un diagrama estadístico de evaluación comparativa.

Figura 140

Grafica de la validación de factibilidad de las simulaciones de diferentes escenarios.



Nota: En esta gráfica se muestra una comparativa de la viabilidad que hay en cada escenario planteado. Autoría propia.

En la Figura 140 se muestra una comparativa directa de la viabilidad real que existe en cada escenario arquitectónico planteado a lo largo de la tesis. Las barras correspondientes al departamento, la casa histórica y las oficinas se mantienen en los niveles inferiores de la escala, evidenciando gráficamente el alto costo en hardware requerido frente a los beneficios netos de propagación electromagnética. En contraste, la barra de la casa residencial resalta de forma prominente en el entorno urbano, ratificando ser el hábitat natural y de mayor retorno de inversión para el despliegue de las soluciones FTTR domésticas.

Una mención especial y de carácter técnico requiere la representación de la columna correspondiente al complejo turístico. El caso del hotel es absolutamente especial ya que, al no tener competencia factible en topologías centralizadas FTTH por restricciones de distancia, se vuelve una opción, absolutamente factible.

Esta representación estadística finaliza el proceso de validación del proyecto, demostrando categóricamente que llevar la fibra óptica transparente hasta cada habitación no es una solución genérica aplicable arbitrariamente a cualquier espacio. Por el contrario, se consolida como una herramienta de ingeniería de máxima precisión, cuya implementación debe planificarse y justificarse rigurosamente mediante un análisis profundo que pondere las dimensiones del predio, la densidad de los obstáculos estructurales y la criticidad operativa de la red.

5. Conclusiones

El análisis de factibilidad confirma que la arquitectura de fibra óptica distribuida no es una solución universal para todos los entornos. Su implementación resulta económicamente ineficiente en escenarios domiciliarios de dimensiones reducidas (departamentos pequeños), donde la ganancia de cobertura es marginal. Sin embargo, se consolida como la tecnología definitiva y de mayor retorno de inversión para viviendas multinivel y complejos arquitectónicos extensos.

El modelo técnico diseñado en este trabajo constituye una herramienta integral y una guía estructurada para los ISP. Permite a los técnicos de campo y planificadores de red comprender y ejecutar correctamente diferentes tipos de instalación de redes FTTR, abarcando desde la selección del medio físico adecuado hasta la configuración lógica para garantizar un roaming transparente.

La metodología de calibración cruzada implementada en el simulador Ruijie Reyee Cloud demostró ser de altísima fiabilidad técnica. Al obtener un valor de diferencia de apenas -1.27 dBm entre las pruebas de atenuación por objetos inmuebles reales y los proyectados digitalmente, se certifica que el software es una herramienta sumamente precisa y fiable para el diseño predictivo, evitando el sobredimensionamiento de hardware en proyectos de telecomunicaciones.

Las pruebas experimentales controladas evidencian la vulnerabilidad crítica del estándar WiFi 6 (en la banda de 5 GHz) frente a la mampostería densa. Materiales de construcción tradicionales, particularmente los muros de adobe de 50 cm, generan caídas de potencia extremas de hasta -32.2 dBm, colapsando por completo los enlaces centralizados. Esto hace que la penetración óptica pasiva sea obligatoria en edificaciones patrimoniales o rurales.

En entornos de despliegue horizontal disperso, como la hotelería tipo glamping, se concluye que el cableado estructurado tradicional queda obsoleto debido a la normativa internacional (ANSI/TIA-568) que prohíbe enlaces de cobre superiores a 100 metros. En estos escenarios, FTTR es la única arquitectura capaz de transportar anchos de banda Gigabit de manera inmune a las interferencias electromagnéticas exteriores y sin restricciones de distancia geométrica.

6. Recomendaciones

Se recomienda a los Proveedores de Servicios de Internet (ISP) emergentes reestructurar sus modelos de comercialización, migrando de la simple venta de "ancho de banda en bruto" hacia la oferta de paquetes de "Calidad de Experiencia (QoE)". La implementación de FTTR debe presentarse como un servicio Premium que garantiza velocidades simétricas en cada rincón del hogar, reduciendo significativamente los costos de soporte técnico por quejas de lentitud.

Para despliegues en interiores de viviendas ya construidas, se sugiere estandarizar el uso exclusivo de fibra óptica invisible que cumpla con la norma ITU-T G.657.B3. Su alta tolerancia a curvaturas extremas (hasta 5 mm) y su fijación térmica permitirán a los técnicos evadir la necesidad de obras civiles invasivas y canaletas antiestéticas, asegurando la aceptación inmediata por parte del cliente final.

Es imperativo que los planificadores de red adopten herramientas de simulación predictiva (como Ruijie Reyee Cloud) como paso previo a cualquier instalación a gran escala. Homologar la potencia virtual con el hardware real permitirá diseñar mapas de calor que definan la cantidad exacta y la ubicación estratégica de los nodos ópticos (Slave ONTs), optimizando el gasto de capital (CapEx).

Dado que la arquitectura FTTR introduce enlaces de láser activo directamente en áreas privadas (como dormitorios), se recomienda implementar rigurosos protocolos de

seguridad ocular. Los técnicos deben instalar rosetas ópticas con obturadores automáticos (Auto-shutter) y colocar la señalética internacional de riesgo láser, educando al usuario final sobre la manipulación de la fibra pasiva.

Se incentiva a las instituciones académicas y a futuros investigadores a tomar este modelo técnico como línea base para evaluar el comportamiento de las redes de próxima generación, específicamente el estándar Wi-Fi 7 (802.11be) operando en la banda de 6 GHz. Al utilizar longitudes de onda aún más cortas, la atenuación estructural será más severa, lo que reafirmará la necesidad ineludible de la infraestructura FTTR.

7. Bibliografía

AFL Hyperscale. (2026). *One-Click Cleaners*. https://www.aflhyperscale.com/product/one-click-cleaners/

Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones. (2016). *Norma Técnica para el Despliegue de Redes Físicas*. https://www.arcotel.gob.ec

Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL). (2020). *Carta de Derechos de los Usuarios de Servicios de Telecomunicaciones*.

Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL). (2022). *Resolución ARCOTEL-2022-0455: Requisitos técnicos para instalaciones de redes ópticas*.

Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL). (2023a). *Indicadores de calidad para servicios fijos de acceso a Internet*.

Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL). (2023b). *Plan Nacional de Frecuencias 2023-2027*.

Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL). (2024). *Reglamento para la prestación del servicio de acceso a Internet fijo y móvil*.

Agrawal, G. P. (2021). *Fiber-optic communication systems* (5a ed.). Wiley.

Aguilar, R. (2025). *WiFi 7: qué es, para qué sirve y todas las novedades del nuevo estándar WiFi*. https://www.xataka.com/nuevo/nuevo-wifi-7-informacion

Alliance, W.-F. (2021). *Discover Wi-Fi 6: The next generation of Wi-Fi*. https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-6

Alliance, W.-F. (2022). *Wi-Fi Alliance Overview*. https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-alliance

Alliance, W.-F. (2023). *Wi-Fi CERTIFIED WPA3*. https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/security

ANSI. (2022). *Z136.1: Safe Use of Lasers*. American National Standards Institute.

ARCOTEL. (2016). *Norma Técnica para el Despliegue de Redes Físicas y Compartición de Infraestructura*.

Barros, R., & Gutiérrez, L. (2021). Estrategias de expansión para proveedores de servicios de internet locales en América Latina. *Revista Iberoamericana de Tecnología en Infraestructura*, *17*(2), 45–60. https://doi.org/10.32745/ritinfra.2021.17.2.45

Bellalta, B. (2019). IEEE 802.11ax: High-efficiency WLANs. *IEEE Wireless Communications*, *26*(6), 130–137. https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800503

Bonelinks. (2023). *FTTR Technology: Revolutionizing Home Networks For High-Speed Connectivity*. https://www.bonelinks.com/fttr-fiber-to-the-room-technology/

Camps-Mur, D., Cano, C., & Bellalta, B. (2021). The evolution of Wi-Fi: From 802.11n to 802.11ax and beyond. *IEEE Communications Magazine*, *59*(4), 54–60. https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000407

Chanclou, P., & others. (2022). *FTTR: Fiber to the Room – Fiber inside the customer premises*.

Chen, M., & Wang, F. (2023). FTTR-Based In-Home Network Architecture for Ultra-High-Bandwidth Residential Services. *IEEE Access*, *11*, 15324–15337. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3248756

Cisco. (2020). *Wi-Fi 6 (802.11ax) White Paper*. https://www.cisco.com/c/dam/en/us/products/wireless/wi-fi-6-white-paper-c11-741429.pdf

Cisco Systems Inc. (2023). *Wi-Fi 8: What to Expect from the Next Generation of Wireless*.

Cope, B. (2021). Processing Requirements for the Lifecycle of 8K Video Content in IoT Applications. *Information Display*, *37*(3), 25–29. https://doi.org/10.1002/MSID.1213

Costa, V. A., & Arlego, M. (2013). El rol de la historia de las ciencias en la enseñanza del Cálculo Vectorial en carreras de Ingeniería. *ResearchGate*.

Ctube. (2026). *El papel de los tubos conductores de PVC en la industria eléctrica*. https://www.pvcconduitmanufacturer.com/es/el-papel-de-los-tubos-conductores-de-pvc-en-la-industria-electrica/

Delgado, A. (2024). *Yoigo ya ofrece "Fibra hasta la habitación" FTTR en sus tarifas de Internet*. https://www.geeknetic.es/Noticia/32164/Yoigo-ya-ofrece-Fibra-hasta-la-habitacion-FTTR-en-sus-tarifas-de-Internet.html

Dipol. (2026). *Visual Fault Locator VFL (10mW) L5935*. https://www.dipolnet.com/visual_fault_locator_vfl_10mw_L5935.htm

ETSI. (2020). *Fixed 5th Generation Network (F5G); F5G Use Cases Release #1*. European Telecommunications Standards Institute.

Facilisimo. (2026). *Planos de casas de adobe modernas*. https://decoracion.facilisimo.com/d/planos-de-casas-de-adobe-modernas_2566473.html

Fluke Networks. (2026). *Pérdida de retorno*. https://es.flukenetworks.com/blog/cabling-chronicles/return-loss

FTTH Fiber Optic. (2026). *Comprendiendo el cable de fibra óptica invisible FTTR*. https://ftthfiberoptic.com/es/understanding-fttr-invisible-fiber-optic-cable/

FTTX Equipment. (2026). *What is Optical Return Loss (ORL)?* https://www.fttx-equipment.com/news/what-is-optical-return-loss-orl-45143907.html

Gast, M. S. (2018). *802.11ac: A Survival Guide*. O'Reilly Media.

Gast, M. S. (2023). *802.11ax WiFi 6: A Survival Guide*. O'Reilly Media.

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

Gómez, L., & Ortiz, C. (2022). Desempeño de redes WiFi 6 en interiores: análisis de pérdida y cobertura en viviendas modernas. *Revista de Redes Inalámbricas*, *14*(2), 55–67. https://revistas.udla.edu.ec/index.php/redes/article/view/limitaciones-wifi6

Hecht, E. (2019). *Optics* (5a ed.). Pearson Education.

Holight Optic. (2026). *Adaptador dúplex SC con obturador automático metálico*. https://www.holightoptic.com/es/producto-de-fibra-%C3%B3ptica/Adaptador-d%C3%BAplex-SC-con-obturador-autom%C3%A1tico-met%C3%A1lico/

Hossain, Md. Z., & others. (2019). Advanced QoS and Traffic Management in Next-Generation WLANs using VLANs and Multi-SSID Technologies. *IEEE Access*, *7*, 15678–15690.

Huawei. (s/f). *Huawei FTTR F30 Solution*.

Huawei Technologies. (2024). *FTTR Solution Installation and Commissioning Guide*. https://support.huawei.com

Huawei Technologies Co. Ltd. (s/f-a). *Huawei OptiXstar K153*.

Huawei Technologies Co. Ltd. (s/f-b). *Huawei OptiXstar V163*.

Huawei Technologies Co. Ltd. (2021). *FTTR (Fiber to the Room) Technical White Paper*.

Huawei Technologies Co., Ltd. (2021). FTTR: Fiber to the Room White Paper. *Global Optical Network Forum*. https://www.huawei.com

Huawei Technologies Co. Ltd. (2023). *FTTR: Leading the Future of Home Network with Fiber and WiFi 6*.

IEEE Standards Association. (2020). *IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*.

IEEE Standards Association. (2024). *802.11be and Beyond: Preparing Wi-Fi for the Next Generation*.

Instagram. (2026). *Publicación de glamping en Instagram*. https://www.instagram.com/p/Cs7Myp3rg4i/

International Electrotechnical Commission. (2014). *Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements* (Número IEC 60825-1:2014). IEC.

International Telecommunication Union. (2012). *Characteristics of a bend-loss insensitive single-mode optical fibre and cable* (Número G.657). https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657

International Telecommunication Union. (2016). *Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable*. https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657-202408-I/en

International Telecommunication Union. (2020). *ID numbering system for optical fibre infrastructure*.

International Telecommunication Union. (2021). *Optical fibre cables for indoor applications*. https://www.itu.int/rec/T-REC-L.110

Jorge García. (2012, noviembre 7). *Reflexión y refracción de la luz en transmisiones de fibra óptica*. SEAS. https://www.seas.es/blog/automatizacion/reflexion-y-refraccion-de-la-luz-en-transmisiones-de-fibra-optica/

Josh. (2023). *¿Qué necesitas para tener un roaming WiFi fluido y que no se corte la conexión?* https://bandaancha.eu/articulos/que-necesitas-tener-roaming-wifi-fluido-10499

Keiser, G. (2021). *Optical Fiber Communications* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Keiser, G. (2022). *Optical Fiber Communications* (6a ed.). Springer.

Khodr, E., Issa, J., & Kanj, M. (2022). Analysis of Wi-Fi 6 performance in complex indoor environments. *International Journal of Wireless Information Networks*, *29*(1), 21–31. https://doi.org/10.1007/s10776-021-00511-y

Kurose, J. F., & Ross, K. W. (2021). *Redes de computadoras: un enfoque descendente basado en Internet* (8a ed.). Pearson.

Larry FS. (2024a). *FTTR: High-Speed Internet for Homes and Businesses*. https://www.fs.com/blog/fttr-highspeed-internet-for-homes-and-businesses-4336.html

Larry FS. (2024b). *FTTR Solution: Build a Full-Fiber Smart Home*.

Lin, W., Chen, X., & Zhang, H. (2022). Next-Generation Home Optical Networks: Evolution from FTTH to FTTR. *Journal of Optical Communications and Networking*, *14*(8), 652–661.

López, J. C. (2020). *Cobertura WiFi: estos son los obstáculos que reducen el alcance de tu red inalámbrica y así puedes evitarlos*. https://www.xataka.com/especiales/cobertura-wifi-estos-obstaculos-que-reducen-alcance-tu-red-inalambrica-asi-puedes-evitarlos

Mamakos, L., Lidl, K., Evarts, J., Carrel, D., Simone, D., & Wheeler, R. (1999). *A Method for Transmitting PPP Over Ethernet (PPPoE)* (Número 2516). https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2516

Mammeri, Z., & others. (2023). Performance Evaluation and Architecture of PPPoE in Broadband Access Networks. *Journal of Network and Computer Applications*, *192*, 103175.

Microsoft. (2024). *Planeación de red y ajuste del rendimiento para Microsoft 365*. https://learn.microsoft.com/es-es/microsoft-365/enterprise/office-365-network-mac-perf-overview?view=o365-worldwide

Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL). (2023). *Lineamientos técnicos para el despliegue de redes de telecomunicaciones en áreas urbanas y residenciales*.

Minolli, D. (2020). *Telecommunication Networks: Current Status and Future Trends*. Artech House.

Mis Etiquetas. (2026). *Optic Fiber Cable Identification Labels*. https://www.misetiquetas.com/cable-labels/optic-fiber-cable-identification-labels.html

Molina, R., & Sánchez, J. (2024). Análisis de propagación en interiores para redes WiFi 6 y 6E sobre infraestructura FTTR. *Revista Iberoamericana de Telecomunicaciones*, *12*(1), 45–58.

Pacto Mundial ONU. (2023). *ODS 9 Industria, innovación e infraestructura*. https://www.pactomundial.org/ods/9-industria-innovacion-e-infraestructura/

Pérez, A., & Morales, J. (2023). Evaluación de la eficiencia de redes WiFi en ambientes urbanos interiores. *Ingeniería y Tecnología Aplicada*, *19*(1), 112–125. https://doi.org/10.33990/itec.v19n1.2023.112

Pinterest. (2026a). *Plano arquitectónico de vivienda residencial*. https://mx.pinterest.com/pin/739575570037152579/

Pinterest. (2026b). *Plano arquitectónico para distribución de espacio residencial*. https://mx.pinterest.com/pin/440156563603441597/

Qiao, D., Huang, X., Liang, C., Zhang, W., & Shen, C. (2022). Performance evaluation of WiFi 6E indoor communications: Coverage and throughput. *Sensors*, *22*(3), 1103. https://doi.org/10.3390/s22031103

Rappaport, T. S. (2003). *Wireless Communications: Principles and Practice* (2nd ed.). Prentice Hall.

Rappaport, & Theodore S. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice* (2nd ed.). Prentice Hall.

Ruijie Networks. (2026). *Plantilla arquitectónica por defecto para simulación de mapas de calor (moban.jpg)*. https://cloud.ruijienetworks.com/

Saleh, B. E. A., & Teich, M. C. (2019). *Fundamentals of photonics* (3a ed.). Wiley.

Sánchez, C. (2025). *Firman convenio para preservar el patrimonio cultural de Portoviejo y buscarán recursos*. https://www.eldiario.ec/portoviejo/firman-

convenio-para-preservar-el-patrimonio-cultural-de-portoviejo-y-buscaran-recursos-25042025/

Secretaría Nacional de Planificación. (2021). *Plan de Creación de Oportunidades 2021–2025*. https://www.planificacion.gob.ec/plan-de-creacion-de-oportunidades-2021-2025/

Segurilight. (2026). *Señal Peligro Radiaciones Láser*. https://www.segurilight.com/producto/senal-peligro-radiaciones-laser/

Silex Fiber. (2026). *Caja Terminal SLT008 4 Entradas 8 Salidas*. https://silexfiber.com/producto/caja-terminal-slt008-4-entradas-8-salidas/

Stallings, W. (2020). *Data and Computer Communications* (11a ed.). Pearson.

Tanenbaum, A. S., & Wetherall, D. J. (2010). *Redes de computadoras* (5a ed.). Pearson Educación.

Tao, J., Zhang, W., & Huang, K. (2023). Performance Evaluation of FTTR Deployments with Wi-Fi 6/6E Integration in Smart Homes. *Journal of Optical Communications and Networking*, *15*(5), 395–402. https://doi.org/10.1364/JOCN.15.000395

Technologies, H. (2023a). *FTTR: All-optical Room-level Smart Home Network Solution*. https://www.huawei.com/en/news/2023/fttr-smart-home-network-solution

Technologies, H. (2023b). *FTTR Solution White Paper*.

Tecnorep. (2024). *Fibra FTTR: La Revolución de la Conectividad*. https://www.tecnorep.com/fibra-fttr-la-revolucion-de-la-conectividad-en-el-hogar/

Telecommunications Industry Association. (2016). *ANSI/TIA-568.3-D: Optical Fiber Cabling Components Standard*. TIA.

TP-Link. (2023). *Simulación de mapa de calor Wi-Fi con la función de mapa del controlador Omada SDN*. https://www.tp-link.com/cac/support/faq/3687/

UNCTAD. (2024). *Informe sobre la Economía Digital 2024*. https://unctad.org/es/publication/informe-sobre-la-economia-digital-2024

Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). (2022). *Normas técnicas para la interoperabilidad de redes multiservicio*.

U.S. Food, & Administration, D. (2019). *Laser Products - Conformance with IEC 60825-1 Ed. 3 and IEC 60601-2-22 Ed. 3.1 (Laser Notice No. 56)*. https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/laser-products-conformance-iec-60825-1-ed-3-and-iec-60601-2-22-ed-31-laser-notice-no-56

Utkarsh Singh. (2023). *Demystifying Wi-Fi: A Comprehensive Comparison of Wi-Fi 5, 6, and 7*. https://www.copperpodip.com/post/demystifying-wi-fi-a-comprehensive-comparison-of-wi-fi-5-6-and-7

Wang, B., Guo, Y., Wu, J., & Zhang, X. (2018). Penetration loss of building materials for millimeter wave communication systems. *IEEE Access*, *6*, 11212–11220. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2808323

Wang, X., & others. (2023). Deployment Optimization of FTTR Systems for Ultra-Broadband Smart Homes. *IEEE Communications Standards Magazine*, *7*(2), 34–41.

Zeng, Y., & Li, Z. (2019). Emerging trends and innovations in network architecture for high-speed broadband access. *IEEE Communications Magazine*, *57*(3), 88–94. https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1800527

Zhang, H., & Liu, C. (2022). Implementation and Optimization of FTTR Networks with XGS-PON for High-Density Deployments. *Optical Fiber Technology*, *72*, 102870. https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102870

Zhang, S., Wang, H., & Liu, P. (2022). A survey on wireless communication technologies: Challenges and future directions. *Wireless Networks*, *28*(4), 1415–1431. https://doi.org/10.1007/s11276-021-02808-0

Zubair, S., Ali, A., & Naeem, H. (2020). Wireless Communication Challenges in Indoor Environments. *International Journal of Communication Systems*, *33*(18). https://doi.org/10.1002/dac.4562

8. Anexos

8.1 Tabulación de resultados en pruebas experimentales controladas.

Tabla 19

Tabulación de resultados de la *Figura 59.*

Time	Signal (dBm)
now	-39
6 s ago	-40
18:18:59	-39
18:18:53	-40
18:18:49	-40
18:18:42	-40
18:18:39	-40
18:18:34	-40
18:18:29	-40
18:18:22	-40
18:18:19	-40
18:18:14	-40
18:18:08	-40
18:18:03	-40
18:17:58	-40
18:17:52	-40
18:17:48	-40

18:17:43	-39
18:17:38	-40
18:17:33	-40
18:17:28	-40
18:17:23	-40
18:17:17	-40
18:17:13	-39
18:17:08	-48
18:17:02	-40
18:16:58	-40
18:16:52	-40
18:16:48	-40
18:16:43	-40
18:16:38	-40
18:16:31	-39
18:16:28	-40
18:16:22	-40
18:16:17	-40
18:16:12	-40
18:16:07	-40
18:16:03	-40
18:15:58	-40
Promedio:	**-40,08**

Nota: Al final de la tabla se puede ver el resultado del cálculo del promedio de los valores tabulados de los resultados de la medición. Autoría propia.

Tabla 20

Tabulación de resultados de la *Figura 62.*

Time	**Signal (dBm)**
now	-41
5 s ago	-39
9:29:51	-45
9:29:46	-45
9:29:38	-45
9:29:35	-45
9:29:30	-45
9:29:25	-46
9:29:21	-45
9:29:13	-45
9:29:10	-45
9:29:05	-45

9:29:01	-45
9:28:55	-45
9:28:49	-45
9:28:45	-45
9:28:40	-46
9:28:36	-45
9:28:30	-45
9:28:24	-45
9:28:20	-45
9:28:15	-45
9:28:09	-45
9:28:04	-45
9:28:00	-45
9:27:55	-45
9:27:49	-46
9:27:45	-45
9:27:38	-45
9:27:35	-45
9:27:30	-45
9:27:25	-45
9:27:20	-45
9:27:14	-45
9:27:09	-45
9:27:04	-45
9:26:59	-46
9:26:54	-46
9:26:49	-45
9:26:44	-45
Promedio:	**-44,88**

Nota: Al final de la tabla se puede ver el resultado del cálculo del promedio de los valores tabulados de los resultados de la medición. Autoría propia.

Tabla 21

Tabulación de resultados de la Figura 65.

Time	**Signal (dBm)**
now	-46
5 s ago	-47
9:08:00	-48
9:07:55	-45
9:07:50	-46
9:07:46	-50

9:07:40	-45
9:07:35	-49
9:07:30	-44
9:07:25	-47
9:07:20	-45
9:07:15	-45
9:07:10	-45
9:07:05	-45
9:07:00	-45
9:06:55	-45
9:06:49	-47
9:06:45	-45
9:06:40	-45
9:06:35	-46
9:06:30	-41
9:06:25	-46
9:06:20	-46
9:06:15	-46
9:06:10	-46
9:06:05	-46
9:06:00	-46
9:05:55	-45
9:05:50	-46
9:05:45	-46
9:05:40	-46
9:05:35	-45
9:05:30	-45
9:05:25	-45
9:05:20	-46
9:05:15	-46
9:05:10	-45
9:05:05	-45
9:05:00	-45
9:04:55	-46
Promedio:	**-45,70**

Nota: Al final de la tabla se puede ver el resultado del cálculo del promedio de los valores tabulados de los resultados de la medición. Autoría propia.

Tabla 22

Tabulación de resultados de la Figura 68.

Time	Signal (dBm)
3 s ago	-51

8 s ago	-49
9:20:53	-47
9:20:48	-50
9:20:43	-50
9:20:38	-50
9:20:33	-50
9:20:28	-50
9:20:23	-50
9:20:18	-50
9:20:11	-50
9:20:08	-50
9:20:03	-51
9:19:58	-50
9:19:53	-50
9:19:48	-50
9:19:43	-50
9:19:38	-50
9:19:33	-50
9:19:27	-50
9:19:22	-50
9:19:16	-50
9:19:13	-51
9:19:08	-50
9:19:02	-50
9:18:57	-50
9:18:52	-50
9:18:47	-51
9:18:42	-50
9:18:37	-50
9:18:32	-50
9:18:27	-50
9:18:22	-50
9:18:17	-50
9:18:12	-51
9:18:06	-50
9:18:03	-50
9:17:58	-50
9:17:53	-51
9:17:47	-50
Promedio:	**-50,05**

Nota: Al final de la tabla se puede ver el resultado del cálculo del promedio de los valores tabulados de los resultados de la medición. Autoría propia.

Tabla 23

Tabulación de resultados de la Figura 73.

Time	Signal (dBm)
now	-75
6 s ago	-74
15:03:58	-73
15:03:53	-73
15:03:49	-71
15:03:43	-72
15:03:38	-72
15:03:33	-70
15:03:28	-71
15:03:23	-71
15:03:18	-71
15:03:13	-73
15:03:08	-70
15:03:03	-70
15:02:58	-72
15:02:53	-72
15:02:48	-72
15:02:43	-72
15:02:38	-71
15:02:33	-71
15:02:28	-71
15:02:23	-71
15:02:18	-71
15:02:13	-71
15:02:08	-71
15:02:03	-71
15:01:58	-71
15:01:53	-70
15:01:48	-73
15:01:43	-74
15:01:38	-75
15:01:33	-75
15:01:28	-75
15:01:23	-74
15:01:17	-74
15:01:13	-74
15:01:08	-73
15:01:03	-75
15:00:57	-74

Promedio:	**-72,28**

Nota: Al final de la tabla se puede ver el resultado del cálculo del promedio de los valores tabulados de los resultados de la medición. Autoría propia.

Tabla 24

Tabulación de resultados de la Figura 76.

Time	Signal (dBm)
now	-46
6 s ago	-52
21:38:21	-50
21:38:16	-50
21:38:11	-48
21:38:06	-48
21:38:01	-49
21:37:56	-49
21:37:51	-49
21:37:46	-49
21:37:41	-49
21:37:36	-49
21:37:31	-49
21:37:26	-48
21:37:20	-49
21:37:16	-48
21:37:11	-49
21:37:06	-49
21:37:01	-49
21:36:56	-49
21:36:50	-49
21:36:46	-49
21:36:40	-49
21:36:35	-49
21:36:30	-48
21:36:25	-49
21:36:20	-48
21:36:15	-49
21:36:10	-49
21:36:05	-49
21:36:00	-49
21:35:55	-48
21:35:50	-48
21:35:45	-49

21:35:40	-48
21:35:34	-49
21:35:30	-49
21:35:25	-49
21:35:20	-49
Promedio:	**-48,82**

Nota: Al final de la tabla se puede ver el resultado del cálculo del promedio de los valores tabulados de los resultados de la medición. Autoría propia.

Tabla 25

Tabulación de resultados de la Figura 79.

Time	Signal (dBm)
2 s ago	-41
9 s ago	-40
15:30:09	-40
15:30:04	-40
15:29:58	-42
15:29:53	-41
15:29:47	-40
15:29:42	-41
15:29:37	-41
15:29:32	-41
15:29:28	-42
15:29:23	-41
15:29:18	-41
15:29:12	-41
15:29:07	-41
15:29:03	-41
15:28:58	-41
15:28:53	-41
15:28:48	-41
15:28:42	-42
15:28:37	-42
15:28:32	-41
15:28:28	-41
15:28:23	-41
15:28:18	-42
15:28:12	-41
15:28:07	-42
15:28:03	-41
15:27:58	-41

15:27:52	-41
15:27:47	-41
15:27:42	-41
15:27:37	-41
15:27:32	-41
15:27:27	-41
15:27:22	-41
15:27:18	-41
15:27:11	-41
15:27:08	-41
Promedio:	**-41,05**

Nota: Al final de la tabla se puede ver el resultado del cálculo del promedio de los valores tabulados de los resultados de la medición. Autoría propia.

Tabla 26

Tabulación de resultados de la Figura 82.

Time	Signal (dBm)
now	-43
6 s ago	-47
21:18:08	-42
21:18:03	-43
21:17:58	-47
21:17:52	-45
21:17:48	-51
21:17:43	-46
21:17:38	-43
21:17:33	-46
21:17:27	-43
21:17:22	-44
21:17:18	-47
21:17:13	-46
21:17:09	-46
21:17:03	-48
21:16:57	-46
21:16:53	-47
21:16:48	-47
21:16:43	-47
21:16:38	-47
21:16:32	-46
21:16:28	-46
21:16:23	-47

21:16:18	-46
21:16:12	-46
21:16:07	-46
21:16:03	-45
21:15:58	-46
21:15:53	-46
21:15:48	-46
21:15:42	-47
21:15:38	-47
21:15:33	-47
21:15:28	-47
21:15:22	-47
21:15:17	-47
21:15:12	-47
21:15:07	-47
Promedio:	**-46,08**

Nota: Al final de la tabla se puede ver el resultado del cálculo del promedio de los valores tabulados de los resultados de la medición. Autoría propia.

8.2 Modelo Técnico para la implementación de tecnología FTTR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

MODELO TÉCNICO INTEGRAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE REDES FTTR EN LA ÚLTIMA MILLA RESIDENCIAL Y CORPORATIVA

UN ANEXO DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR:

“ANÁLISIS TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE FTTR EN ISPS PARA MITIGAR LAS LIMITACIONES DE COBERTURA EN REDES WIFI 6**”**

AUTOR:

Justin David Gudiño Pijal

Ibarra, 2026

ÍNDICE

1. Capítulo I: Antecedentes 25

1.1 Tema 25

1.2 Problema 25

1.3 Objetivos 28

1.3.1. Objetivo General 28

1.3.2. Objetivos Específicos 28

1.4 Alcance 28

1.5 Justificación 31

2. Capítulo II: Estado del Arte 33

2.1 Fundamentos de Redes y Comunicaciones 33

2.1.1. Redes cableadas e inalámbricas 34

2.1.2. Proveedores de Servicios de Internet (ISP) 35

2.1.3. Internet y conectividad de última milla 35

2.2 Comunicaciones Ópticas 37

2.2.1. Principios de transmisión óptica 38

2.2.2. Arquitecturas de acceso FTTH y FTTR 39

2.2.3. Gestión de splitters ópticos en redes FTTR 40

2.3 Comunicaciones Inalámbricas 41

2.3.1. Principios de radiofrecuencia 42

2.3.2. Ley del cuadrado inverso y atenuación 43

2.4 Estándares inalámbricos 45

2.4.1. Estándares IEEE 802.11 46

2.4.2. WiFi 5, WiFi 6, WiFi 6E y WiFi 7 47

2.4.3. Rol de la WiFi Alliance 48

2.4.4. Tendencias hacia futuras generaciones WiFi 49

2.5 Integración FTTR y WiFi 50

2.5.1. Limitaciones de WiFi en interiores 51

2.5.2. Ventajas técnicas de FTTR 52

2.5.3. Implementación de FTTR sobre redes FTTH 53

2.6 Marco Legal 54

2.6.1. Regulación del espectro radioeléctrico y uso de bandas WiFi 54

2.6.2. Normativas para la instalación de redes FTTx 55

2.6.3. Legislación sobre calidad del servicio en ISPs y derechos del usuario 56

3. Capítulo III: Marco Metodológico 58

3.1 Metodología 58

3.2 Recomendaciones técnicas de instalación 60

3.2.1. Medio de transmisión óptico 61

3.2.2. Métodos de despliegue 64

3.2.3. Técnicas de terminación y conexión 66

3.2.4. Recomendación de equipos terminales de la red óptica 70

3.2.5. Posicionamiento estratégico de las ONT 73

3.2.6. Seguridad física personal 75

3.2.7. Etiquetado y Ordenamiento 77

3.2.8. Validación del Presupuesto Óptico 79

3.2.9. Planta Externa a Planta Interna: Medio Físico y Despliegue Doméstico 80

3.2.10. Resumen de las recomendaciones técnicas de instalación 82

3.3 Mecanismos de distribución física y lógica de la red FTTR en el inmueble 84

3.3.1. Mecanismos de Distribución Física (Planta Interna)..... 84

3.3.2. Mecanismos de Distribución Lógica (Gestión del Servicio)..... 86

3.3.3. Arquitectura Alternativa de Red Óptica Distribuida (FTTR Residencial) 88

3.3.4. Resumen de los medios de distribución física y lógica FTTR. 89

3.4 Determinación y análisis del entorno de pruebas y metodología de experimentación..... 91

3.4.1. Equipamiento técnico para pruebas de campo 91

3.4.2. Herramientas de medición, análisis y software de simulación..... 94

3.4.3. Parámetros de censado..... 95

3.5 Procedimiento de obtención e instalación del ecosistema de software 96

3.5.1. Adquisición de herramientas en el repositorio oficial 96

3.5.2. Adquisición y Requerimientos de WiFi Analyzer 97

3.5.3. Adquisición y Requerimientos de NetSpot 99

3.5.4. Configuración de privacidad y servicios de red 101

3.5.5. Registro y acceso a la plataforma de simulación Ruijie Reyee... 102

3.6 Familiarización con el entorno de software de medición y simulación 105

3.6.1. Diagnóstico de detalles técnicos (WiFi Analyzer)..... 105

3.6.2. Medición, tabulación y graficación de datos (NetSpot) 109

3.6.3. Preparación del entorno de simulación de mapas de calor.....114

3.7 Pruebas experimentales controladas..... 123

3.7.1. Tipos de entornos de pruebas 123

3.7.2. Pruebas de atenuación por distancia en línea de vista (LOS)..... 124

3.7.3. Atenuación por obstáculos inmuebles 140

3.8 Pruebas de simulaciones experimentales controladas 155

3.8.1. Calibración de potencia del router simulado 161

3.8.2. Pruebas de atenuación por distancia en línea de vista (LOS)..... 165

3.8.3. Atenuación por obstáculos inmuebles 173

3.8.4. Calibración de atenuación de objetos inmuebles..... 178

3.9 Comparativa de costos aproximados de instalación en el inmueble 180

4. Capítulo IV: Validación y Demostración de Factibilidad 182

4.1 Escenarios de simulación para medir la factibilidad de FTTR..... 182

4.2 Simulación de caso práctico en departamento pequeño 183

4.2.1. Diagnóstico de Cobertura en Arquitectura Centralizada 186

4.2.2. Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida 187

4.2.3. Resultados de las simulaciones..... 188

4.3 Simulación de caso práctico en casa residencial 190

4.3.1. Diagnóstico de Cobertura en Arquitectura Centralizada 194

4.3.2. Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida 196

4.3.3. Resultados de las simulaciones..... 199

4.4 Simulación de caso práctico en casa histórica..... 201

4.4.1. Diagnóstico de Cobertura en Arquitectura Centralizada 204

4.4.2. Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida 205

4.4.3. Resultados de las simulaciones..... 207

4.5 Simulación de caso práctico en oficina corporativa 209

4.5.1. Diagnóstico de Cobertura en Arquitectura Centralizada 212

4.5.2. Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida 213

4.5.3. Resultados de las simulaciones..... 214

4.6 Simulación de caso práctico en hotelería de cabañas o glamping.... 216

4.6.1. Diseño y Validación de Arquitectura Distribuida 219

4.6.2. Resultados de las simulaciones..... 221

4.7 Análisis de resultados y validación de la implementación de FTTR 223

5. Conclusiones.....228

6. Recomendaciones.....229

7. Bibliografía.....230

8. Anexos.....240

8.1 Tabulación de resultados en pruebas experimentales controladas.... 240

8.2 Modelo Técnico para la implementación de tecnología FTTR 250

Capítulo 1: Introducción a la Evolución Inalámbrica y el Paradigma FTTR

La industria de las telecomunicaciones se encuentra en una etapa de transformación acelerada, impulsada por la demanda insaciable de ancho de banda y la proliferación de dispositivos conectados en entornos domésticos y empresariales. La llegada y adopción masiva del estándar WiFi 6 (IEEE 802.11ax), y su inminente evolución hacia WiFi 7 (802.11be), ha prometido resolver los cuellos de botella de conectividad mediante innovaciones como el Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA), la modulación de amplitud en cuadratura de 1024-QAM y la coloración del Conjunto de Servicios Básicos (BSS Coloring) para mitigar interferencias en entornos de alta densidad. Sin embargo, la máxima capacidad y eficiencia de estos protocolos inalámbricos dependen intrínsecamente del uso de frecuencias altas, predominantemente en las bandas de 5 GHz y 6 GHz.

Desde la perspectiva de la física electromagnética y la radiopropagación, el incremento en la frecuencia de operación conlleva una reducción proporcional en la longitud de onda. Esta característica física provoca que las señales de 5 GHz y 6 GHz posean una capacidad de penetración estructural significativamente inferior a la tradicional banda de 2.4 GHz. En consecuencia, la señal inalámbrica sufre caídas drásticas de potencia (atenuación) al interactuar con la mampostería típica de los inmuebles, tales como muros de hormigón, ladrillo, adobe y vidrios con tratamientos térmicos.

Históricamente, los Proveedores de Servicios de Internet (ISP) han enfrentado este desafío arquitectónico mediante el despliegue de redes de Fibra hasta el Hogar (FTTH). En el modelo FTTH tradicional, la red óptica pasiva (PON) finaliza en un Terminal de Red Óptica (ONT) único, generalmente instalado en el punto de entrada del domicilio o en la sala de estar principal. Esta topología centralizada genera una disparidad de cobertura crítica: mientras que los usuarios situados en la zona de Fresnel inmediata o en línea de vista (LOS) del enrutador experimentan velocidades de nivel gigabit, aquellos ubicados en habitaciones periféricas, plantas superiores o separados por múltiples muros experimentan zonas muertas, latencia fluctuante y una degradación severa de la Calidad de Experiencia (QoE). Las soluciones paliativas, como los repetidores inalámbricos o los sistemas Mesh basados en interconexiones de radiofrecuencia (backhaul inalámbrico), suelen heredar la misma limitación de atenuación estructural, reduciendo el rendimiento general de la red a la mitad por cada salto o "lúpulo".

Para mitigar definitivamente estas limitaciones físicas, la industria ha desarrollado la arquitectura Fiber to the Room (FTTR). El modelo FTTR redefine por completo la infraestructura de planta interna al extender el medio de transmisión óptico pasivo —un

medio guiado e inmune a las interferencias electromagnéticas— desde la unidad principal (Master ONT) directamente hacia cada una de las habitaciones o áreas críticas del inmueble, donde culmina en micro-nodos radiantes (Edge ONTs). Al sustituir el transporte inalámbrico y el cableado de cobre por fibra óptica, el FTTR elude por completo la absorción impuesta por los obstáculos arquitectónicos, garantizando que cada estancia posea su propio punto de acceso operando en condiciones de espacio libre, maximizando así el rendimiento del estándar WiFi 6.

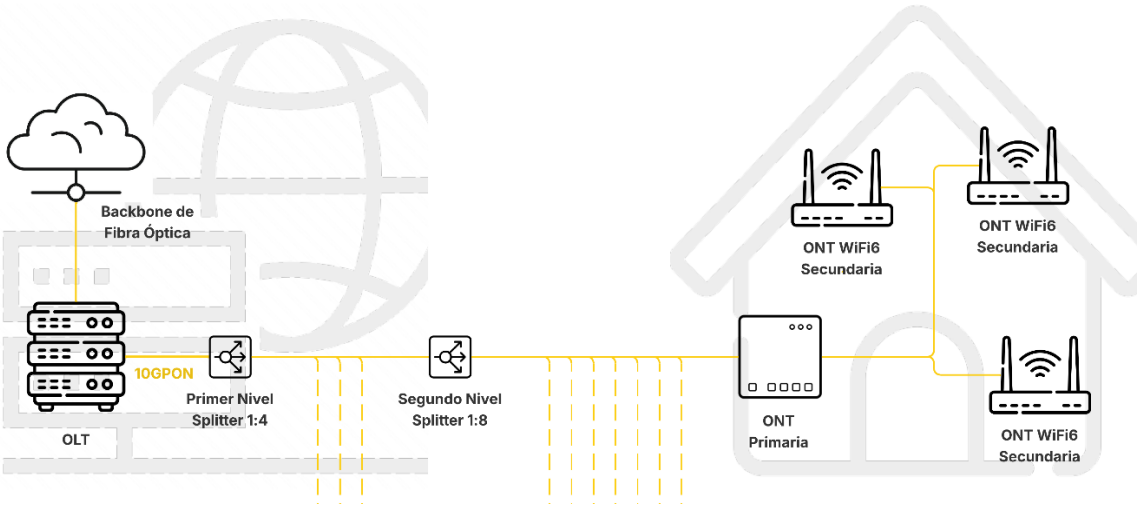


Figura 1 Diagrama de la arquitectura de una red FTTR.

El presente modelo técnico ha sido estructurado como un manual de usuario de nivel de ingeniería, orientado específicamente a capacitar a los técnicos de planta interna, planificadores de red y especialistas de los ISP. Su propósito es estandarizar y facilitar la adopción de la tecnología FTTR en el corto y mediano plazo, estableciendo directrices rigurosas para la instalación física, los mecanismos de distribución lógica, y el dominio absoluto de plataformas de simulación predictiva (como Ruijie Reyee Cloud) para validar matemáticamente la factibilidad del despliegue antes de su ejecución material.

Capítulo 2: Recomendaciones Técnicas de Instalación (Planta Interna FTTR)

El despliegue de una red FTTR representa una invasión técnica en el espacio privado del usuario final. A diferencia de la red troncal o de distribución exterior, la planta interna exige un manejo de materiales altamente especializado, priorizando la mimetización estética, la flexibilidad micrométrica y la seguridad física del cliente. Las siguientes normativas técnicas deben ser adoptadas por el ISP como protocolos obligatorios.

a. Caracterización y Selección del Medio de Transmisión Óptico

El diseño de la red óptica interna difiere radicalmente de los tendidos urbanos. En la calle, las fibras ópticas (comúnmente regidas por el estándar ITU-T G.652.D) se instalan con radios de curvatura amplios. En el interior de un domicilio, la fibra debe bordear marcos de puertas, rodapiés, y ángulos de mampostería de 90 grados. Utilizar una fibra convencional en estos escenarios induciría atenuaciones por macro curvatura tan severas que la luz escaparía del núcleo de sílice hacia el revestimiento, destruyendo el presupuesto óptico.

Por mandato técnico, todo despliegue FTTR debe utilizar exclusivamente fibra óptica insensible a curvaturas, certificada bajo la norma ITU-T G.657, recomendando enfáticamente la subcategoría B3 para escenarios de alta exigencia.

Tabla 1 Tabla comparativa de tipos de fibra óptica para FTTR.

Estándar de Fibra Óptica	Radio de Curvatura Mínimo Soportado	Pérdida Adicional Inducida por Curvatura	Atenuación Nominal Base (1550 nm)	Entorno de Aplicación Recomendado
ITU-T G.652.D	30.0 milímetros	> 0.50 dB (crítica)	0.22 dB/km	Red de alimentación externa (FTTH)
ITU-T G.657.A2	7.5 milímetros	Máximo 0.50 dB	0.22 dB/km	Canalizaciones internas holgadas
ITU-T G.657.B3	5.0 milímetros	Máximo 0.15 dB	0.22 dB/km	Redes FTTR con esquinas críticas

La norma G.657.B3 se caracteriza por poseer un perfil de índice de refracción modificado (a menudo mediante una zanja de bajo índice alrededor del núcleo), lo que confina el haz de luz de manera mucho más estricta. Esto garantiza que, incluso si el técnico dobla la

fibra en un radio de 5 milímetros, la pérdida por inserción será insignificante (inferior a 0.15 dB), asegurando la integridad de las señales moduladas en las longitudes de onda de 1490 nm y 1577 nm correspondientes a GPON y XGS-PON.

b. Métodos de Despliegue y Mimetización Arquitectónica

La viabilidad comercial del FTTR depende en gran medida de la aceptación estética por parte del propietario del inmueble. El técnico debe dominar dos metodologías principales para el tendido de la fibra interna :

Tecnología de Fibra Óptica Invisible: Diseñada para edificaciones antiguas, inmuebles patrimoniales o residencias que carecen de ductería empotrada. Consiste en un microcable con un diámetro extremadamente reducido (de 0.9 mm a 1.2 mm), revestido con una chaqueta de polímero transparente. La instalación se ejecuta utilizando una herramienta de calentamiento controlada (pistola de calor) que activa un adhesivo termosensible integrado en la chaqueta, o bien mediante la aplicación de adhesivos de cianoacrilato de secado rápido. El técnico traza la ruta a lo largo de las juntas de los zócalos, esquinas de paredes o molduras del techo, logrando que el hilo sea virtualmente imperceptible a simple vista.

Implementación mediante Microductos: En construcciones modernas que cumplen con los estándares de cableado estructurado, la fibra óptica puede ser soplada o traccionada a través de microductos de PVC o polietileno de baja fricción. Es fundamental recordar que, debido a su naturaleza dieléctrica (compuesta de vidrio/plástico y carente de metales conductores), la fibra óptica posee inmunidad absoluta a la interferencia electromagnética (EMI). Por lo tanto, es normativamente legal y técnicamente seguro compartir las tuberías y canalizaciones con la red de cableado eléctrico de alto voltaje de la casa, optimizando la infraestructura existente sin riesgo de degradación de señal o peligro de electrocución.

c. Técnicas de Terminación, Empalme y Conexión Óptica

El FTTR exige una pureza en la capa física mucho mayor que el cableado de cobre UTP. Una terminación deficiente no solo atenúa la señal lumínica, sino que puede generar reflexiones destructivas que desestabilizan el láser del equipo transmisor.

Obligatoriedad de la Fusión por Arco Voltaico: El manual prohíbe el uso de conectores o empalmes mecánicos para despliegues definitivos. Los empalmes mecánicos retienen una brecha de aire microscópica y dependen de un gel igualador de índice que puede deshidratarse con los años, introduciendo pérdidas de entre 0.2 dB y 0.5 dB. En su lugar, el técnico debe utilizar una fusionadora de fibra óptica por alineación de núcleo. La fusión por arco voltaico funde los extremos de vidrio en una sola estructura continua, garantizando una Pérdida por Inserción (L_{ins}) inferior a 0.02 dB y eliminando por completo los ecos, logrando una Pérdida de Retorno Óptico (ORL) superior a 60 dB.

Estandarización de Conectores SC/APC: Todo el ecosistema interior, desde los divisores ópticos (splitters) hasta las rosetas y puertos de las ONUs, debe operar estrictamente bajo la norma de conectores SC/APC (Subscriber Connector / Angled Physical Contact), identificables universalmente por su carcasa de color verde. El pulido APC presenta un corte transversal en un ángulo exacto de 8 grados. Este ángulo asegura que cualquier haz de luz reflejado por imperfecciones en la unión no regrese por el núcleo hacia la fuente (lo que dañaría el hardware óptico del OLT/ONT), sino que sea desviado e inofensivamente absorbido por la chaqueta de la fibra.

Protocolos Estrictos de Limpieza: El técnico debe portar herramientas de limpieza de fibra en seco, comúnmente conocidas como *One-Click Cleaners*. Una partícula de polvo de apenas una micra de diámetro es suficiente para bloquear el núcleo monomodo (que mide apenas 9 micras), induciendo una caída masiva de potencia. Ningún conector debe ser insertado en una roseta o equipo activo sin una limpieza y, de ser posible, una inspección previa con un microscopio de fibra.

d. Posicionamiento Estratégico de las Unidades Radiantes (ONUs)

El éxito operativo de la red no se limita al medio de transmisión guiado; la proyección de la señal de radiofrecuencia (WiFi) en la estancia final requiere un cálculo posicional minucioso para garantizar la propagación y evitar zonas de sombra.

Altimetría y Evitación de Superficies: La Edge ONT no debe ser instalada a nivel del suelo ni oculta detrás de muebles masivos. El técnico debe anclar las unidades a una altura comprendida entre 1.2 y 1.5 metros respecto al suelo. Instalar el equipo demasiado bajo

provoca que el lóbulo de radiación principal sea absorbido térmicamente por el piso y el mobiliario, reduciendo el área de cobertura efectiva hasta en un 40%.

Mitigación de Desvanecimiento por Multitrayectoria: Las ONUs deben mantener una separación mínima de 30 centímetros respecto a las esquinas o ángulos rectos de los muros. Acercar excesivamente el emisor a una esquina de concreto provoca reflexiones de onda inmediatas, generando ecos electromagnéticos que resultan en interferencia destructiva o *fading*.

Aislamiento de Interferencias: El equipo debe guardar una distancia precautoria mínima de 1.5 metros de aparatos que emitan radiación en el espectro no licenciado, como hornos de microondas, teléfonos inalámbricos antiguos y motores de refrigeración, para preservar la integridad de los canales de control en la banda de 2.4 GHz.

Diseño para Roaming Inalámbrico: La red FTTR opera funcionalmente como una malla jerárquica. Para que el cliente pueda desplazarse por la casa sin experimentar micro-cortes en llamadas de VoIP o *streaming* de video, el técnico debe calcular un solapamiento de señal de entre el 15% y el 20% entre los radios de acción de dos ONUs adyacentes. El objetivo métrico es asegurar que el Indicador de Intensidad de Señal Recibida (RSSI) nunca caiga por debajo de -65 dBm en ninguna zona de la habitación; de lo contrario, el dispositivo cliente no podrá sostener la modulación de alto rendimiento (1024-QAM) del estándar WiFi 6.

e. Seguridad Radiológica, Física y Etiquetado

A diferencia del FTTH, que mantiene la terminación óptica en un área social, el FTTR introduce lásers invisibles en áreas privadas y de descanso, incrementando el riesgo de exposición accidental, especialmente para menores de edad.

Clasificación Láser: Los equipos activos FTTR operan bajo la clasificación Láser Clase 1 o 1M (IEC 60825-1), lo que implica que son seguros en condiciones nominales, pero potencialmente dañinos si se observan de forma directa y sostenida a distancias cortas.

Hardware de Protección (Auto-shutter): El ISP debe exigir la instalación de rosetas de terminación óptica equipadas con obturadores automáticos (*Auto-shutter*). Estos

mecanismos cuentan con una compuerta interna accionada por un muelle que sella el puerto óptico automáticamente en el instante en que el cable *patchcord* es desconectado, bloqueando la salida de luz hacia el espacio libre.

Señalética y Trazabilidad: Todo punto de demarcación óptica debe exhibir una etiqueta de advertencia amarilla con el símbolo internacional de radiación láser. Además, en cumplimiento con las normativas de soporte técnico, el técnico debe etiquetar cada extremo de la red. Se recomienda el estándar alfanumérico jerárquico --. Por ejemplo, 7890-MASTER-1 para el equipo principal y 7890-SLAVE-2 para la ONU secundaria. Estas etiquetas tipo bandera deben situarse a menos de 10 centímetros del conector, permitiendo una rápida identificación visual durante las tareas de mantenimiento.

f. Validación Analítica del Presupuesto Óptico

La fase de instalación concluye con la auditoría empírica de la atenuación óptica, un proceso que certifica la viabilidad operativa de toda la capa física. En una arquitectura FTTR, las mediciones se realizan de forma secuencial y en cascada utilizando un Medidor de Potencia Óptica (OPM calibrado en 1490/1550 nm).

Auditoría de la Master ONT: El puerto de salida (*downlink*) del equipo principal debe irradiar una potencia estable que oscile en el rango de +0.5 dBm a +5.0 dBm. Este valor constituye la energía inicial para alimentar el segmento interno.

Auditoría de las Edge ONTs (Nodos Esclavos): Tras atravesar la pérdida intrínseca de los divisores ópticos (splitters 1:4 o 1:8), las fusiones y el recorrido del microcable, la potencia medida en el puerto de llegada de cada habitación debe posicionarse idealmente entre -8.0 dBm y -24.0 dBm. Si la medición alcanza o supera el umbral de sensibilidad del receptor óptico (típicamente -27 dBm), el enlace es considerado "No Conforme". Un enlace al límite de su sensibilidad sufrirá fluctuaciones, pérdidas de tramas de control y una caída drástica del ancho de banda percibido.

Diagnóstico con VFL: Ante una medición "No Conforme", el técnico conectará un Localizador Visual de Fallos (VFL) emitiendo un haz de luz roja visible (> 1 mW) para inspeccionar la red. Cualquier resplandor rojo intenso a lo largo del microcable indicará la presencia de una macro curvatura crítica o una microfisura en la fibra que está fugando la luz y, por ende, saboteando el presupuesto óptico.

g. Inventario de Materiales y Herramientas (FTTR)

El despliegue de una arquitectura óptica interna requiere de un herramental específico y componentes que difieren de una instalación tradicional. A continuación, se detalla un cuadro referencial con todos los materiales necesarios (básicos y avanzados), sus usos directos en FTTR:

Tabla 2 Tabla de materiales necesarios para la instalación de FTTR.

Categoría	Material / Herramienta	Descripción y Uso Técnico FTTR
Herramienta	Fusionadora de Fibra Óptica	Equipo con alineación de núcleo. Obligatorio para evitar pérdidas por empalme mecánico en espacios reducidos.
	Cortadora de Precisión (Cleaver)	Permite cortes de fibra a 90 grados perfectos antes de introducirla en la fusionadora.
	Medidor de Potencia Óptica (OPM)	Calibrado en 1490/1550 nm. Utilizado para verificar el presupuesto de la red en cada nodo.
	Localizador Visual de Fallos (VFL)	Láser rojo (ej. 10mW) para detectar macrocurvaturas o roturas críticas a lo largo del microcable.
	Lápiz Limpiador One-Click	Para limpieza en seco de conectores y puertos SC/APC, crucial para el rendimiento y evitar reflexiones.
	Pistola de Calor / Aplicador	Necesario para activar el adhesivo termosensible de la fibra óptica invisible en rodapiés y esquinas.
	Peladora de Fibra (Stripper)	Pinza de precisión para retirar el revestimiento y la chaqueta de la fibra sin quebrar el núcleo de sílice.
Equipo Activo	Master ONT FTTR (Gateway)	Unidad principal con puerto óptico PON de bajada (downlink), enrutamiento y radio WiFi 6 base.

	Edge ONT FTTR (Esclava)	Nodo o punto de acceso WiFi 6 para habitación periférica, se alimenta directamente por fibra óptica.
Material Pasivo	Bobina de Fibra Invisible G.657.B3	Microcable transparente insensible a curvaturas con adhesivo. Rollo de 1000 metros.
	Divisor Óptico (Splitter PLC) 1:4	Splitter pasivo con conectores SC/APC para dividir la luz de la Master ONT hacia los cuartos.
	Roseta Óptica con Auto-Shutter	Caja de terminación de pared con protección de obturador automático para evitar exposición al láser.
	Pigtails y Patchcords SC/APC	Latiguillos de fibra para interconectar los equipos activos a las rosetas en distancias cortas (1m a 3m).
	Mangas Termocontraíbles	Fundas con varilla de acero para proteger las fusiones realizadas a la fibra desnuda (paquete de 100).
	Adhesivo Cianoacrilato de Gel	Alternativa para fijar fibra invisible en superficies donde el termo adhesivo no es viable.

Capítulo 3: Mecanismos de Distribución Física y Lógica de la Red FTTR

El diseño y la topología de la red FTTR deben adaptarse paramétricamente a la geometría del inmueble y a las necesidades de tráfico del cliente final. Esta adaptación se ejecuta en dos planos: la capa física (distribución de la fibra) y la capa lógica (gestión del enrutamiento IP y segmentación de datos).

a. Mecanismos de Distribución Física (Planta Interna)

La arquitectura de transporte hacia los nodos periféricos se rige por dos topologías ópticas fundamentales :

Topología en Estrella (Punto a Multipunto mediante Splitter Óptico): Es el estándar de oro para edificaciones con un nodo de convergencia central o cuartos de telecomunicaciones definidos. La fibra exterior ingresa y se conecta a la Master ONT. En este punto central, se acopla un divisor pasivo simétrico (splitter 1:4, 1:8, o 1:16). Desde este divisor, hilos de fibra individuales y paralelos se rutean hacia cada cuarto. Su mayor ventaja radica en la resiliencia y el aislamiento de averías: la ruptura accidental de un hilo en el pasillo norte solo incomunicará a la habitación norte, manteniendo el resto del inmueble en perfecta operatividad.

Topología en Cascada o Cadena: Diseñada como una alternativa de máxima eficiencia en el consumo de materiales, ideal para inmuebles sin ductería, pasillos extremadamente largos (hotelería) o viviendas de múltiples niveles en escalada. En este esquema, la fibra se dirige desde la Master ONT a la primera Edge ONT. Este primer nodo esclavo está equipado con un puerto óptico de salida (*downlink*), permitiendo al técnico conectar un nuevo segmento de fibra desde el primer nodo hacia el segundo, y así sucesivamente en serie. Aunque minimiza drásticamente los metros lineales de fibra y el impacto estético, requiere que todos los nodos intermedios se mantengan encendidos para sostener la continuidad de la cadena de datos.

b. Mecanismos de Distribución Lógica y Gestión del Tráfico

Una vez consolidada la infraestructura óptica transparente, el ISP y el técnico deben provisionar los perfiles lógicos de enrutamiento. Las topologías lógicas determinan cómo se asignan las direcciones IP y cómo se regula la Calidad de Servicio (QoS).

Red Unificada Centralizada (Gestión Master/Slave con Roaming): Es la configuración por defecto para entornos unifamiliares. La Master ONT asume el rol de Gateway exclusivo, encargándose de establecer la sesión WAN (PPPoE) con la central del ISP, operando el servidor DHCP local y ejecutando la Traducción de Direcciones de Red (NAT). Las Edge ONTs en las habitaciones funcionan como puntos de acceso "tontos" controlados centralizadamente. Todos los nodos irradian un identificador de red único (SSID) y sincronizan los protocolos IEEE 802.11k/v/r. Esta convergencia permite que un smartphone o tableta transicione de un cuarto a otro (*roaming*) tomando decisiones de traspaso casi instantáneas, basándose en informes topológicos de los nodos adyacentes, sin perder la conexión IP.

Segmentación Multi-Usuario (Túneles PPPoE Independientes): Altamente recomendada para edificios de inquilinato, cuartos de estudiantes u oficinas compartidas. En este modelo, el enrutamiento local se descentraliza. La Master ONT se configura en modo *Bridge* (puente transparente), permitiendo que el tráfico de Capa 2 (VLAN Trunking) atraviese hacia las habitaciones sin ser modificado. Cada Edge ONT periférica asume la función de enrutador primario, levantando su propio túnel PPPoE contra el Servidor de Acceso Remoto de Banda Ancha (BRAS), típicamente gestionado por un concentrador MikroTik en el núcleo del ISP. Esta separación lógica aísla los dominios de difusión de cada cuarto, permitiendo al ISP aplicar cortes por falta de pago o limitar el ancho de banda individualmente, garantizando que el inquilino de la habitación A no pueda saturar el enlace del inquilino de la habitación B.

Segmentación Híbrida mediante VLANs (Redes Aisladas): Implementada en oficinas de alto nivel y viviendas corporativas. A través de la Master ONT, se crean múltiples Redes de Área Local Virtuales (VLANs bajo el estándar IEEE 802.1Q) sobre el mismo cableado de fibra. La primera VLAN maneja el tráfico de los propietarios, otorgando acceso a cámaras IP, servidores NAS y sistemas de domótica. La segunda VLAN difunde un SSID paralelo exclusivamente para "Invitados", cuyo enrutamiento restringe estrictamente la visibilidad hacia la LAN principal y direcciona el tráfico de los visitantes únicamente hacia Internet, mitigando riesgos de seguridad y *malware*.

Arquitectura FTTR Residencial Alternativa (Centralizada en el Core): Para despliegues económicos (máximo 4 puntos), el ISP puede prescindir de la costosa Master

ONT. La fibra de la calle ingresa, pasa por un splitter pasivo y se dirige directamente a ONTs estándar en cada cuarto. Cada ONT levanta una sesión PPPoE. Para unificar la facturación como si fuera un solo plan de hogar, el MikroTik del ISP agrupa los túneles bajo un algoritmo de encolamiento jerárquico (*Hierarchical Token Bucket* - HTB). Esto garantiza que la sumatoria de las velocidades de todas las ONTs del hogar jamás exceda la tasa de baudios del plan contratado, asegurando el control financiero del proveedor y un despliegue de baja latencia.

Tabla 3 Mecanismos de distribución física y lógica de FTTR.

Mecanismo de Distribución	**Dimensión**	**Descripción Técnica de Operación**	**Escenario de Implementación Óptimo**
Topología en Estrella	Física	Fibra enruteada de forma radial desde un splitter óptico centralizado.	Inmuebles con ductería integral; máximo aislamiento contra fallas.
Topología en Cascada	Física	Conexión en serie. La Edge ONT 1 alimenta a la Edge ONT 2 mediante puerto *downlink*.	Pasillos extensos (hotelería); mínima intervención arquitectónica.
Red Unificada Centralizada	Lógica	Master ONT ejecuta NAT y PPPoE. Roaming habilitado vía 802.11k/v/r.	Vivienda unifamiliar tradicional; exige movilidad sin desconexión.
Segmentación Multi-Usuario	Lógica	Master ONT en Bridge. Cada nodo esclavo abre un túnel PPPoE independiente.	Inquilinatos físicos y residencias de estudiantes.
Segmentación Híbrida	Lógica	Separación de SSIDs en Capa 2 mediante VLANs aisladas.	Clínicas y PyMEs (aislamiento de red interna vs. invitados).

Capítulo 4: Preparación del Entorno Computacional de Simulación: Plataforma Ruijie Reyee Cloud

La madurez en el diseño de redes FTTR exige que la planificación predictiva anteceda a cualquier obra civil o tendido de cables. Determinar cuántas ONUs se requieren y dónde instalarlas ya no puede depender de la intuición del técnico. Para eliminar la incertidumbre, el ISP debe adoptar herramientas de modelado de propagación electromagnética basadas en la nube. El estándar industrial recomendado para esta guía es la plataforma *Ruijie Reyee Cloud*, que integra algoritmos de inteligencia artificial para proyectar mapas de calor térmicos de alta precisión.

a. Registro y Acceso a la Plataforma de Simulación

El software Ruijie Cloud opera enteramente en línea, lo que exime al técnico de instalar pesados binarios de simulación en su computadora portátil.

1. **Portal de Ingreso:** El técnico debe acceder al sitio web oficial de la nube de Ruijie y proceder con la creación de una cuenta de usuario o credenciales institucionales, aceptando los términos y políticas de *cookies* espaciales. URL: Ruijie AI HeatMap.

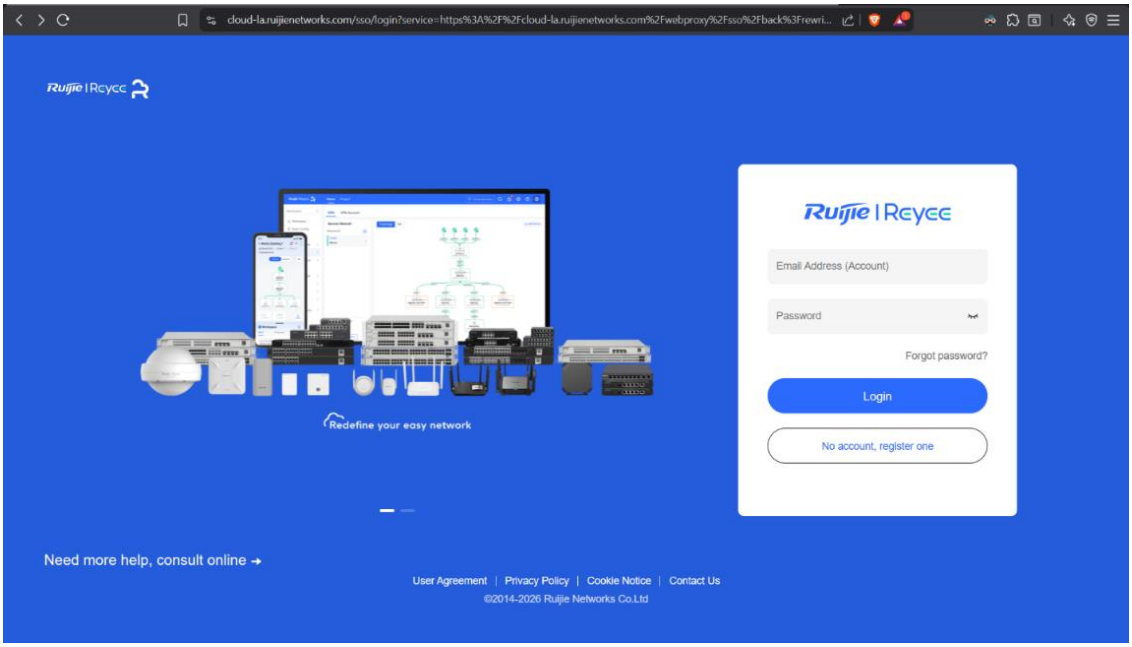


Figura 2 Pantalla de inicio de sesión de Ruijie Cloud.

2. **Parametrización Geopolítica Crítica:** Durante la configuración del perfil, la plataforma requerirá definir el País de Operación y la Zona Horaria. Es un mandato imperativo seleccionar "Ecuador" y el huso horario "GMT-5:00

America/Guayaquil". Esta etapa trasciende lo administrativo; el motor del software utiliza estos parámetros geográficos para auto-limitar sus algoritmos de radiopropagación de acuerdo con las normativas locales establecidas por los entes reguladores (como ARCOTEL en el caso de Ecuador). Al seleccionar la región correcta, el simulador restringe automáticamente la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) máxima permitida, bloquea las bandas de frecuencia no licenciadas y habilita los canales de Selección Dinámica de Frecuencias (DFS) según la legalidad vigente. Un error en este paso generará modelos predictivos ilegales e irreales.

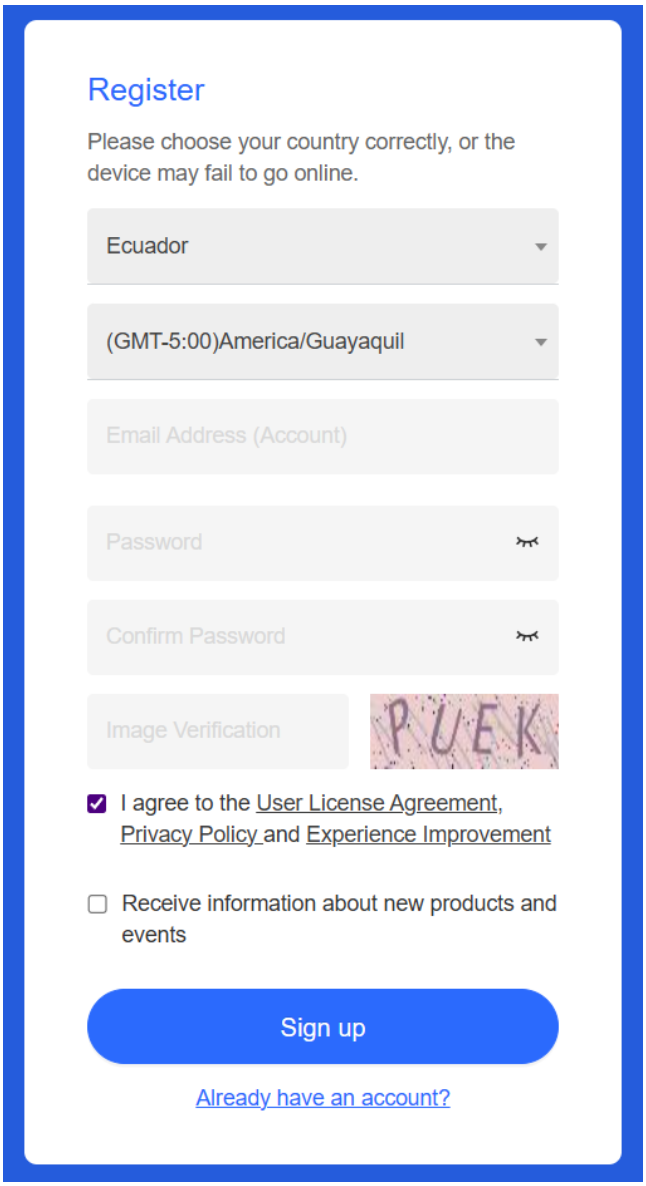


Figura 3 Formulario de registro de usuario en la plataforma de simulación.

3. **Despliegue del Módulo Predictivo:** Una vez dentro del panel de control principal (*Dashboard*), el técnico navegará hacia las herramientas de Lista de Materiales (*BOM*) y seleccionará el módulo *AI Heatmap* (Mapas de Calor basados en Inteligencia Artificial). Este entorno virtual servirá como el lienzo de trabajo para calcular la cobertura de WiFi 6.

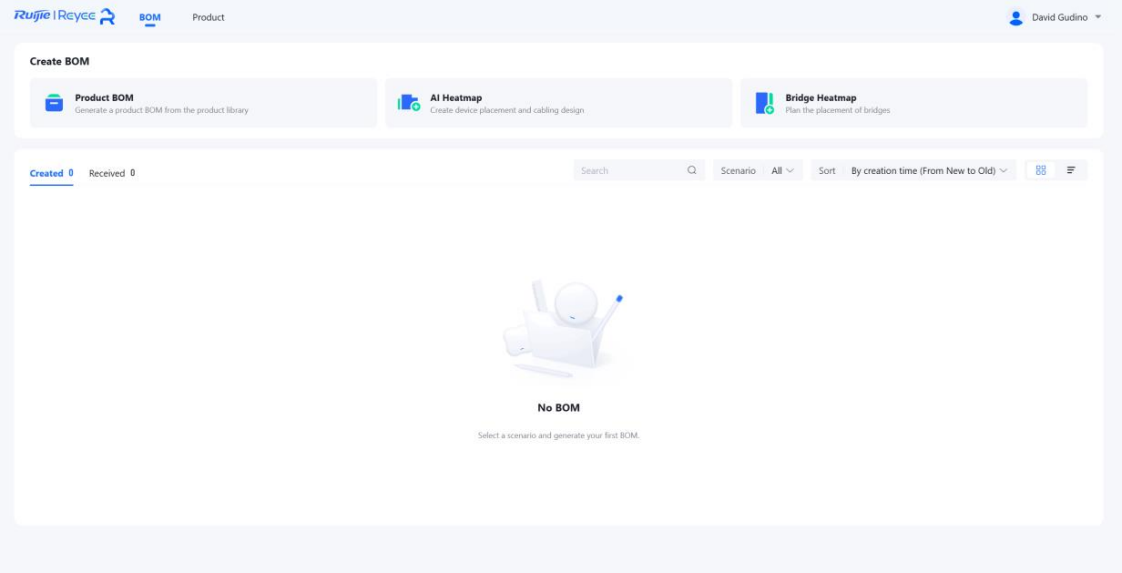


Figura 4 Panel principal de Ruijie Cloud.

b. Preparación del Entorno de Simulación de Mapas de Calor

La veracidad de un mapa de calor predictivo es directamente proporcional a la fidelidad con la que el técnico construya el modelo digital del inmueble.

1. **Creación del Proyecto y Tipología:** Se inicia un nuevo diseño y se le asigna una categoría ambiental, seleccionando entre "Villa/Home" (Vivienda) o "Enterprise" (Empresa). Esta elección calibra la inteligencia artificial de Ruijie para que considere variables ocultas propias de cada entorno, asumiendo una mayor densidad de mobiliario absorbente en una vivienda, en contraposición a grandes volúmenes de aire y particiones de vidrio en una corporación.

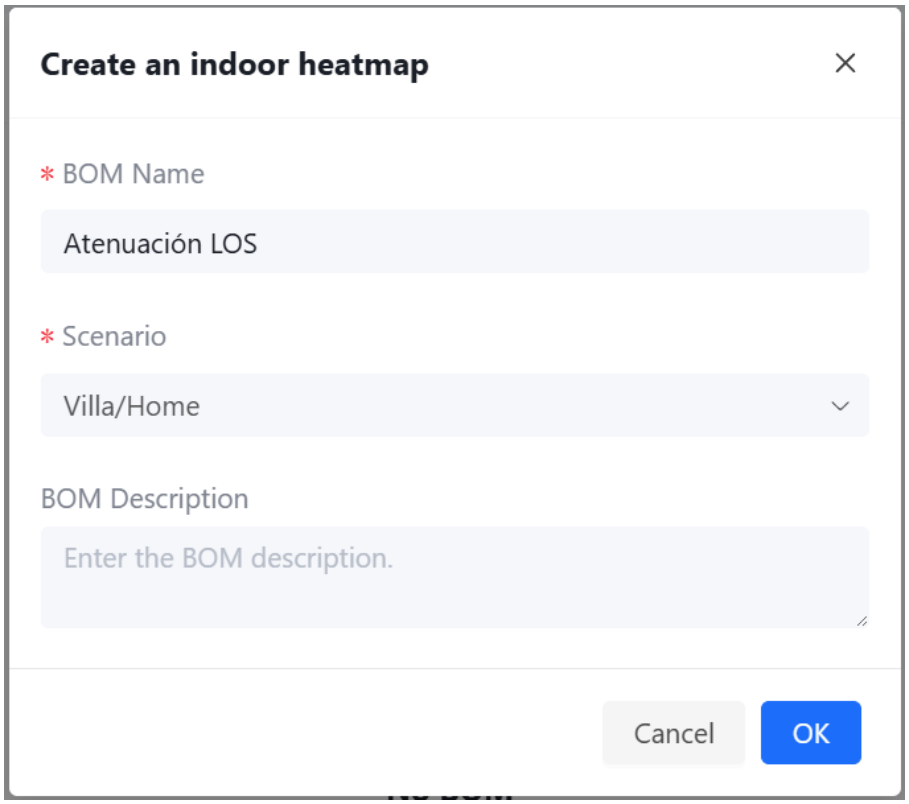


Figura 5 Creación de proyecto de simulación interna.

2. **Importación de la Planimetría:** El lienzo de diseño requiere una base espacial. El técnico debe solicitar al cliente los planos arquitectónicos de la edificación e importarlos al sistema. La plataforma admite documentos en formato PDF, imágenes de alta resolución (.png,.jpg) o archivos de diseño asistido por computadora (CAD en formato.dwg). Se debe asociar el archivo importado al nivel estructural correspondiente (ej. Planta Baja, Nivel 1).

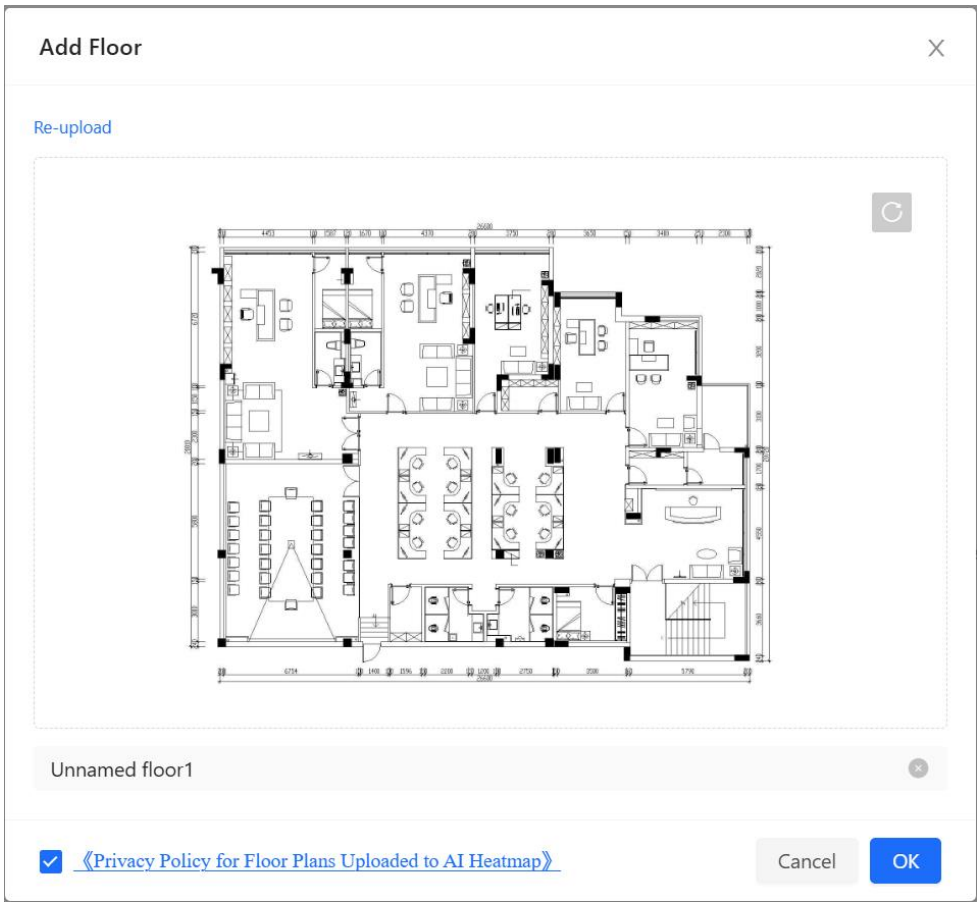


Figura 6 Interfaz de carga de planos digitales.

3. **Proceso de Escalado Isométrico 1:1:** Tras importar el plano, la imagen carece de dimensiones matemáticas. El motor algorítmico no sabe si el dibujo representa un apartamento de 40 metros o un almacén de 4000 metros. Para subsanar esto, el técnico debe utilizar la herramienta de vectorización lineal (regla de escala). Se traza una línea sobre un elemento arquitectónico cuya medida real sea conocida o deducible (por ejemplo, el ancho estándar de una puerta principal, típicamente 0.90 metros o 1 metro) y se ingresa dicho valor en el sistema. Esta acción instruye a la plataforma para que extrapole e interpole todas las proporciones de la imagen, garantizando que los cálculos de Pérdida por Trayectoria en el Espacio Libre (FSPL) se ejecuten en dimensiones estandarizadas 1:1.

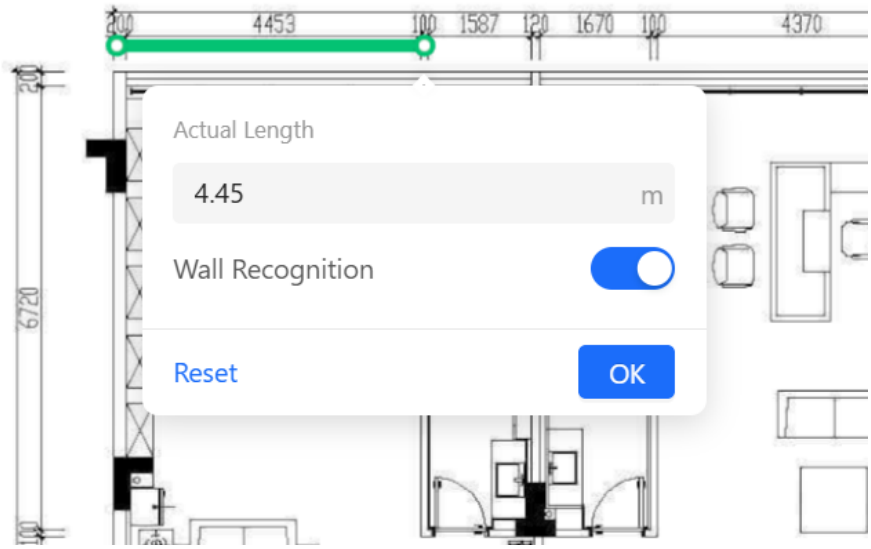


Figura 7 Ajuste de escala del entorno de simulación.

4. **Vectorización Estructural y Trazado de Muros:** Apoyado en el plano escalado, el técnico procederá a trazar manualmente los polígonos que representan la mampostería, paredes y divisiones internas. Es imperativo delinear tanto el contorno perimetral como cada partición de habitación, generando el esqueleto de barreras que la señal inalámbrica deberá enfrentar.



Figura 8 Trazado de muros sobre el plano digital.

5. **Despliegue del Hardware Virtual (BOM):** Desde el catálogo de la plataforma, se extrae el modelo del punto de acceso (Access Point) a simular, por ejemplo, el equipo *RG-RAP2260(G)*, el cual funcionará como el "gemelo digital" de las ONUs WiFi 6 del ISP. El equipo se coloca en el plano, ajustando sus propiedades de instalación (empotrado en pared o techo) y fijando su altura de radiación virtual a 1 o 2 metros.

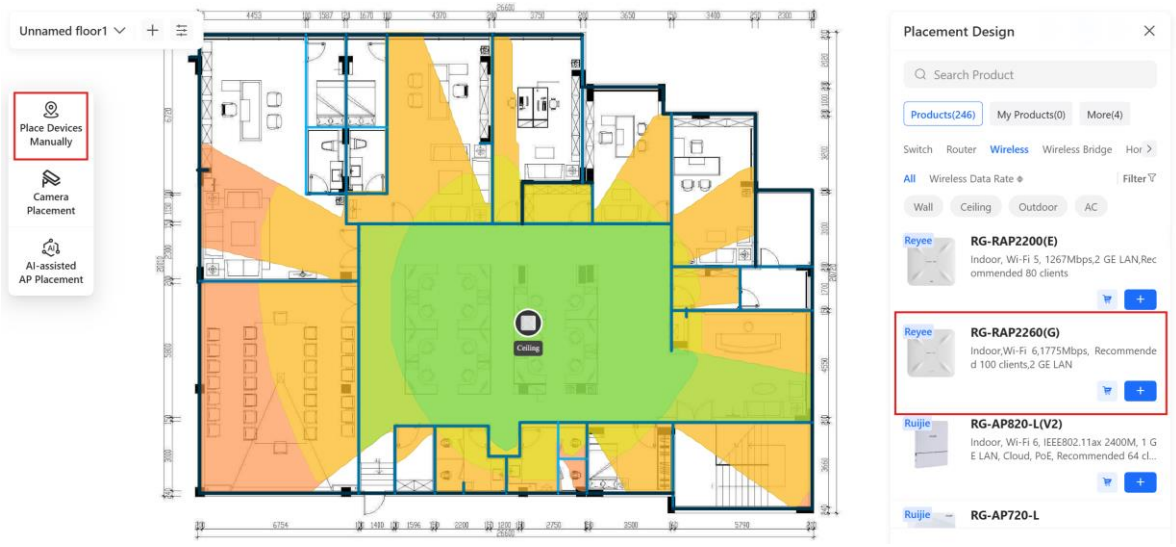


Figura 9 Emplazamiento de dispositivos Ruijie.

Capítulo 5: Calibración Matemática de la Simulación y Mapas de Calor

El defecto más grave que puede cometer un ingeniero al simular redes WiFi es asumir que la configuración predeterminada del software es adecuada para escenarios residenciales. Los algoritmos de diseño, incluyendo los de Ruijie Reyee Cloud, están orientados a entornos empresariales masivos. Por defecto, el simulador asigna al Access Point virtual un 100% de potencia de transmisión (comúnmente 26 dBm para la banda de 5 GHz). Si el técnico irradia esta potencia máxima contra los muros del plano, el mapa de calor mostrará una señal irrealmente poderosa, proyectando niveles de -33 dBm o -36 dBm a distancias donde un equipo residencial real ya habría caído a -45 dBm. Esto resultaría en una simulación "optimista" y, subsecuentemente, en un despliegue FTTR deficiente lleno de zonas muertas no anticipadas.

Para que el mapa de calor constituya una garantía de viabilidad técnica, el simulador debe ser rigurosamente calibrado en dos frentes matemáticos: la restricción de potencia de la fuente y la penalización estructural de los obstáculos. Esta calibración se apoya en fundamentos físicos y cálculos teóricos de RF, eximiendo al técnico de realizar pruebas físicas prolongadas.

a. Calibración de Potencia del Router Simulado

El objetivo es limitar artificialmente la energía del Access Point virtual para que su Nivel de Señal de Referencia Absoluta (P_{ref}) en el campo cercano coincida con la potencia real que entregaría una ONU doméstica típica proveída por el ISP.

El proceso de ajuste se basa en el rango dinámico del equipo dentro de la herramienta :

1. **Definición del Rango Dinámico (R_{din}):** Al examinar las propiedades del equipo virtual RG-RAP2260 en la plataforma, el sistema indica un límite mínimo de transmisión de 11 dBm y un máximo de 26 dBm. La resta entre el límite máximo y el límite mínimo (26 - 11) establece un rango dinámico operativo de 15 dBm.

2. **Determinación de la Potencia Objetivo Residencial (P_{obj}):** Basado en las hojas de especificaciones técnicas del hardware residencial del ISP (como un Huawei AX2 u ONUs compactas), se establece una potencia isotrópica radiada realista (por ejemplo, 17.87 dBm efectivos). Este valor será nuestra "Potencia Objetivo" a emular.

3. **Fórmula de Ajuste Porcentual:** Dado que el panel de Ruijie Cloud requiere que la atenuación de la radio se ingrese en formato porcentual, se procede a transformar la magnitud logarítmica (dBm) en un coeficiente escalonado (%) empleando la siguiente ecuación matemática :

Ecuación 5 Fórmula de ajuste porcentual de potencia.

$$\%_{\text{set}} = \frac{P_{\text{obj}} - P_{\text{minRdin}}}{Ro_{din}} \times 100$$

$$\%_{\text{set}} = \frac{17.87-11}{15} \times 100 \quad (1)$$

$$\%_{\text{set}} = \left(\frac{6.87}{15}\right) \times 100 = 45.8\%$$

4. **Configuración de la Restricción:** Se redondea el cálculo al número entero aceptado por la interfaz gráfica (46%). El técnico ingresará a las opciones de radiofrecuencia del Access Point simulado, desactivará temporalmente la radio de 2.4 GHz (para concentrar el análisis térmico en la banda crítica gigabit) y ajustará el deslizador de transmisión de la banda de 5 GHz estrictamente al 46%.

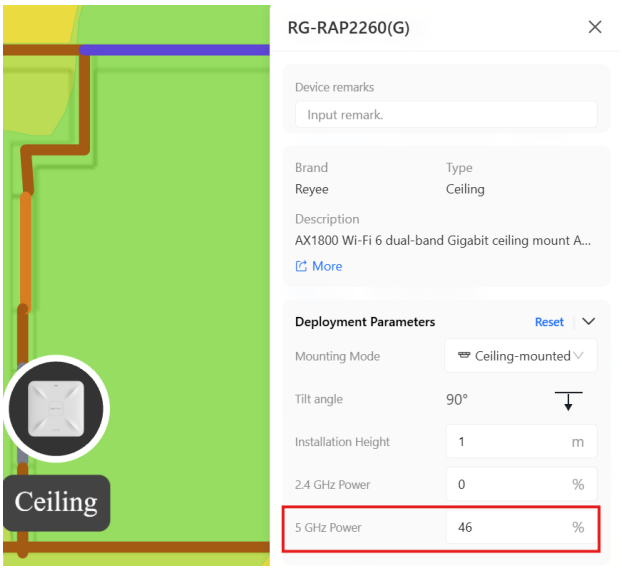


Figura 10 Calibración de la potencia en el router del simulador Ruijie.

Mediante este cálculo teórico, el ingeniero obliga al motor algorítmico a irradiar el frente de onda con la misma "debilidad" inherente a los dispositivos domésticos. Una medición virtual en línea de vista (LOS) a un metro de distancia dentro del software arrojará ahora valores atenuados congruentes, consolidando la fiabilidad matemática del entorno predictivo sin requerir un levantamiento de campo empírico.

b. Calibración de Atenuación de Objetos Inmuebles

Una vez calibrada la fuente emisora al 46%, el segundo componente de la ecuación es la interacción de la onda electromagnética con el entorno. El software debe calcular cuánta energía térmica y electromagnética será absorbida, refractada y reflejada por la mampostería.

El técnico debe asignar propiedades físicas específicas a los polígonos que trazó en la fase de vectorización, seleccionando el coeficiente de atenuación correspondiente desde la biblioteca de materiales del software.

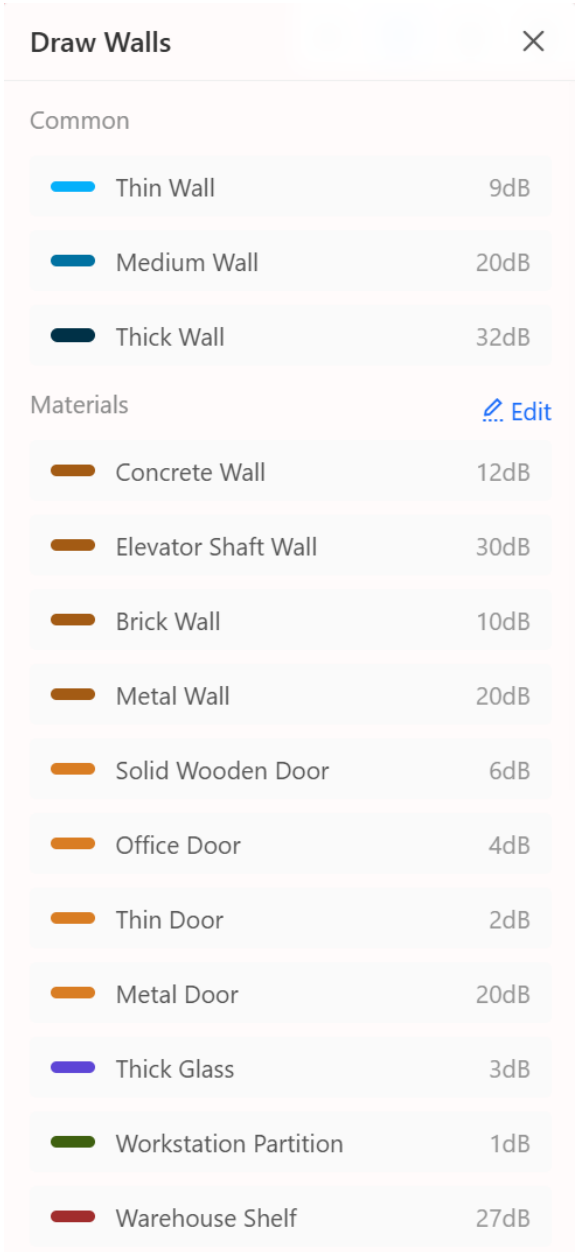


Figura 11 Librería de materiales y atenuación de muros.

Basados en los principios teóricos de pérdida de inserción en frecuencias de 5 GHz, los materiales se parametrizan bajo las siguientes escalas de penalización:

Tabla 4 Tabla e volares de atenuación de objetos inmuebles.

Naturaleza del Material Arquitectónico	Grosor Estándar Proyectado	Coeficiente Teórico de Atenuación Asignado (5 GHz)	Efecto en la Propagación (Simulador)
Vidrio templado / Ventanas simples	3 a 6 milímetros	1 dB a 3 dB	Transparencia alta; leve decaimiento del RSSI.
Puertas de madera maciza / Drywall	3 a 10 centímetros	3 dB a 5 dB	Resistencia baja; permite conectividad funcional en estancias adyacentes.
Mampostería de Bloque Hueco / Ladrillo	15 a 20 centímetros	7 dB a 10 dB	Resistencia media; absorción severa que reduce drásticamente las tasas 1024-QAM.
Muros de Adobe compacto / Hormigón denso	> 50 centímetros	> 25 dB (hasta 32 dB)	Barrera opaca extrema; bloquea masivamente el frente de onda, generando zonas muertas inminentes.

c. Ejecución del Análisis y Justificación del FTTR:

1. **Diagnóstico Centralizado (Simulación FTTH):** Para comprobar la necesidad de la arquitectura FTTR, el técnico ejecuta primero la simulación con un solo nodo centralizado (emulando un router FTTH) sometido a las calibraciones mencionadas. Al presionar el botón de renderizado, el motor de inteligencia artificial procesará la propagación. Si el inmueble posee muros de bloque o adobe, el mapa de calor mostrará de forma irrefutable cómo la señal de 5 GHz colapsa a pocos metros del origen, iluminando las habitaciones periféricas en colores amarillo y rojo oscuro (niveles de señal inferiores a -75 dBm), indicando velocidades paupérrimas y pérdida de conexión.

2. **Modelado de la Infraestructura FTTR:** Ante la falla analítica del modelo centralizado, el técnico procederá a arrastrar y colocar múltiples ONUs virtuales adicionales en las habitaciones oscurecidas, emulando la distribución de la red óptica.

3. **Certificación del Mapa de Calor Óptimo:** Tras renderizar el nuevo escenario distribuido multi-nodo, los campos de radiación se superpondrán de manera inteligente. El técnico podrá certificar y aprobar el diseño de la red cuando la integridad del lienzo arquitectónico —especialmente las áreas habitables, salas y zonas de trabajo— se encuentre inundada por una coloración verde constante. Esta tonalidad verde asegura que el RSSI se mantenga estable por encima del umbral crítico de -60 dBm y -65 dBm, garantizando que el usuario final experimentará latencias ultrabajas y velocidades Gigabit fluidas, independientemente de la densidad estructural de su hogar.



Figura 12 Ejemplo de un mapa de calor óptimo.

Capítulo 6:
Recomendaciones Integrales y Consejos para la Adopción ISP

El salto evolutivo de la tradicional FTTH hacia la capilaridad del FTTR representa un desafío no solo técnico, sino operativo y comercial para los ISP. Para facilitar la adopción a corto y mediano plazo de este modelo de alta capacidad, se formulan las siguientes directrices operativas.

a. Evaluación de Costo-Beneficio y Evitación de Sobredimensionamiento

La tecnología FTTR es una herramienta de ingeniería de precisión, y como tal, no debe aplicarse indiscriminadamente a todos los abonados.

Discernimiento Espacial: En espacios reducidos, como apartamentos tipo estudio o residencias de un solo nivel con dimensiones inferiores a los 80 metros cuadrados y arquitecturas abiertas o con particiones de drywall, la simulación predictiva frecuentemente demostrará que un único enrutador WiFi 6 centralizado bien posicionado (FTTH) es suficiente para cubrir la totalidad del inmueble con niveles de señal de excelencia. En estos casos, intentar vender o forzar una red de fibra distribuida FTTR constituiría un sobredimensionamiento innecesario de la infraestructura, elevando injustificadamente los costos de equipos y mano de obra sin una mejoría perceptible para el usuario.

Enfoque Comercial Objetivo: Se recomienda a los departamentos de ventas e ingeniería de los ISP enfocar y paquetizar el servicio FTTR exclusivamente como una solución *Premium* orientada a viviendas unifamiliares de varios niveles, inmuebles históricos con construcciones de alta densidad (adobe), sectores de hotelería dispersa (como complejos de glamping donde las limitantes de distancia del cable UTP prohíben soluciones tradicionales) y espacios corporativos o clínicas con múltiples divisiones cerradas. En estos escenarios de atenuación estructural crítica, el FTTR demuestra matemáticamente un retorno de inversión excepcional y es el único método garantizado para entregar el ancho de banda contratado.

b. Integración de la Simulación en los Procesos de Preventa

La herramienta de modelado predictivo (Ruijie Reyee Cloud o software equivalente) no debe quedar relegada exclusivamente al departamento de ingeniería avanzada.

Auditorías Previas: Todo técnico o agente de preventa debe exigir el plano del predio o realizar un croquis a escala y someterlo a la calibración térmica virtual delineada en este manual antes de formalizar el contrato. Esta práctica erradicará el despliegue empírico basado en "ensayo y error", impidiendo que se instalen repetidores o se tiren cables innecesariamente, y garantizará que el ISP cobre exactamente por la cantidad de nodos (hardware) que el algoritmo determine como indispensables para cubrir los puntos ciegos.

c. Educación del Usuario y Mantenimiento Preventivo

La planta interna óptica introduce una vulnerabilidad operativa que el cliente desconoce. La fibra de vidrio es frágil frente a esfuerzos mecánicos bruscos.

Cultura de Limpieza: El técnico instalador debe educar pedagógicamente al propietario del inmueble sobre los riesgos de manipular las rosetas ópticas. Se debe instruir explícitamente al cliente que bajo ninguna circunstancia debe desconectar los terminales de fibra durante labores de limpieza doméstica, ya que la exposición del conector SC/APC al polvo microscópico del ambiente inducirá bloqueos de señal o reflexiones destructivas de la luz.

Monitoreo Proactivo: El ISP debe aprovechar las bondades de gestión de los equipos FTTR integrando el protocolo OMCI de sus OLTs y las herramientas de administración remota (TR-069) para auditar constantemente los niveles de atenuación óptica de las ONUs esclavas. La visibilidad profunda del estado de los puertos lumínicos y del histórico de la intensidad de la señal WiFi recibida (RSSI) de los dispositivos cliente permitirá al departamento de soporte técnico detectar anomalías, micro curvaturas emergentes o desvanecimientos del espectro antes de que el usuario final perciba la degradación y genere una queja formal.

Gudiño David TESIS Biblioteca (1)

by Subdecanato FICA

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
CARLOS ALBERTO VASQUEZ AYALA

General metrics

75,291	11,379	469	45 min 30 sec	1 hr 27 min
characters	words	sentences	reading time	speaking time

Score

78

This text scores better than 78% of all texts checked by Grammarly

Writing Issues

408	151	257
Issues left	Critical	Advanced

Plagiarism

1%

121
sources

1% of your text matches 121 sources on the web or in archives of academic publications

Writing Issues

257 **Clarity**

257 Sentence can be perfected

151 **Correctness**

150 Sentence can be improved

1 Incorrect punctuation

Unique Words

Measures vocabulary diversity by calculating the percentage of words used only once in your document

27%

unique words

Rare Words

Measures depth of vocabulary by identifying words that are not among the 5,000 most common English words.

8%

rare words

Word Length

Measures average word length

5.3

characters per word

Sentence Length

Measures average sentence length

24.3

words per sentence

Gudiño David TESIS Biblioteca (2)

by Subdecanato FICA

General metrics

46,409	7,240	363	28 min 57 sec	55 min 41 sec
characters	words	sentences	reading time	speaking time

Score

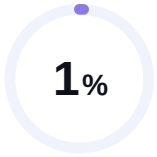


This text scores better than 74% of all texts checked by Grammarly

Writing Issues

302	133	169
Issues left	Critical	Advanced

Plagiarism



39
sources

1% of your text matches 39 sources on the web or in archives of academic publications

Writing Issues

169 **Clarity**

169 Sentence can be perfected

133 **Correctness**

132 Sentence can be improved

1 Incorrect punctuation

Unique Words

Measures vocabulary diversity by calculating the percentage of words used only once in your document

30%

unique words

Rare Words

Measures depth of vocabulary by identifying words that are not among the 5,000 most common English words.

10%

rare words

Word Length

Measures average word length

5.1

characters per word

Sentence Length

Measures average sentence length

19.9

words per sentence

Gudiño David TESIS Biblioteca (3) compressed

by Subdecanato FICA

General metrics

47,962	7,660	419	30 min 38 sec	58 min 55 sec
characters	words	sentences	reading time	speaking time

Score

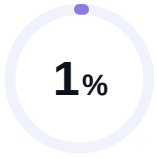


This text scores better than 74% of all texts checked by Grammarly

Writing Issues

313	113	200
Issues left	Critical	Advanced

Plagiarism



41
sources

1% of your text matches 41 sources on the web or in archives of academic publications

Writing Issues

200 **Clarity**

200 Sentence can be perfected

113 **Correctness**

113 Sentence can be improved

Unique Words

Measures vocabulary diversity by calculating the percentage of words used only once in your document

21%

unique words

Rare Words

Measures depth of vocabulary by identifying words that are not among the 5,000 most common English words.

10%

rare words

Word Length

Measures average word length

5

characters per word

Sentence Length

Measures average sentence length

18.3

words per sentence

Gudiño David TESIS Biblioteca (4)

by Subdecanato FICA

General metrics

56,634	8,703	479	34 min 48 sec	1 hr 6 min
characters	words	sentences	reading time	speaking time

Score

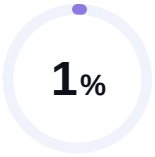


This text scores better than 71% of all texts checked by Grammarly

Writing Issues

392	173	219
Issues left	Critical	Advanced

Plagiarism



40
sources

1% of your text matches 40 sources on the web or in archives of academic publications

Writing Issues

219 **Clarity**

219 Sentence can be perfected

173 **Correctness**

173 Sentence can be improved

Unique Words

Measures vocabulary diversity by calculating the percentage of words used only once in your document

23%

unique words

Rare Words

Measures depth of vocabulary by identifying words that are not among the 5,000 most common English words.

8%

rare words

Word Length

Measures average word length

5.3

characters per word

Sentence Length

Measures average sentence length

18.2

words per sentence