

**“DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN WEB DE APOYO A LA
SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS IIOT PARA PROCESOS
MINEROS”**

SERGIO ANTONIO SALAZAR FIGUEROA

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO CON MENCIÓN EN CONTROL E
INSTRUMENTACIÓN**

Profesor Guía
DR. MANUEL OLIVARES S.

Profesor Correferente
IVÁN RIVERO F.

Ingeniero Supervisor
MANUEL SARABIA C.

17 de abril de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Desarrollo de una aplicación web de apoyo a la selección de tecnologías IIoT para procesos mineros

Nombre del candidato(a): Sergio Antonio Salazar Figueroa

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Electrónica

Campus: Casa Central Departamento: Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Manuel Antonio Olivares Salinas, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 06-Mayo-2026

Firma: Manuel Olivares S.

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 06-Mayo-2026

Firma: SASF

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

A Octavio y Paola, mis padres, por siempre buscar lo mejor para mí y mis hermanos. Gracias, papá, por tus años de esfuerzo y dedicación, por todo lo que entregaste en silencio. Gracias, mamá, por tu amor incansable, por tu entrega y por ser el pilar de nuestra familia.

A mis hermanos, Tate, Pablo y Almendra, por ser mi ejemplo constante, mi apoyo y mi mejor compañía, y por recordarme el valor de la familia en todo momento.

A mis compañeros de carrera y amigos de la universidad, por hacer más llevadero el peso de los años (y noches) de estudio. En especial, gracias, Max, por recibirme en mi último año. Gracias, Juliana, por tu apoyo y presencia en el final del camino.

A la empresa de ingeniería Hatch, por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo y ser parte de un gran equipo, pero, sobre todo, por permitirme conocer a personas maravillosas.

A todos los que, de alguna manera, contribuyeron a que este camino fuera más fácil y enriquecedor.

Resumen

Esta memoria de título presenta el desarrollo de una metodología para la selección y dimensionamiento de tecnologías IIoT aplicadas a la minería, enfocada en ofrecer una solución coherente y estandarizada para la toma de decisiones tecnológicas en proyectos mineros. El trabajo abarca la creación de una herramienta en forma de aplicación web que permite la implementación de esta metodología de manera consistente, trazable y reproducible, superando las limitaciones de los procesos tradicionales basados en experiencias manuales y en la revisión de fichas técnicas. El objetivo central es estructurar el proceso de selección tecnológica, separando la verificación de factibilidad de la priorización de alternativas, lo que reduce la ambigüedad y asegura que las recomendaciones tecnológicas se ajusten a las condiciones operativas del sitio.

A lo largo del estudio se revisaron las herramientas existentes en el mercado, identificando una brecha práctica en las soluciones actuales: la mayoría de las plataformas especializadas tienden a centrarse en la validación de tecnologías después de haber sido seleccionadas, sin ofrecer un marco integrado que permita la comparación de tecnologías de diferentes familias, como los estándares de instrumentación inalámbrica industrial (WirelessHART, ISA100.11a) junto con tecnologías de LPWAN y redes celulares. El aporte de esta memoria radica en proponer un procedimiento transversal y auditable que unifica criterios, supuestos y verificaciones, permitiendo comparaciones consistentes entre diversas tecnologías bajo un mismo servicio y condiciones de operación del sitio.

El trabajo incluye la validación de un caso de estudio en el que se aplicó la metodología propuesta para evaluar tecnologías IIoT en un escenario minero real. Este caso de estudio permitió validar la herramienta, demostrando su efectividad al comparar alternativas tecnológicas bajo condiciones específicas del sitio, y mostrando cómo la aplicación puede ofrecer soluciones coherentes y prácticas para la selección tecnológica en minería. A partir de este caso, se evidenció la capacidad de la herramienta para facilitar decisiones informadas y bien fundamentadas.

En cuanto al cumplimiento de objetivos, se considera logrado el desarrollo de una herramienta funcional que apoya la selección de tecnologías IIoT para minería, con un enfoque en la trazabilidad, la comparación de alternativas y la integración de requisitos específicos del sector. Los resultados de este trabajo se consolidan en una base de datos estructurada y una aplicación web que facilita la toma de decisiones, permitiendo la reutilización de la metodología en futuros proyectos mineros.

Abstract

This thesis presents the development of a methodology for the selection and sizing of IIoT technologies applied to mining, aimed at providing a coherent and standardized solution for technological decision-making in mining projects. The work includes the creation of a web application that enables the consistent, traceable, and reproducible implementation of this methodology, overcoming the limitations of traditional processes based on manual experience and technical sheet reviews. The main goal is to structure the technological selection process by separating feasibility verification from the prioritization of alternatives, reducing ambiguity and ensuring that technological recommendations align with the site's operational conditions.

Throughout the study, existing tools in the market were reviewed, identifying a practical gap in current solutions: most specialized platforms focus on technology validation after it has been selected, without providing an integrated framework that allows for the comparison of technologies from different families, such as industrial wireless instrumentation standards (WirelessHART, ISA100.11a) alongside LPWAN and cellular technologies. The contribution of this thesis lies in proposing a transversal and auditable procedure that unifies criteria, assumptions, and verifications, enabling consistent comparisons between various technologies under the same service and site conditions.

The work includes the validation of a case study where the proposed methodology was applied to assess IIoT technologies in a real mining scenario. This case study allowed for the validation of the tool, demonstrating its effectiveness in comparing technological alternatives under specific site conditions, and showing how the application can provide coherent and practical solutions for technological selection in mining. From this case, the tool's capacity to facilitate informed and well-founded decision-making was clearly evidenced.

Regarding the fulfillment of objectives, it is considered that the development of a functional tool to support the selection of IIoT technologies for mining has been achieved, with a focus on traceability, comparison of alternatives, and integration of sector-specific requirements. The results of this work are consolidated in a structured database and a web application that facilitates decision-making, enabling the reuse of the methodology in future mining projects.

Acronimos

2-WISE	:	2-Wire Intrinsically Safe Ethernet
3GPP	:	3rd Generation Partnership Project
AHP	:	Analytic Hierarchy Process
AM	:	Amplitude Modulation
AP	:	Access Point
APC	:	Advanced Process Control
API	:	Application Programming Interface
APL	:	Advanced Physical Layer
AS-i	:	Actuator Sensor Interface
BER	:	Bit Error Rate
BLE	:	Bluetooth Low Energy
BPSK	:	Binary Phase Shift Keying
BSS	:	Basic Service Set
CAPEX	:	Capital Expenditure
CE	:	Coverage Enhancement
COCHILCO	:	Comisión Chilena del Cobre
CSS	:	Chirp Spread Spectrum
DDL	:	Data Definition Language
DEM	:	Digital Elevation Model
DIN	:	Deutsches Institut für Normung
DS	:	Distribution System
ECC	:	Error Control Coding
EMI	:	Electromagnetic Interference
EPC	:	Electronic Product Code
ETSI	:	European Telecommunications Standards Institute
FH	:	Frequency Hopping
FH-SS	:	Frequency Hopping Spread Spectrum
FM	:	Frequency Modulation
FR1	:	Frequency Range 1 (5G sub-6 GHz)
FR2	:	Frequency Range 2 (5G mmWave 24–54 GHz)
FSK	:	Frequency Shift Keying
FSPL	:	Free Space Path Loss
GMG	:	Global Mining Guidelines Group
HART	:	Highway Addressable Remote Transducer
HF	:	High Frequency

HMI	:	Human–Machine Interface
HTTP	:	Hypertext Transfer Protocol
HTTPS	:	Hypertext Transfer Protocol Secure
ICS	:	Industrial Control Systems
IEC	:	International Electrotechnical Commission
IEEE	:	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIC	:	Industrial Internet Consortium
IIRA	:	Industrial Internet Reference Architecture
IIoT	:	Industrial Internet of Things
IoT	:	Internet of Things
IP	:	Internet Protocol
IPv6	:	Internet Protocol version 6
ISA	:	International Society of Automation
ISM	:	Industrial, Scientific and Medical (band)
IT	:	Information Technology
ITU-R	:	International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector
JSON	:	JavaScript Object Notation
JSONB	:	JSON Binary (PostgreSQL type)
KMZ	:	Keyhole Markup Language Zipped
LAN	:	Local Area Network
LF	:	Low Frequency
LLC	:	Logical Link Control
LoRa	:	Long Range (physical-layer modulation)
LoRaWAN	:	Long Range Wide Area Network
LOS	:	Line of Sight
LPWAN	:	Low Power Wide Area Network
LTE	:	Long-Term Evolution
LTE-M	:	Long-Term Evolution for Machines (Cat-M1)
M2M	:	Machine to Machine
MAC	:	Medium Access Control
MCDM	:	Multi-Criteria Decision Making
MIMO	:	Multiple-Input Multiple-Output
mMTC	:	massive Machine Type Communication
MQTT	:	Message Queuing Telemetry Transport
NB-IoT	:	Narrowband Internet of Things
NIST	:	National Institute of Standards and Technology
NLOS	:	Non Line of Sight
NR	:	New Radio (5G)
OFDM	:	Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OPC UA	:	OPC Unified Architecture
OPEX	:	Operational Expenditure
OSI	:	Open Systems Interconnection
OT	:	Operational Technology
PDF	:	Portable Document Format
PDU	:	Protocol Data Unit
PHY	:	Physical Layer
PIB	:	Producto Interno Bruto
PLC	:	Programmable Logic Controller
PM	:	Phase Modulation
PoE	:	Power over Ethernet
PRB	:	Physical Resource Block
PROFIBUS	:	Process Field Bus
PROFINET	:	Process Field Net
QAM	:	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	:	Quality of Service
QPSK	:	Quadrature Phase Shift Keying
RAMI 4.0	:	Reference Architecture Model Industrie 4.0
RAN	:	Radio Access Network
RF	:	Radio Frequency
RFID	:	Radio Frequency Identification
RH	:	Relative Humidity
RSSI	:	Received Signal Strength Indicator
SERNAGEOMIN	:	Servicio Nacional de Geología y Minería
SF	:	Spreading Factor
SI	:	International System of Units
SNIR	:	Signal-to-Noise-and-Interference Ratio
SNR	:	Signal-to-Noise Ratio
SPE	:	Single-Pair Ethernet
SQL	:	Structured Query Language
SRD	:	Short Range Devices
SRTM	:	Shuttle Radar Topography Mission
SS	:	Spread Spectrum
SUBTEL	:	Subsecretaría de Telecomunicaciones
TCP	:	Transmission Control Protocol
TSCH	:	Time Slotted Channel Hopping
UDP	:	User Datagram Protocol
UE	:	User Equipment
UHF	:	Ultra-High Frequency
UI	:	User Interface

U-NII	:	Unlicensed National Information Infrastructure
URL	:	Uniform Resource Locator
URLLC	:	Ultra-Reliable Low Latency Communication
WAN	:	Wide Area Network
WLAN	:	Wireless Local Area Network
WPAN	:	Wireless Personal Area Network

Índice general

1. Introducción y planteamiento del problema	1
1.1. Contextualización	1
1.2. Motivación	2
1.3. Planteamiento del problema y brecha	3
1.4. Panorama de estándares, guías y herramientas	4
1.4.1. ¿Cómo se ha abordado la selección en la práctica?	4
1.4.2. Herramientas y desarrollos disponibles	4
1.4.3. Tecnologías empleadas en la solución propuesta	5
1.5. Objetivos del proyecto	5
1.5.1. Objetivo general	5
1.5.2. Objetivos específicos	5
1.6. Alcances, limitaciones y supuestos	5
1.7. Estructura de la memoria	6
2. Fundamentos de IIoT	7
2.1. Conceptos fundamentales	7
2.1.1. Paradigma IIoT y convergencia OT/IT	7
2.1.2. Arquitectura funcional y flujo de datos	7
2.1.3. Ciclo de vida del despliegue y relación con el diseño de conectividad	8
2.2. Fundamentos inalámbricos para conectividad IIoT	10
2.2.1. Comunicación por radiofrecuencia y propagación electromagnética	10
2.2.2. Modelos de pérdida por trayecto y atenuación específica del medio	11
2.2.3. Geometría del enlace: distancia, zonas de Fresnel y curvatura terrestre	12
2.2.4. Conceptos y parámetros RF relevantes para ingeniería	14
2.2.5. Ruido, interferencia electromagnética y coexistencia	17
2.2.6. Métricas de desempeño del enlace: SNIR, presupuesto de enlace y margen	19
2.3. Protocolos de comunicación industrial	20
2.3.1. Arquitectura en capas para redes industriales (OSI, TCP/IP e IEEE 802)	21
2.3.2. Protocolos de comunicación industrial cableada	23
2.3.3. Protocolos de comunicación inalámbrica	24
2.4. Tecnologías de Comunicación Inalámbrica	27
2.4.1. Criterios de clasificación por alcance, tasa y consumo (visión por familias)	27
2.4.2. WPAN industriales (IEEE 802.15.4, WirelessHART, ISA100.11a, Zigbee)	29
2.4.3. WLAN industrial (Wi-Fi y variantes industriales)	31
2.4.4. Celular (4G/LTE, 5G) en entornos industriales	33
2.4.5. LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M)	35

2.4.6.	Tecnologías de proximidad (BLE, RFID) para localización/identificación	41
2.4.7.	Síntesis comparativa y límites típicos en aplicaciones industriales	42
2.5.	Dispositivos IIoT: plataformas, instrumentos y <i>gateways</i>	44
2.6.	Procesos y aplicaciones IIoT: servicios y exigencias de comunicación	46
2.6.1.	Clasificación por grupos de servicio y criticidad temporal	47
2.6.2.	Requerimientos mínimos de comunicación por servicio	48
2.6.3.	Del servicio al enlace: cobertura radioeléctrica y topología	48
2.7.	Marco normativo y estándares aplicables a IIoT	49
2.7.1.	Estándares de comunicación industrial e interoperabilidad	49
2.7.2.	Modelos de arquitectura y alineamiento OT/IT	49
2.7.3.	Ciberseguridad industrial	50
2.7.4.	Normativa chilena de espectro para equipos de corto alcance	50
3.	Metodología de Selección de Tecnologías IIoT	51
3.1.	Análisis de requerimientos del proyecto	51
3.1.1.	Información del proyecto	51
3.1.2.	Caracterización del entorno	52
3.1.3.	Registro del inventario de dispositivos	55
3.2.	Criterios de selección tecnológica	55
3.2.1.	Parámetros técnicos requeridos para la evaluación	56
3.2.2.	Restricciones duras: filtro de factibilidad	56
3.2.3.	Evaluación ponderada de candidatas	58
3.2.4.	Agregación ponderada por perfil de servicio	60
3.2.5.	Salida del proceso y trazabilidad	60
3.3.	Dimensionamiento del sistema IIoT	61
3.3.1.	Arquitectura por grupo de servicio	61
3.3.2.	Asignación de roles de red y definición de conectividad	61
3.3.3.	Parámetros de instalación para el análisis de enlaces	61
3.3.4.	Verificación radioeléctrica de enlaces y margen mínimo	62
3.3.5.	Validación de conectividad en topologías de malla	62
3.3.6.	Síntesis del dimensionamiento y entregables	63
3.4.	Comparación de alternativas y decisión de implementación	63
3.4.1.	Consolidación de resultados por servicio	63
3.4.2.	Criterios complementarios a la evaluación cuantitativa	64
3.4.3.	Selección final y alternativas de respaldo	64
4.	Desarrollo de la aplicación web y gestión de datos	65
4.1.	Alcance de implementación y restricciones de acceso	65
4.2.	Requisitos del sistema	65
4.2.1.	Requisitos funcionales	65
4.2.2.	Requisitos no funcionales	67
4.3.	Diseño del sistema	68

4.3.1.	Arquitectura lógica y componentes	68
4.3.2.	Modelo de datos	70
4.3.3.	Estructura de la aplicación	72
4.4.	Implementación	72
4.4.1.	Configuración del entorno	72
4.4.2.	Implementación de la base de datos	74
4.4.3.	Implementación de la aplicación	75
4.5.	Funcionalidades principales	76
4.5.1.	Gestión del contexto del proyecto	76
4.5.2.	Gestión de dispositivos y servicios	76
4.5.3.	Caracterización de enlaces mediante mapa dinámico	76
4.5.4.	Evaluación y recomendación por perfil de servicio	77
4.5.5.	Persistencia y trazabilidad de resultados	77
4.5.6.	Generación del reporte ejecutivo	77
4.5.7.	Fichas técnicas y administración del catálogo de tecnologías	78
5.	Caso de estudio	79
5.1.	Levantamiento de requerimientos del proyecto	79
5.1.1.	Información del proyecto	79
5.1.2.	Caracterización del entorno	80
5.1.3.	Inventario de dispositivos y distribución espacial	80
5.2.	Aplicación de los criterios de selección tecnológica	84
5.2.1.	Parámetros técnicos utilizados en la evaluación	84
5.2.2.	Restricciones duras: filtro de factibilidad	84
5.2.3.	Evaluación ponderada de candidatas	86
5.2.4.	Agregación ponderada por perfil de servicio	87
5.2.5.	Salida del proceso y trazabilidad	87
5.3.	Dimensionamiento del sistema para el caso de estudio	87
5.3.1.	Arquitectura por servicio	88
5.3.2.	Asignación de roles de red y definición de conectividad	88
5.3.3.	Parámetros de instalación para el análisis de enlaces	88
5.3.4.	Verificación radioeléctrica de enlaces y margen mínimo	88
5.3.5.	Entregables del dimensionamiento	89
5.4.	Comparación de alternativas y decisión de implementación	89
5.4.1.	Consolidación de resultados por perfil de servicio	89
5.4.2.	Criterios complementarios a la evaluación cuantitativa	89
5.4.3.	Selección final y alternativas de respaldo	90
6.	Conclusiones	91
6.1.	Propuesta de valor	91
6.2.	Cumplimiento de objetivos	92
6.2.1.	Validación parcial de resultados del presupuesto de enlace	93

6.3. Trabajo futuro	99
Anexos	107
A. Manual de Usuario — Selector de Tecnologías IIoT para Procesos Mineros	108
A.1. Introducción	108
A.2. Requisitos Previos	109
A.2.1. Software	109
A.3. Acceso a la Aplicación	109
A.4. Flujo Completo de Trabajo	110
A.4.1. Sección 1 — Contexto del Proyecto	110
A.4.2. Sección 2 — Dimensionamiento y Servicios	112
A.4.3. Sección 3 — Caracterización de Enlaces	115
A.4.4. Sección 4 — Análisis y Selección de Tecnología	117
A.4.5. Sección 5 — Reporte Ejecutivo	121
A.5. Funcionalidades Avanzadas	123
A.5.1. Guardar / Cargar Escenarios	123
A.5.2. Gestión de Proyectos	124
A.5.3. Fichas Técnicas (Sección 6)	124
A.6. Generación de Reportes	125
A.6.1. Flujo de Generación	125
A.6.2. Requisitos para Generación Exitosa	126
A.6.3. Formato del PDF	126
A.7. Solución de Problemas	127
A.7.1. Problemas de Conexión	127
A.7.2. Problemas de Análisis	127
A.7.3. Problemas de Mapa	127
A.7.4. Problemas de Reporte	128
A.8. Contacto y Soporte	128
B. Parámetros de ajuste en frecuencia para la atenuación específica por polvo/arena	129
C. Reporte Ejecutivo de Caso de Estudio	131
D. Hojas de Datos de dispositivos IIoT	135

Índice de figuras

1.1. Cartera de inversión minera comparada en períodos 2023–2032 y 2024–2033. Fuente: COCHILCO [1].	2
1.2. Ejemplo ilustrativo de la complejidad que pueden alcanzar los sistemas cableados en instalaciones industriales.	2
2.1. Convergencia entre OT e IT como base conceptual de IIoT. Fuente: adaptado de [2].	8
2.2. Ciclo de vida de despliegues inalámbricos industriales. Fuente: adaptado de [3].	9
2.3. Ejemplos de topologías en redes inalámbricas industriales. Fuente: adaptado de [3].	9
2.4. Modelo simplificado de canal radioeléctrico con obstrucción, reflexión, difracción y absorción. Fuente: adaptado de [3].	10
2.5. Zonas de Fresnel alrededor de la trayectoria LOS. Fuente: [4].	12
2.6. Forma elipsoidal efectiva asociada al radio de la primera zona de Fresnel a lo largo del enlace. Fuente: [4].	13
2.7. Perfil de trayecto con obstrucción y geometría de despeje respecto de LOS y zona de Fresnel. Fuente: [4].	14
2.8. Patrones de radiación conceptuales: (a) omnidireccional y (b) direccional. La distancia radial representa potencia relativa radiada en cada dirección (corte 2D). Fuente: adaptado de [5].	16
2.9. Ejemplo conceptual de errores de bit debido a ruido en el proceso de muestreo y decisión del receptor. Fuente: adaptado de [5].	18
2.10. Ejemplo de actividad espectral en la banda ISM de 2.4 GHz, con coexistencia de múltiples transmisiones. Fuente: [3].	18
2.11. Comparación entre las arquitecturas de protocolos OSI y TCP/IP. Fuente: adaptado de [5].	22
2.12. Relación entre el modelo OSI y el modelo de referencia IEEE 802 (LLC/MAC/PHY). Fuente: adaptado de [5].	22
2.13. Rol funcional del <i>gateway</i> como punto de agregación e integración entre la red inalámbrica y los sistemas de planta. Fuente: [3].	25
2.14. Elementos típicos de una red WirelessHART (dispositivos de campo, <i>gateway</i> y gestión de red). Fuente: adaptado de [6].	26
2.15. Arquitectura típica ISA100.11a con dispositivos de campo e infraestructura (por ejemplo, <i>gateway</i> y <i>backbone routers</i>). Fuente: adaptado de [7].	27
2.16. Mapa conceptual de familias inalámbricas según alcance típico e intervalo de reporte asociado. Fuente: adaptado de [3].	28
2.17. Mapa conceptual de familias inalámbricas según alcance típico e intervalo de reporte asociado. Fuente: adaptado de [3].	29

2.18. Arquitectura conceptual IEEE 802.11: BSS, PA (Access Point) y sistema de distribución (DS). Fuente: Basado en el modelo 802.11 descrito en [5].	32
2.19. Planificación conceptual de canales Wi-Fi por banda 2.4 GHz (canales de 20 MHz con fuerte limitación de no solapamiento). Fuente: [8].	33
2.20. Arquitectura LoRaWAN con ejemplos comunes de aplicación. Fuente: adaptado de [9].	38
2.21. Clases de dispositivo LoRaWAN (A/B/C) y ventanas de recepción asociadas. Fuente: adaptado de [9].	39
2.22. Modos de despliegue NB-IoT: <i>in-band</i> , <i>guard-band</i> y <i>stand-alone</i> . Fuente: adaptado de [9].	40
2.23. Esquema conceptual de trazabilidad RFID: lector/antenas, etiquetas (<i>tags</i>) e integración de eventos hacia un sistema de gestión. Fuente: adaptado de [10].	42
2.24. Arquitectura conceptual de un sistema BLE para proximidad: beacon (emisor), receptor/terminal y backend de gestión/visualización. Fuente: adaptado de [10].	43
4.1. Arquitectura lógica del sistema, organizada en capas de presentación, lógica de negocio y persistencia, e integración con fuentes externas de mapa y elevación. Fuente: elaboración propia.	69
4.2. Diagrama entidad–relación del esquema de base de datos. Fuente: elaboración propia.	71
4.3. Flujo funcional de uso de la aplicación, desde el registro del contexto del proyecto hasta la generación del reporte ejecutivo. Fuente: elaboración propia.	74
5.1. Contextualización del caso base en la aplicación.	81
5.2. Arquitectura del caso de estudio y propuesta inicial de conectividad basada en LoRaWAN. Fuente: elaboración propia a partir del caso.	82
5.3. Topología del caso de estudio sobre mapa y enlaces definidos hacia el nodo de agregación. Fuente: aplicación web desarrollada, módulo 3.	83
5.4. Perfil de elevación y verificación de despeje geométrico para el enlace crítico 5–6. Fuente: aplicación web desarrollada, módulo 3.	83
5.5. Esquema referencial de arquitectura LTE existente reportada por el cliente para integración del sistema de monitoreo. Fuente: documentación provista para el caso de estudio.	90
6.1. Geometría del enlace de validación definida en la aplicación, incluyendo la localización y el detalle de los nodos utilizados.	94
6.2. Perfil de terreno del enlace de validación obtenido en la aplicación.	94
6.3. Resultado del presupuesto de enlace obtenido en la aplicación para el caso de validación.	95
6.4. Configuración del caso de referencia en la calculadora de Semtech.	95
6.5. Resultado de sensibilidad y presupuesto nominal de enlace obtenido con la calculadora de Semtech.	96
6.6. Geometría del enlace de validación representada en Radio Mobile.	96

ÍNDICE DE FIGURAS

6.7. Parámetros del enlace de validación configurados en Radio Mobile.	97
6.8. Definición de nodos y perfil de terreno del enlace de validación en Radio Mobile.	97
6.9. Resultado del enlace de validación obtenido en Radio Mobile.	98
A.1. Portada de la aplicación web.	110
A.2. Sección de Contexto del Proyecto.	110
A.3. Detalle del panel de parámetros ambientales con selectores de polvo/EMI/humedad.	112
A.4. Panel de gestión de ubicaciones y aplicaciones personalizadas expandido. . . .	113
A.5. Sección Dimensionamiento y Servicios: Dispositivos.	113
A.6. Sección de Dimensionamiento y Servicios: Datos de uso de servicios.	114
A.7. Formulario de creación de dispositivos.	115
A.8. Mapa Leaflet con nodos preposicionados desde inventario de dispositivos. . . .	116
A.9. Panel de Radio Path con perfil de terreno, zona de Fresnel y sugerencia de altura.	117
A.10. Tabla de enlaces con columnas de distancia, tipo LOS y servicio asociado. . . .	118
(a). Tabla Enlaces.	118
(b). Tabla Nodos.	118
A.11. Sección de Análisis y Selección: Requisitos del servicio y Parámetros de evaluación.	118
A.12. Panel de parámetros de evaluación con ponderaciones y link budget expandidos.	119
A.13. Sección de Análisis y Selección: Tecnologías candidatas y puntaje final.	120
A.14. Sección de Análisis y Selección: Tecnologías descartadas por restricciones duras.	120
A.15. Matriz de tecnologías candidatas (Scoring).	121
A.16. Sección Reporte Ejecutivo.	122
A.17. Botón de descarga del PDF generado con mensaje de éxito.	123
A.18. Selector de proyecto: Cargar, Guardar/Actualizar, Eliminar.	124
A.19. Catálogo de fichas técnicas con comparativa, matriz de datos, normas/estándares y carga de tecnologías.	125
A.20. Portada del Reporte Ejecutivo.	126
C.1. Reporte Ejecutivo - Página 1.	131
C.2. Reporte Ejecutivo - Página 2.	132
C.3. Reporte Ejecutivo - Página 3.	133
C.4. Reporte Ejecutivo - Página 4.	134
D.1. Hoja de datos instrumentación Yokogawa ISA100.11a.	136
D.2. Hoja de datos instrumentación ABB BLE, monitoreo de motores.	137
D.3. Hoja de datos gateway Emerson WirelessHART.	138
D.4. Hoja de datos gateway WorldSensing LoRaWAN.	139

Índice de Tablas

2.1. Modelo OSI: unidad de datos y propósito general por capa (adaptado de [3]).	21
2.2. Síntesis comparativa (A): atributos de red y operación.	44
2.3. Síntesis comparativa (B): parámetros RF y uso de espectro.	45
2.4. Clases para operaciones industriales basadas en la ISA-SP100 [11].	48
2.5. Ejemplos de requerimientos mínimos referenciales por grupo de servicio (capacidad y latencia), adaptados de [3] y alineados conceptualmente con la noción de criticidad de ISA-SP100.	48
3.1. Escenarios discretos de polvo asociados a visibilidad y valores referenciales de γ_{dust} a 4 GHz (RH 20 %).	53
3.2. Niveles discretos de humedad relativa utilizados para parametrizar escenarios ambientales.	54
3.3. Penalización de margen asociada a niveles discretos de interferencia electromagnética (EMI).	54
3.4. Correspondencia entre perfiles de servicio, servicios asociados y criterios prioritarios de evaluación.	55
3.5. Perfiles de servicio considerados.	60
4.1. Resumen de requisitos funcionales y módulos asociados.	67
4.2. Estructura de archivos del proyecto y responsabilidades principales.	73
4.3. Dependencias principales del proyecto y rol en el sistema.	73
5.1. Antecedentes mínimos del proyecto utilizados como entrada del caso de estudio.	80
5.2. Inventario de dispositivos del caso de estudio y atributos relevantes para el análisis.	81
5.3. Enlaces definidos en la topología del caso y caracterización geométrica.	82
5.4. Tecnologías descartadas por restricciones duras y causalidad de descarte.	86
5.5. Ranking de tecnologías factibles para el servicio Monitoreo/Telemetría.	87
6.1. Comparación de resultados del caso de validación parcial del presupuesto de enlace.	98
B.1. Parámetros (a_s, b_s) de la ley de potencia para $\gamma_{\text{dust}}(f; s)$ en los 12 escenarios discretos implementados.	130

Capítulo 1

Introducción y planteamiento del problema

1.1. Contextualización

La minería mantiene un rol relevante en la economía chilena por su aporte directo a la actividad productiva y su influencia en exportaciones e inversión. En 2024, el Producto Interno Bruto (PIB) nominal de Chile fue del orden de US\$330.27 mil millones, según registros del Banco Mundial [12].

En el mismo marco, estimaciones sectoriales basadas en información del Banco Central reportan que el PIB minero, expresado en dólares corrientes, alcanzó en 2024 un orden de magnitud cercano a US\$36.5 mil millones [13]. En esa referencia, la participación del PIB minero en el PIB nacional se sitúa en torno a 12.0 % para 2024 [13].

Las plantas de procesos constituyen el núcleo operativo de una faena minera moderna. En ellas, el mineral extraído se somete a operaciones que elevan su ley y valor comercial. El diseño y la operación de estas instalaciones demandan planificación técnico-económica rigurosa para asegurar continuidad operacional, seguridad y eficiencia.

El dinamismo del sector se refleja en la cartera de inversiones proyectadas para el período 2024–2033. Esta cartera considera 51 proyectos con una inversión estimada de US\$83 181 millones [1]. Como se muestra en la Figura 1.1, además de iniciativas de reposición y ampliación, el portafolio incorpora proyectos asociados a productividad y sostenibilidad. En este marco, la automatización, la instrumentación y la conectividad industrial adquieren creciente relevancia.

Ante este escenario, las empresas mineras suelen apoyarse en firmas de ingeniería especializadas para desarrollar iniciativas desde etapas conceptuales hasta ingeniería de detalle. Hatch, por ejemplo, declara capacidades de ingeniería multidisciplinaria para minería, incluyendo sistemas de control y automatización. En este contexto, la incorporación del Internet Industrial de las Cosas (IIoT, por sus siglas en inglés) habilita ampliar el monitoreo y mejorar la disponibilidad de datos operacionales. Sin embargo, también introduce un desafío adicional: seleccionar y dimensionar tecnologías de comunicación para entornos mineros con restricciones severas y múltiples alternativas técnicas.

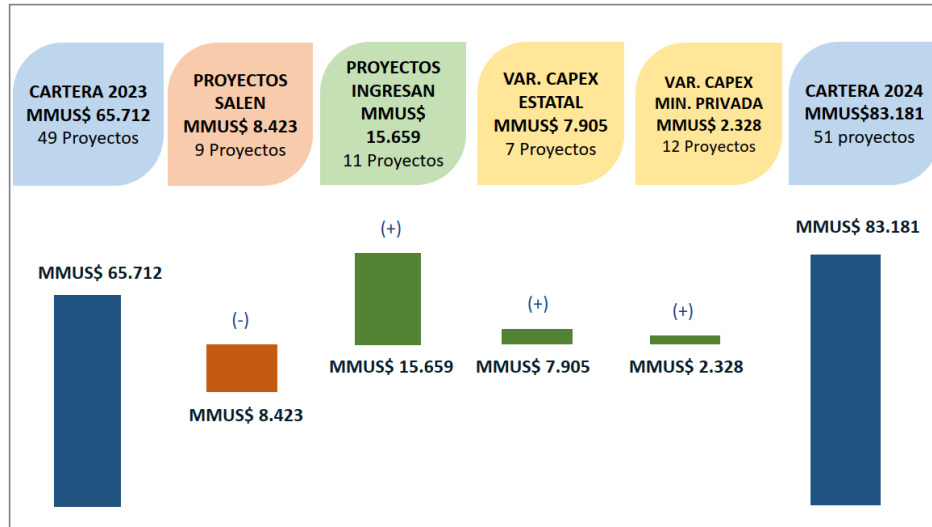


Figura 1.1: Cartera de inversión minera comparada en períodos 2023–2032 y 2024–2033. Fuente: COCHILCO [1].

1.2. Motivación

La industria minera enfrenta presiones crecientes por mejorar productividad y desempeño ambiental. Esto ha impulsado la adopción de estrategias de transformación digital y automatización. En este marco, iniciativas vinculadas a sostenibilidad suelen enmarcarse en agendas corporativas y en referencias globales como la Agenda 2030 de Naciones Unidas [14].

En plantas de procesos, el aumento de instrumentación y puntos de medición puede volver costosa y poco flexible una expansión basada exclusivamente en cableado. El impacto se acentúa cuando se requiere extender cobertura a áreas existentes o de difícil acceso. La complejidad de canalizaciones, bandejas y tendidos puede crecer rápidamente a medida que aumenta la densidad de sensores. Esto afecta costos de instalación y mantenimiento, y dificulta modificaciones posteriores. La Figura 1.2 ilustra esta situación.

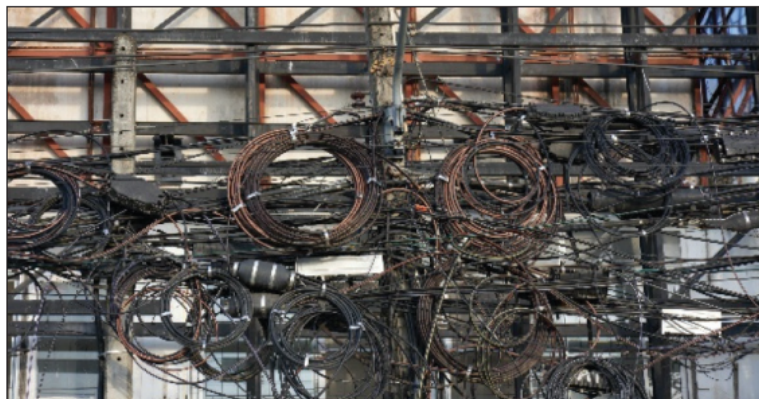


Figura 1.2: Ejemplo ilustrativo de la complejidad que pueden alcanzar los sistemas cableados en instalaciones industriales.

En consecuencia, tecnologías inalámbricas y soluciones basadas en IIoT se vuelven alternativas atractivas para aumentar la densidad de sensado y habilitar nuevos casos de uso de monitoreo. No obstante, su adopción en minería exige resolver decisiones técnicas no triviales. Entre ellas se incluyen coexistencia de tecnologías, integración con sistemas de control y operación bajo condiciones industriales severas. Además, en organizaciones de ingeniería, estas decisiones deben sostenerse con trazabilidad técnica y criterios reproducibles. Esto reduce el riesgo de decisiones *ad hoc* entre proveedores, protocolos y arquitecturas.

En este contexto, Hatch identificó la necesidad de disponer de una herramienta que sistematice el proceso de selección y dimensionamiento de tecnologías IIoT. El objetivo es que nuevos proyectos puedan evaluarse con un procedimiento estándar, parámetros explícitos y respaldo documental. Bajo esta motivación, esta memoria desarrolla una aplicación web y una base de datos orientadas a apoyar la selección de tecnologías IIoT para procesos mineros. Se busca reducir fricción operativa, facilitar transferencia de conocimiento y mejorar consistencia en decisiones de ingeniería.

1.3. Planteamiento del problema y brecha

La implementación de soluciones IIoT en plantas de procesos mineros exige decidir, de manera consistente, qué tecnologías de comunicación utilizar y cómo dimensionarlas. El diseño debe cumplir requerimientos del caso como alcance, latencia, confiabilidad, disponibilidad, energía, escalabilidad e integración con sistemas de control. Estas decisiones no se reducen a escoger un proveedor o un protocolo. Requieren verificar umbrales técnicos y justificar la selección bajo condiciones operacionales específicas.

En la práctica, la información necesaria para fundamentar estas decisiones se encuentra distribuida entre normas, guías técnicas, documentación de fabricantes y experiencia de especialistas. Como resultado, el análisis suele ejecutarse con criterios heterogéneos entre proyectos. Esto dificulta reproducir comparaciones y limita la trazabilidad de por qué se eligió una alternativa sobre otra.

La brecha identificada corresponde a la ausencia de un procedimiento estandarizado, orientado a procesos mineros, que permita traducir requerimientos del proyecto en criterios técnicos verificables. A partir de esos criterios, se requiere evaluar alternativas tecnológicas con resultados comparables y documentables. Esta memoria aborda dicha brecha mediante el desarrollo de una metodología de selección, implementada en una aplicación web y respaldada por una base de datos estructurada. El propósito es apoyar la toma de decisiones de ingeniería con consistencia y trazabilidad.

1.4. Panorama de estándares, guías y herramientas

1.4.1. ¿Cómo se ha abordado la selección en la práctica?

En proyectos industriales, la selección de tecnologías de conectividad inalámbrica para soluciones IIoT se apoya principalmente en estándares, guías de ingeniería y herramientas de planificación. Los estándares fijan requisitos y terminología común, mientras que las guías operativizan buenas prácticas de diseño e implementación. Los casos de uso documentados complementan este marco al aportar evidencia sobre desempeño y riesgos en aplicaciones reales.

En minería subterránea, la brecha de experiencia práctica asociada a comunicaciones industriales ha motivado la publicación de guías orientadas a planificación y diseño de infraestructura, como las del Global Mining Guidelines Group (GMG, por sus siglas en inglés) [15]. En plantas de procesos, la instrumentación inalámbrica se sustenta en estándares consolidados como IEC 62591 (WirelessHART) e IEC 62734 (ISA100.11a), que formalizan elementos de comunicación, gestión de red y seguridad, facilitando comparaciones consistentes entre alternativas [16, 17]. En Chile, la selección también debe alinearse con el marco regulatorio de uso del espectro radioeléctrico, particularmente en bandas de uso compartido donde puede existir interferencia [18].

Adicionalmente, la literatura propone metodologías explícitas para traducir requerimientos del caso en criterios verificables y comparables, incluyendo enfoques de análisis de requisitos y formulaciones de decisión multi-criterio (MCDM, por sus siglas en inglés). En este contexto, se reporta el uso de AHP (Analytic Hierarchy Process, por sus siglas en inglés) para asignar pesos a criterios, así como comparaciones estructuradas para tecnologías de redes de área amplia de baja potencia (LPWAN, por sus siglas en inglés) según objetivos de diseño y casos de uso [9, 10, 19].

1.4.2. Herramientas y desarrollos disponibles

En el mercado predominan herramientas orientadas a planificación y validación de cobertura y capacidad una vez definida la familia tecnológica. En redes celulares, Atoll se presenta como una plataforma de planificación y optimización de redes multi-tecnología a lo largo del ciclo de vida [20]. Para redes privadas LTE/5G y Wi-Fi en recintos, iBwave ofrece herramientas de diseño y despliegue orientadas a escenarios *in-building* [21]. En Wi-Fi, herramientas de levantamiento de sitio y planificación predictiva, como Ekahau, se emplean para diseño y verificación de despliegues [22].

Como complemento, algunos proveedores disponen de herramientas de dimensionamiento específicas para su ecosistema tecnológico, orientadas a estimar capacidad y restricciones de configuración una vez adoptada una tecnología. En soluciones WirelessHART, por ejemplo, Emerson ofrece calculadoras para estimación de capacidad de gateway y sus guías de ingeniería describen el uso de herramientas de apoyo al diseño y dimensionamiento, incluyendo estimación de capacidad y consideraciones de planificación asociadas [23, 24].

También existen selectores comerciales acotados y matrices de decisión publicadas por proveedores, usualmente enfocadas en conectividad celular o LPWAN [25, 26]. Sin embargo, estas

soluciones no consideran, dentro del mismo marco de decisión, estándares de instrumentación inalámbrica industrial como WirelessHART e ISA100.11a [16, 17]. En la revisión de fuentes públicas realizada para esta memoria, no se encontró evidencia de una aplicación comercial ampliamente adoptada que integre de manera integral la selección trazable entre estas familias tecnológicas. En contraste, se identifican recursos parciales que cubren etapas específicas del problema, como guías de buenas prácticas y herramientas de dimensionamiento asociadas a tecnologías particulares [3, 27].

1.4.3. Tecnologías empleadas en la solución propuesta

A partir de la brecha descrita, esta memoria implementa una aplicación web que formaliza un procedimiento de selección y lo hace reproducible, respaldado por una base de datos estructurada. La implementación utiliza Python/Streamlit para la interfaz, PostgreSQL para persistencia y Leaflet para la representación de nodos y enlaces en un mapa dinámico [28–30].

1.5. Objetivos del proyecto

1.5.1. Objetivo general

Desarrollar una aplicación web que apoye la selección de tecnologías basadas en IIoT para el sector minero, con el propósito de facilitar y estandarizar el procedimiento mediante el cual Hatch desarrolla este tipo de proyectos.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Realizar una investigación que defina el contexto teórico y normativo relacionado con la implementación de tecnologías IIoT en el sector minero.
2. Evaluar tecnologías de comunicación inalámbrica y dispositivos IIoT disponibles en el mercado, identificando su aplicabilidad en distintos entornos mineros y su integración con sistemas de control.
3. Establecer un procedimiento y criterios técnicos para la selección y el dimensionamiento de tecnologías IIoT en procesos mineros, basado en la investigación realizada.
4. Desarrollar una base de datos estructurada y una aplicación web que faciliten la elección de tecnologías IIoT, de acuerdo con los criterios establecidos y los requerimientos específicos de cada proyecto.

1.6. Alcances, limitaciones y supuestos

Este trabajo de título se desarrolla en el contexto de proyectos de plantas de procesos mineros en Chile, con énfasis en operaciones asociadas a minerales de cobre y litio. El procedimiento

propuesto y las herramientas desarrolladas se orientan a apoyar la selección de tecnologías IIoT y criterios de configuración a nivel de red. Se consideran familias tecnológicas, requerimientos mínimos y parámetros de dimensionamiento. No se aborda el desarrollo de software embebido, la programación de dispositivos ni la implementación de lógica de control asociada.

El procedimiento se plantea para escenarios típicos del sector minero donde la conectividad industrial y el monitoreo resultan críticos. Para acotar el alcance y mantener consistencia metodológica, el análisis se considera aplicable a minería subterránea, botaderos de ripios, pilas de lixiviación, tranques de relaves y mineroductos. Dado que estos escenarios presentan condiciones de operación y restricciones de infraestructura distintas, se asume que los requerimientos del caso pueden parametrizarse para reflejar particularidades de cada proyecto.

Ante la imposibilidad de implementar y operar una red piloto en condiciones reales de faena, la validación se realiza mediante un caso de estudio y análisis basado en información técnica disponible, criterios de ingeniería y supuestos explícitos del escenario. La caracterización de dispositivos IIoT se basa en información pública y documentación técnica de proveedores. En consecuencia, la base de datos representa un subconjunto de mercado. Puede no capturar la totalidad de alternativas disponibles o variaciones específicas por región. La aplicación se plantea como una herramienta de apoyo para etapas tempranas de ingeniería. La selección final de equipos, el diseño definitivo de infraestructura y la verificación en terreno deben abordarse en etapas posteriores del proyecto.

1.7. Estructura de la memoria

El documento se organiza en seis capítulos. El Capítulo 1 introduce el contexto, motivación y objetivos del trabajo, además de revisar el estado del arte industrial relacionado. El Capítulo 2 establece el marco teórico y normativo necesario para la selección de tecnologías IIoT en minería. En el Capítulo 3 se detalla la metodología de selección y dimensionamiento de las tecnologías, mientras que el Capítulo 4 describe la implementación de este método en la aplicación web y base de datos. El Capítulo 5 presenta el caso de estudio, aplicando la metodología desarrollada y analizando los resultados obtenidos. Finalmente, el Capítulo 6 ofrece las conclusiones y propone posibles trabajos futuros, contrastando los aportes del trabajo de título al estado del arte.

Capítulo 2

Fundamentos de IIoT

2.1. Conceptos fundamentales

2.1.1. Paradigma IIoT y convergencia OT/IT

En el contexto industrial, IIoT se entiende como la integración de activos físicos e instrumentación con sistemas digitales capaces de recolectar, transportar y procesar datos para apoyar la operación y el mantenimiento. A diferencia de aplicaciones IoT orientadas a consumo, el énfasis en IIoT recae en continuidad operacional, seguridad de procesos, disponibilidad de datos y compatibilidad con prácticas de automatización industrial.

En la literatura, IIoT se presenta como una aplicación de IoT en industria y se vincula con el enfoque de Industria 4.0, en el sentido de promover la digitalización consistente y la conectividad entre unidades productivas, integrando capacidades industriales tradicionales con tecnologías de internet [2].

A nivel de tendencia, el crecimiento del ecosistema IoT se refleja en el aumento de dispositivos conectados. Una estimación reciente proyecta 21,1 mil millones de dispositivos IoT conectados a nivel global a fines de 2025 [31]. En paralelo, si se restringe el concepto a conectividad celular, se proyectan 4,5 mil millones de conexiones IoT celulares a fines de 2025 [32]. Estas cifras no son equivalentes entre sí, ya que describen universos distintos (IoT total versus IoT celular), pero permiten dimensionar la escala de conectividad que sustenta el despliegue de soluciones IIoT.

Un rasgo conceptual clave de IIoT es la convergencia entre Tecnología Operacional (OT) y Tecnología de Información (IT). En términos generales, OT agrupa sistemas orientados al monitoreo y control directo de procesos y equipos físicos, mientras que IT agrupa plataformas de computación centradas en datos para almacenamiento, procesamiento, aplicaciones y analítica. Esta convergencia habilita que datos y estados operacionales del proceso sean explotados por servicios de información para gestión, optimización y soporte a la toma de decisiones [33]. La Figura 2.1 ilustra esta relación como base conceptual para estructurar el flujo de datos desde el nivel de planta hacia servicios de información.

2.1.2. Arquitectura funcional y flujo de datos

Desde un punto de vista funcional, una solución IIoT se describe como una cadena de extremo a extremo que va desde el punto de medición hasta el consumidor del dato. En una planta de procesos, esta cadena suele incluir: (i) dispositivos de campo (sensores, transmisores, actuadores o

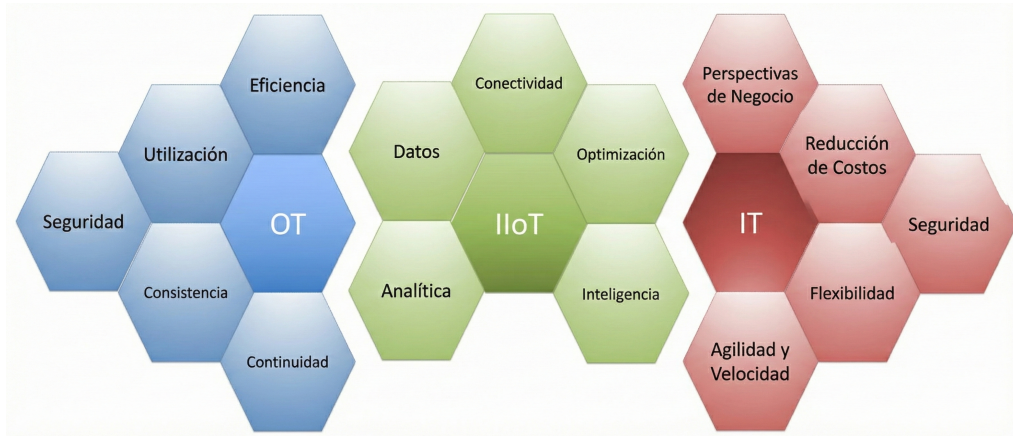


Figura 2.1: Convergencia entre OT e IT como base conceptual de IIoT. Fuente: adaptado de [2].

edge nodes); (ii) conectividad de acceso en terreno; (iii) una puerta de enlace, pasarela o *gateway*; y (iv) un sistema consumidor del dato, que puede corresponder a supervisión, historiadores, analítica o plataformas de integración.

El gateway cumple un rol central porque traduce protocolos, concentra tráfico y expone datos hacia redes y servicios de planta. Por ello, la conectividad en IIoT puede mezclar tramos inalámbricos en terreno con tramos cableados en infraestructura existente (por ejemplo, Ethernet industrial o fibra óptica), lo que refuerza que IIoT no se limita al medio de acceso, sino a la arquitectura completa que soporta el servicio de datos.

En términos de ingeniería, esta descomposición permite formular requerimientos de manera verificable, porque cada bloque introduce restricciones distintas. Por ejemplo, la conectividad de acceso condiciona alcance, robustez frente a interferencia y consumo energético, mientras que el bloque de agregación condiciona escalabilidad, capacidad de tráfico y mecanismos de integración con sistemas de planta.

2.1.3. Ciclo de vida del despliegue y relación con el diseño de conectividad

El despliegue de conectividad inalámbrica industrial se aborda como un ciclo de vida que incluye la definición del objetivo y del entorno, el levantamiento de condiciones del sitio, la selección de alternativas candidatas, el diseño de la solución, la instalación y la puesta en marcha, seguido por operación y monitoreo [3]. Esta secuencia separa decisiones conceptuales (por ejemplo, necesidades y restricciones del entorno) de decisiones de implementación (por ejemplo, configuraciones, instalación y verificación en terreno). La Figura 2.2 resume este ciclo de vida y se utiliza como referencia para situar el diseño de conectividad como parte de un proceso de ingeniería mayor [3].

Otro concepto transversal que influye en el desempeño es la topología de red, ya que determina cómo se organizan enlaces y rutas, condicionando cobertura, tolerancia a fallas y dependencia de nodos intermedios. En redes inalámbricas industriales se distinguen configuraciones de punto a punto (*single-hop*) y de punto a multipunto (*multi-hop*), además de topologías estrella y malla



Figura 2.2: Ciclo de vida de despliegues inalámbricos industriales. Fuente: adaptado de [3].

(*mesh*) [3]. Estas organizaciones implican compromisos diferentes: una topología estrella suele asociarse a un comportamiento temporal más determinista, mientras que una topología en malla tiende a mejorar la confiabilidad al habilitar rutas alternativas, típicamente a costa de menor determinismo [3]. La Figura 2.3 ilustra estas estructuras y se retoman en las secciones siguientes para contextualizar decisiones de comunicación inalámbrica y de protocolo.

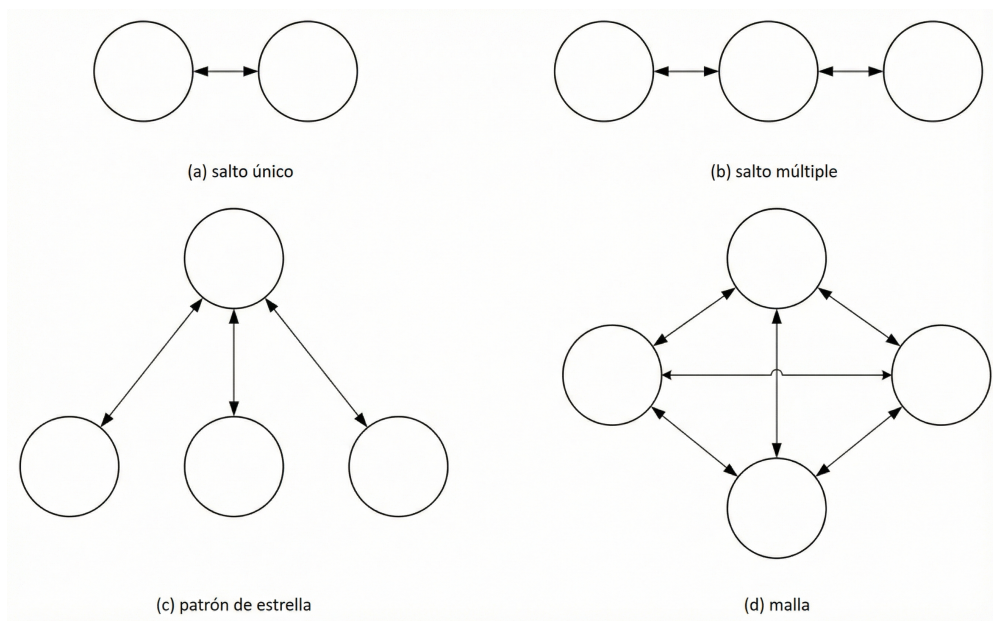


Figura 2.3: Ejemplos de topologías en redes inalámbricas industriales. Fuente: adaptado de [3].

Finalmente, para conectar estos conceptos con el desarrollo del marco teórico, la Sección 2.2 profundiza en la base física y de propagación que limita el desempeño de enlaces inalámbricos (pérdidas, ruido e interferencia), mientras que la Sección 2.3 organiza el rol de capas y protocolos que materializan la conectividad desde el dispositivo hasta la integración con sistemas de planta.

2.2. Fundamentos inalámbricos para conectividad IIoT

El desempeño de una solución IIoT depende en gran medida del medio de transmisión y de la forma en que el enlace inalámbrico interactúa con el entorno físico. En redes inalámbricas, el canal es compartido y accesible, y la propagación electromagnética queda expuesta a pérdidas, distorsiones e interferencias que no se presentan del mismo modo en enlaces cableados [3]. Por ello, antes de revisar protocolos y tecnologías específicas, esta sección establece conceptos físicos y métricas de ingeniería que permiten describir, evaluar y comparar enlaces inalámbricos en términos verificables.

2.2.1. Comunicación por radiofrecuencia y propagación electromagnética

La comunicación inalámbrica utiliza energía electromagnética que se propaga como ondas en el medio y cuya interacción con materiales del entorno puede limitar el alcance efectivo. En términos generales, materiales conductores tienden a reflejar gran parte de la energía, mientras que materiales no conductores pueden absorberla, produciendo atenuación. Además, la absorción depende de la frecuencia: ondas de menor frecuencia suelen penetrar mejor y perder energía más lentamente que ondas de mayor frecuencia, mientras que líquidos y vegetación pueden absorber de forma significativa [3]. Estas consideraciones son especialmente relevantes en minería, donde el entorno incluye estructuras metálicas, polvo, humedad y geometrías irregulares que afectan la propagación y la estabilidad del enlace.

Para formalizar lo anterior, el *canal* se entiende como el conjunto de características eléctricas y electromagnéticas del trayecto completo entre transmisor y receptor, incluyendo ancho de banda y distorsiones [3]. En la práctica industrial, el canal rara vez corresponde a un trayecto único: la energía puede ser atenuada u obstruida, y además reflejarse en múltiples superficies, generando *multi-path*. La Figura 2.4 ilustra un modelo simplificado donde el trayecto directo convive con trayectos reflejados, difractados y absorbidos, lo cual puede degradar la decodificación incluso cuando la potencia recibida es alta, debido a interferencia por superposición de componentes reflejadas [3].

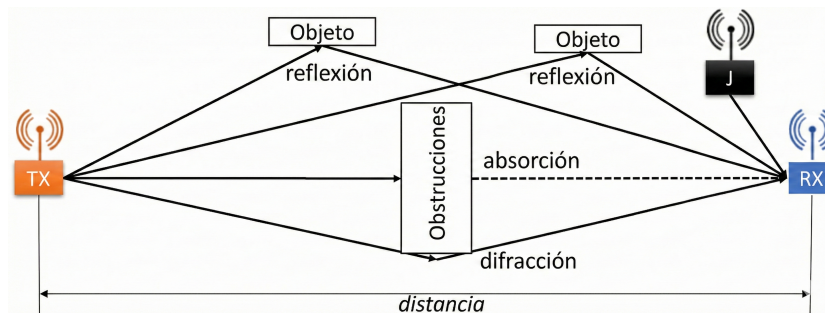


Figura 2.4: Modelo simplificado de canal radioeléctrico con obstrucción, reflexión, difracción y absorción. Fuente: adaptado de [3].

En primera aproximación, cuando la propagación ocurre en espacio libre (sin obstrucciones

ni reflexiones), la pérdida por trayecto puede modelarse como proporcional al cuadrado de la distancia e inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda [34]. Esta relación se expresa como

$$L = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2, \quad (2.1)$$

donde L es la pérdida de trayecto (adimensional), d es la distancia de propagación (m) y λ es la longitud de onda (m) [34]. En entornos reales, este modelo constituye una referencia base, pero la propagación se ve afectada por obstrucciones, reflexión y difracción, por lo que la pérdida efectiva suele diferir del caso ideal [3, 34].

Sobre esta base física, el diseño de enlaces requiere traducir el entorno en pérdidas cuantificables. Por ello, a continuación se presentan modelos de pérdida por trayecto y criterios geométricos, como línea de vista (LOS, por sus siglas en inglés) y zonas de Fresnel, que permiten representar de forma verificable la atenuación de la potencia a lo largo del enlace.

2.2.2. Modelos de pérdida por trayecto y atenuación específica del medio

Para cuantificar la degradación de potencia entre transmisor y receptor se utilizan modelos de pérdida por trayecto (*path loss*). Como referencia fundamental de propagación en ausencia de obstáculos, la pérdida básica en espacio libre se expresa en función de la frecuencia y la distancia. En unidades prácticas, para frecuencia f en MHz y distancia d en km, la pérdida en espacio libre se escribe como [35]:

$$L_{FS}(dB) = 32,4 + 20 \log_{10}(f_{\text{MHz}}) + 20 \log_{10}(d_{\text{km}}). \quad (2.2)$$

En entornos reales, la propagación rara vez se comporta como espacio libre debido a obstrucciones, dispersión y multitrayecto. Una aproximación ampliamente usada a gran escala es el modelo log-distancia, que generaliza la dependencia con la distancia mediante un exponente de pérdida n . Usando una distancia de referencia d_0 , la pérdida promedio se representa como [36]:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right), \quad (2.3)$$

donde $PL(d_0)$ puede calcularse con (2.2) en d_0 o definirse a partir de mediciones. En formulaciones más completas, se incluye un término aleatorio X_σ para representar variaciones por *shadowing* lognormal, lo que permite capturar fluctuaciones lentas del canal alrededor del valor promedio [36].

Además de la pérdida geométrica y del entorno, el medio puede introducir atenuación específica adicional (en dB/km) asociada a fenómenos atmosféricos y material particulado. En condiciones de polvo o arena, se han reportado dependencias cualitativas consistentes donde la atenuación específica tiende a aumentar con la frecuencia y la humedad relativa y a disminuir cuando la visibilidad mejora, junto con valores tabulados de atenuación específica para distintas bandas y escenarios [37]. En un presupuesto de enlace, este efecto puede modelarse como una pérdida adicional proporcional a la longitud del trayecto:

$$L_{\text{atm}} = \gamma_{\text{atm}} \cdot d, \quad (2.4)$$

donde γ_{atm} es la atenuación específica adoptada para el escenario, expresada en dB/km, y d es la longitud del trayecto en km.

2.2.3. Geometría del enlace: distancia, zonas de Fresnel y curvatura terrestre

En enlaces inalámbricos, el nivel de señal recibido no depende únicamente de la potencia radiada o del protocolo, sino de manera crítica de la geometría del trayecto entre antenas y de las obstrucciones presentes a lo largo del perfil del enlace, lo que motiva evaluar explícitamente la línea de vista y sus holguras geométricas antes de dimensionar parámetros verificados por presupuesto de enlace [4].

Zonas de Fresnel y criterio de despeje

Además de la línea de vista directa, el trayecto efectivo de propagación incluye componentes que pueden reflejarse o difractarse y luego recombinarse en el receptor. Ese comportamiento se formaliza mediante las zonas de Fresnel, definidas como regiones concéntricas alrededor del rayo directo, donde la diferencia de camino óptico respecto de la trayectoria LOS se relaciona con múltiplos de media longitud de onda. La primera zona de Fresnel constituye el volumen más crítico, ya que intrusiones dentro de esta región pueden inducir interferencia constructiva o destructiva en recepción, provocando variaciones relevantes del nivel recibido incluso cuando existe LOS [4].

La Figura 2.5 ilustra el concepto geométrico de zonas de Fresnel alrededor de la trayectoria LOS, mientras que la Figura 2.6 muestra que el radio de la primera zona define un elipsoide efectivo cuyo máximo se ubica aproximadamente en el punto medio del enlace [4]. En consecuencia, la verificación de despeje no se limita a asegurar visibilidad directa, sino a asegurar holgura suficiente respecto del volumen Fresnel.

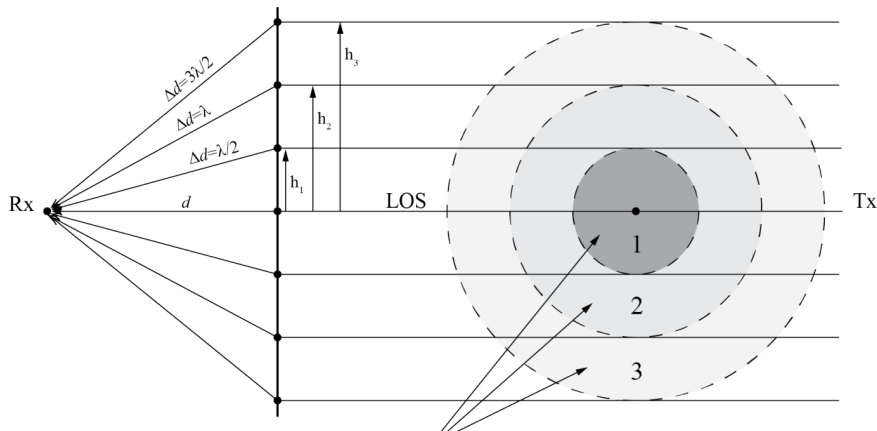


Figura 2.5: Zonas de Fresnel alrededor de la trayectoria LOS. Fuente: [4].

Para un punto ubicado a distancias d_1 y d_2 desde cada extremo del enlace, el radio de la

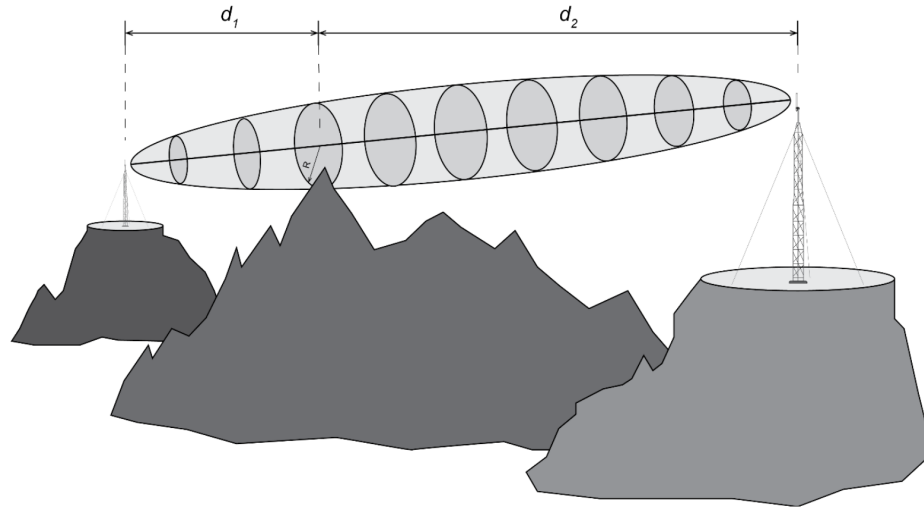


Figura 2.6: Forma elipsoidal efectiva asociada al radio de la primera zona de Fresnel a lo largo del enlace. Fuente: [4].

primera zona de Fresnel se expresa como [4]:

$$R_{F1} = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}, \quad (2.5)$$

donde λ es la longitud de onda. La relación entre longitud de onda y frecuencia se escribe como [4]:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.6)$$

con c la velocidad de la luz y f la frecuencia de operación.

Desde el punto de vista de diseño, una práctica recomendada consiste en mantener libre de obstrucciones al menos el 60 % del radio de la primera zona de Fresnel, de modo de reducir la probabilidad de desvanecimientos asociados a interferencia por trayectorias reflejadas o difractadas [4]. Esto se implementa evaluando el perfil del enlace (Figura 2.7) y verificando que las obstrucciones no invadan el umbral $0,6R_{F1}$ en los puntos críticos del trayecto.

Curvatura terrestre y radio efectivo

En enlaces de mayor extensión, la curvatura terrestre puede reducir la holgura geométrica aun cuando el terreno sea aparentemente plano. Sin embargo, la trayectoria real de propagación puede curvarse ligeramente por refracción atmosférica, lo que complica el análisis si se representa estrictamente como línea recta. Para conservar un tratamiento geométrico de línea recta, se emplea el concepto de radio terrestre efectivo, que ajusta el radio de la Tierra mediante un factor k asociado a condiciones atmosféricas [4]. En ausencia de datos locales, se utiliza un valor estándar $k = 1,33$ [4].

Bajo esta formulación, la “altura” asociada a la curvatura superficial en un punto del enlace

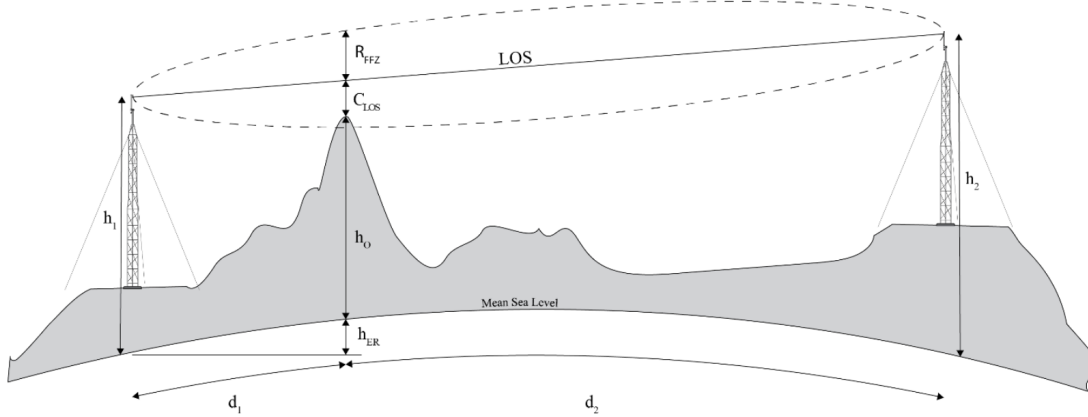


Figura 2.7: Perfil de trayecto con obstrucción y geometría de despeje respecto de LOS y zona de Fresnel. Fuente: [4].

puede expresarse en función de d_1 y d_2 como [4]:

$$h_{ER} = \frac{d_1 d_2}{12,74 k}, \quad (2.7)$$

donde las distancias están en km y h_{ER} queda en metros según la convención del modelo citado.

La holgura LOS respecto de una obstrucción se calcula comparando la altura de la recta que une las antenas con la elevación de la obstrucción y el término de curvatura. Para un punto a distancia d_1 desde un extremo del enlace (con distancia total $d = d_1 + d_2$), la holgura se expresa como [4]:

$$C_{LOS} = h_1 + \left(\frac{h_2 - h_1}{d} \right) d_1 - h_{ER} - h_0, \quad (2.8)$$

donde h_1 y h_2 son las alturas de las antenas (referidas a un mismo datum) y h_0 es la altura de la obstrucción en el punto evaluado. Valores positivos indican que la obstrucción queda bajo la línea LOS, mientras que valores negativos indican que la obstrucción supera la LOS [4].

Para incorporar el criterio de despeje de Fresnel, se define la holgura relativa respecto de $0,6R_{F1}$ como [4]:

$$C_{F1} = C_{LOS} - 0,6R_{F1}, \quad (2.9)$$

donde $C_{F1} < 0$ indica intrusión en la región crítica de Fresnel que se asocia a pérdidas adicionales o desvanecimientos.

En síntesis, la evaluación geométrica integra (i) perfil de trayecto, (ii) despeje de Fresnel y (iii) curvatura efectiva, y entrega condiciones de viabilidad geométrica del enlace que luego se conectan con las métricas de ingeniería del presupuesto de enlace y el margen, desarrolladas en las subsecciones siguientes.

2.2.4. Conceptos y parámetros RF relevantes para ingeniería

El desempeño observado en una red IIoT resulta de la combinación entre condiciones del canal y parámetros configurables del sistema inalámbrico. Entre los parámetros físicos se incluyen

la potencia de transmisión, el ancho de banda, la tasa de bits, el ciclo de trabajo y el esquema de modulación [3]. A nivel de confiabilidad, también influyen mecanismos como codificación de control de errores, espectro ensanchado y salto en frecuencia, los cuales modifican la inmunidad a interferencia y la probabilidad de decodificación exitosa [3].

Para cuantificar ganancias y pérdidas se emplea la escala logarítmica en decibeles. Para razones de potencia, la relación se define como

$$A_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right), \quad (2.10)$$

donde A_{dB} es una ganancia o pérdida en dB y P_2 y P_1 son potencias expresadas en las mismas unidades (por ejemplo, W o mW) [38]. En especificaciones inalámbricas, la potencia suele expresarse en dBm, definida respecto de 1 mW, mediante

$$P_{\text{dBm}} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1 \text{ mW}} \right), \quad (2.11)$$

donde P_{dBm} es la potencia en dBm y P es la potencia en mW [34]. Este formato facilita representar niveles típicos de recepción, que suelen ser muy inferiores a 1 mW en enlaces de instrumentación [34].

La potencia de transmisión corresponde a la energía de radiofrecuencia radiada por la antena del transmisor, normalmente especificada en W, dBW o dBm, y condiciona el nivel de potencia que puede llegar al receptor en conjunto con las pérdidas del sistema y del trayecto [3]. En términos de diseño, aumentar potencia no implica necesariamente una mejora global: incrementos de potencia pueden elevar el nivel de interferencia hacia otras redes en la misma banda y reducir la vida útil de baterías, por lo que el ajuste de potencia se evalúa junto con requerimientos de servicio y consideraciones de coexistencia [3]. De forma complementaria, la antena introduce atributos clave como ganancia y directividad, los cuales se relacionan con cómo la energía se distribuye en el espacio según la dirección. En la práctica, esta diferencia suele describirse mediante el patrón de radiación, distinguiéndose configuraciones omnidireccionales y direccionales, ampliamente utilizadas en aplicaciones industriales [5, 34].

Antenas: omnidireccionales vs. direccionales

Una antena puede entenderse como el elemento que permite *radiar* energía electromagnética al transmitir y *captar* energía electromagnética al recibir, transformándola hacia/desde señales eléctricas de radiofrecuencia en el equipo [5]. En la práctica, su comportamiento se describe mediante el *patrón de radiación*, una representación (usualmente en corte 2D) de cuánta potencia se irradia según la dirección espacial [5]. Este patrón explica dos configuraciones típicas en industria: (i) antenas **omnidireccionales**, que tienden a distribuir potencia de forma más uniforme alrededor del nodo, y (ii) antenas **direccionales**, que concentran la energía en una dirección preferente para aumentar alcance o robustez en enlaces punto-a-punto [5]. La Figura 2.8 ilustra esta diferencia conceptual y entrega una lectura directa de por qué la orientación y el tipo de antena condicionan la cobertura efectiva.

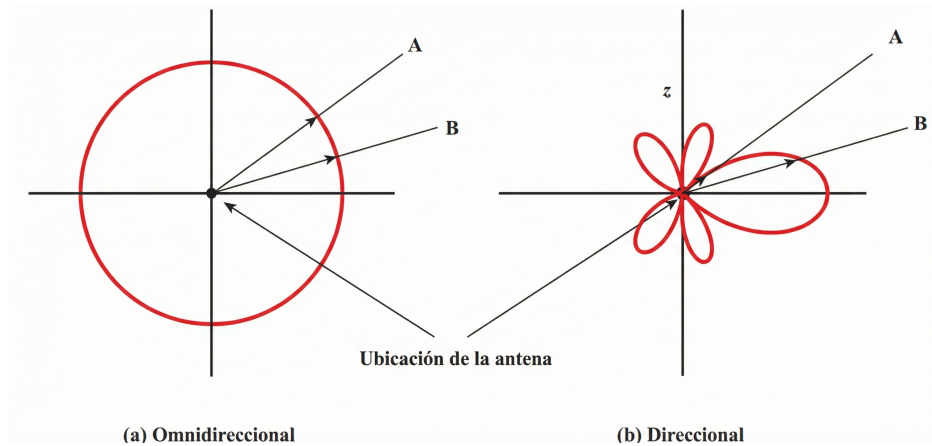


Figura 2.8: Patrones de radiación conceptuales: (a) omnidireccional y (b) direccional. La distancia radial representa potencia relativa radiada en cada dirección (corte 2D). Fuente: adaptado de [5].

El ancho de banda es la porción de espectro asociada a una señal y constituye un recurso limitado en redes inalámbricas [38]. En presencia de ruido, la cantidad máxima de información que puede transportarse queda acotada por la capacidad de Shannon:

$$C = B \log_2 (1 + \text{SNR}), \quad (2.12)$$

donde C es la capacidad teórica del canal (bit/s), B es el ancho de banda (Hz) y SNR es la relación señal–ruido, definida más adelante en la ecuación 2.13 de la Subsección 2.2.6. Esta relación permite interpretar que, a igualdad de ancho de banda, un aumento del ruido reduce SNR y, por tanto, disminuye la capacidad máxima alcanzable. En términos prácticos, esto se refleja en menores tasas efectivas y mayor probabilidad de error cuando el receptor opera con menor holgura frente al piso de ruido o interferencia [3].

La tasa de bits corresponde a la cantidad promedio o pico de datos transmitidos por unidad de tiempo (bps) [3]. En aplicaciones IIoT, la tasa de bits requerida depende del tipo de variable, resolución, frecuencia de muestreo y sobrecargas de protocolo; además, a mayor tasa objetivo, se vuelve más exigente la calidad del canal y la relación señal-ruido/interferencia [3]. El ciclo de trabajo (*duty cycle*) se define como el porcentaje del tiempo en que un transmisor permanece activo [3]. Este parámetro incide directamente en consumo energético y en carga del canal: ciclos de trabajo altos incrementan la ocupación del medio, elevando la probabilidad de colisión o interferencia y reduciendo escalabilidad, mientras que ciclos bajos preservan energía y reducen congestión, pero pueden limitar la actualización de variables y la capacidad de respuesta del sistema [3]. En tecnologías y bandas con restricciones regulatorias, el ciclo de trabajo también se asocia a límites de operación y convivencia en espectro no licenciado [9].

La modulación corresponde al método mediante el cual la información modifica el comportamiento de una portadora de radiofrecuencia (RF). Existen modulaciones asociadas a variaciones de amplitud (AM, por sus siglas en inglés), frecuencia (FM, por sus siglas en inglés) o fase (PM, por sus siglas en inglés), y sus versiones digitales operan de manera discreta sobre esas mismas magnitudes [3]. En comunicaciones industriales son comunes esquemas como *binary phase*

shift keying (BPSK), *quadrature phase shift keying* (QPSK) y *quadrature amplitude modulation* (QAM), entre otros [3]. En tecnologías como Wi-Fi, el sistema puede alternar entre BPSK, QPSK y distintos órdenes de QAM según la calidad del canal, sosteniendo un compromiso entre robustez y tasa de datos [3]. En la práctica, este compromiso se refleja directamente en parámetros reportados por fichas técnicas, como tasa de datos soportada, sensibilidad del receptor y alcance típico bajo condiciones nominales [38].

De forma complementaria, muchas especificaciones incorporan mecanismos de confiabilidad en la capa física, como *error control coding* (ECC), *frequency hopping* (FH) y *spread spectrum* (SS), con el objetivo de mitigar errores por ruido/interferencia o por variaciones del canal, normalmente a costa de complejidad y/o reducción de la tasa útil efectiva [3]. En consecuencia, en aplicaciones IIoT el análisis comparativo puede apoyarse en parámetros ya calculados por el fabricante (por ejemplo, sensibilidad de recepción y potencia máxima de transmisión) para estimar la factibilidad del enlace bajo escenarios ambientales representativos.

2.2.5. Ruido, interferencia electromagnética y coexistencia

La calidad de una comunicación inalámbrica queda condicionada por perturbaciones que elevan el nivel efectivo de potencia que percibe el receptor. En términos físicos, la señal útil debe superar un piso compuesto por ruido e interferencias, los cuales reducen la capacidad de detectar y decodificar correctamente [3]. En la práctica industrial, la interferencia electromagnética (EMI) aparece con mayor o menor intensidad y puede degradar el desempeño al introducir energía RF no deseada que afecta el canal o el receptor; cuando la perturbación alcanza niveles comparables a la señal de interés, se incrementan errores y pérdidas de comunicación [3].

La Figura 2.9 ilustra este fenómeno en un esquema simplificado: al sumarse el ruido a la señal transmitida, algunas muestras en el receptor pueden cruzar el umbral de decisión, provocando discrepancias entre los bits transmitidos y los bits recibidos. Este efecto entrega una intuición directa de por qué un aumento del ruido o de la interferencia se traduce en mayor probabilidad de error y menor confiabilidad del enlace.

La coexistencia de tecnologías en bandas compartidas introduce escenarios donde múltiples emisiones ocupan el mismo espectro. La Figura 2.10 muestra un ejemplo de actividad en la banda industrial, científica y médica (ISM) de 2.4 GHz, donde se observan transmisiones de Wi-Fi y, simultáneamente, actividad atribuible a instrumentación inalámbrica de banda angosta con saltos de frecuencia, ilustrando un escenario de potencial interferencia por coexistencia [3]. Este tipo de evidencia sustenta la necesidad de considerar el uso espectral local al diseñar conectividad IIoT.

En comunicaciones inalámbricas industriales, el desempeño del enlace no depende únicamente del protocolo, sino también del comportamiento físico del canal y del entorno radioeléctrico donde opera la red. Muchas soluciones industriales (por ejemplo, redes basadas en IEEE 802.15.4) utilizan la banda no licenciada de 2,4–2,5 GHz (ISM), la cual es compartida con otros sistemas de uso masivo. En consecuencia, la ocurrencia de interferencia resulta plausible y, en aplicaciones no críticas, eventuales fallas pueden compensarse mediante retransmisiones sin consecuencias relevantes. En aplicaciones industriales, interrupciones momentáneas originadas por interferen-

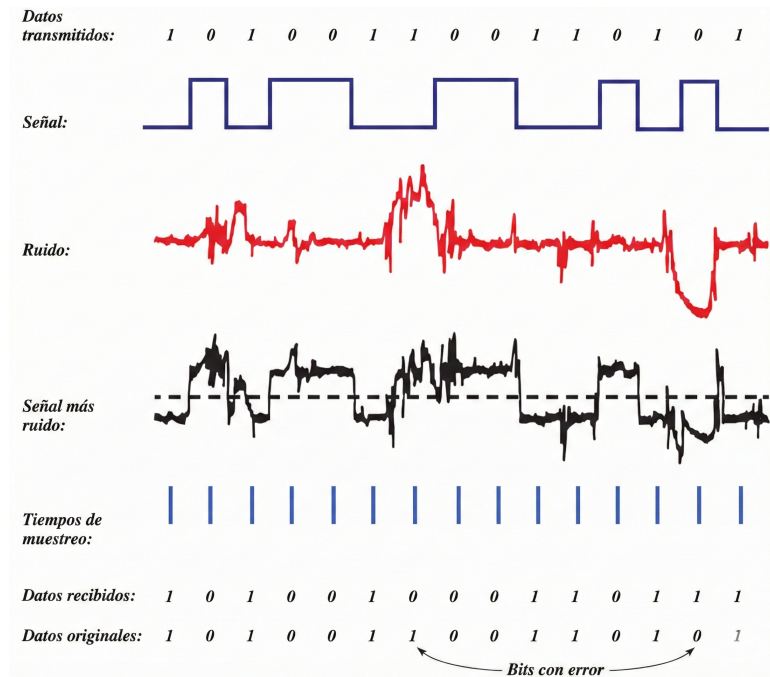


Figura 2.9: Ejemplo conceptual de errores de bit debido a ruido en el proceso de muestreo y decisión del receptor. Fuente: adaptado de [5].

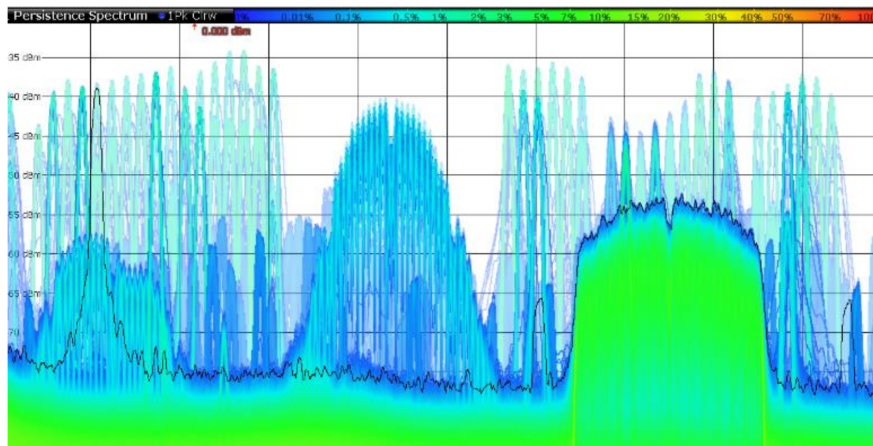


Figura 2.10: Ejemplo de actividad espectral en la banda ISM de 2.4 GHz, con coexistencia de múltiples transmisiones. Fuente: [3].

cia o por reflexiones del canal pueden ser suficientes para provocar detenciones de sistema o condiciones inseguras; por ello, las soluciones diseñadas para uso industrial priorizan atributos como robustez, seguridad y disponibilidad, aun operando en esta banda compartida [34].

En terreno, el término interferente no suele ser estacionario, ya que la presencia de emisores intencionados o no intencionados puede variar en el tiempo, y tanto la ocupación en frecuencia como el ancho de banda de la interferencia pueden cambiar dinámicamente [39]. En consecuencia, la interferencia efectiva que enfrenta un enlace puede fluctuar durante la operación, reforzando la necesidad de evaluar convivencia y robustez en condiciones representativas del entorno operativo.

Además de la interferencia por coexistencia, el entorno físico puede introducir degradaciones sistemáticas de propagación que se manifiestan como pérdidas adicionales en el trayecto. En ambientes expuestos a polvo o arena, se reporta una atenuación específica adicional, expresada en dB/km, según ecuación 2.4, donde γ_{atm} aumenta al incrementar la frecuencia y la humedad relativa, y que se intensifica al reducirse la visibilidad [37]. Estas tendencias permiten incorporar el fenómeno como una pérdida ambiental adicional proporcional a la distancia en el presupuesto de enlace cuando se analizan escenarios de operación severa, diferenciándolo de la interferencia, que se modela como energía no deseada superpuesta al canal o al receptor.

Este vínculo entre interferencia y errores también se ha observado de manera experimental en contextos mineros. En mediciones en un entorno tipo túnel, el incremento de la potencia interferente se asoció con un aumento pronunciado de la tasa de error de bit (BER) y con un aumento correlacionado de la tasa de pérdida/error de paquete [40]. Este resultado es consistente con la interpretación introducida en la Figura 2.9: al aumentar el componente no deseado que enfrenta el receptor, se incrementa la probabilidad de decisiones incorrectas y se degrada la confiabilidad de la comunicación.

En síntesis, los efectos del entorno pueden interpretarse como dos contribuciones complementarias sobre el enlace: por un lado, pérdidas adicionales dependientes del medio (por ejemplo, polvo y humedad) que reducen la potencia recibida; y por otro, interferencia electromagnética y coexistencia, que aportan energía de RF adicional en la banda de operación e incrementan el piso de ruido efectivo que percibe el receptor (ruido más interferencia). Ambos mecanismos disminuyen la relación señal-a-ruido-e-interferencia y, en consecuencia, degradan el desempeño observable del enlace (por ejemplo, mayor probabilidad de error y menor caudal efectivo), lo que se formaliza en la subsección siguiente mediante métricas como SNR/SNIR [3].

2.2.6. Métricas de desempeño del enlace: SNIR, presupuesto de enlace y margen

Para conectar el fenómeno físico con resultados observables (errores, pérdidas de paquetes, disponibilidad), se emplean métricas que relacionan potencia de señal útil con ruido e interferencia. La relación señal-a-ruido (SNR) se expresa como la razón de potencias

$$\text{SNR} = \frac{S}{N}, \quad (2.13)$$

donde S es la potencia de la señal útil y N es la potencia de ruido (ambas en W o mW) [38]. En presencia de interferencia, resulta útil considerar la relación señal-a-(ruido+interferencia),

denotada como SNIR:

$$\text{SNIR} = \frac{S}{N + I}, \quad (2.14)$$

donde I es la potencia de interferencia [3]. Esta métrica es particularmente relevante en bandas compartidas, donde la interferencia puede dominar sobre el ruido térmico.

Para evaluar la factibilidad de una comunicación se utiliza el *presupuesto de enlace (link budget)* como cálculo que estima la probabilidad de detección y decodificación, considerando potencia de transmisión, formato de señal, ruido, distorsiones, interferencia, características del receptor y requerimientos de confiabilidad [3]. En forma aditiva en dB/dBm, una expresión compacta para la potencia recibida puede escribirse como

$$P_{\text{Rx}} = P_{\text{Tx}} + G_{\text{Tx}} + G_{\text{Rx}} - L_{\text{path}} - L_{\text{misc}}, \quad (2.15)$$

donde P_{Rx} es la potencia recibida (dBm), P_{Tx} es la potencia transmitida (dBm), G_{Tx} y G_{Rx} son las ganancias de antena (dB), L_{path} representa pérdidas por propagación (dB) y L_{misc} agrupa pérdidas adicionales del sistema (dB), tales como conectores, cables u otros términos de implementación [38]. Este marco es consistente con la descomposición por etapas de ganancias y pérdidas que se utiliza en ingeniería de enlaces.

Complementariamente, el *margen de enlace (link margin)* se define como la holgura, en dB, entre la potencia recibida esperada y el umbral mínimo de recepción requerido para decodificar con el desempeño objetivo (por ejemplo, asociado a sensibilidad del receptor o a un nivel mínimo para cierta tasa de error) [3, 34]. En forma directa, puede expresarse como

$$M_{\text{link}} = P_{\text{Rx}} - P_{\text{min}}, \quad (2.16)$$

donde M_{link} es el margen de enlace (dB), P_{Rx} es la potencia recibida estimada (dBm) y P_{min} es la potencia mínima requerida en el receptor (dBm) [3]. Un margen positivo reserva holgura ante variaciones razonables del entorno, pérdidas adicionales no modeladas explícitamente o incrementos temporales de interferencia.

Aunque el presupuesto de enlace y el margen caracterizan la factibilidad física de la comunicación, el desempeño observado también depende de cómo múltiples nodos comparten el canal inalámbrico. Por ello, a continuación se revisan efectos de acceso al medio, como colisiones y terminales ocultos/expuestos, que impactan latencia, confiabilidad y consumo.

2.3. Protocolos de comunicación industrial

Además del comportamiento físico del canal y del enlace radio, la conectividad IIoT depende de cómo se organizan y estandarizan las funciones de comunicación que permiten transportar datos desde dispositivos de campo hacia sistemas de automatización y plataformas de datos. Para estructurar esta discusión, resulta útil separar dichas funciones por capas, de modo de distinguir qué parte del desempeño depende del medio de transmisión y qué parte depende de mecanismos de direccionamiento, transporte e integración [3, 5].

2.3.1. Arquitectura en capas para redes industriales (OSI, TCP/IP e IEEE 802)

Los sistemas de comunicación suelen describirse mediante una arquitectura en capas, donde cada capa cumple un propósito lógico para habilitar el servicio extremo a extremo. El modelo de referencia más utilizado para esta descripción es el *Open Systems Interconnect* (OSI), el cual estructura las funciones de red en siete capas (desde Física hasta Aplicación) [3]. En redes inalámbricas, esta separación es especialmente útil porque permite distinguir las funciones ligadas al medio de transmisión (por ejemplo, modulación, transmisión y acceso al medio) de aquellas asociadas al direccionamiento y a la entrega lógica de datos [3].

En particular, en una red inalámbrica las capas 1 y 2 abarcan funciones directamente vinculadas a la transmisión, incluyendo transmisión de señal, modulación, codificación de control de errores, *framing* y control de acceso al medio (MAC). Sobre estas capas se implementan funciones de direccionamiento lógico, establecimiento de conexión y retransmisiones en caso de errores [3]. A modo de referencia práctica, la Tabla 2.1 resume las capas OSI y su propósito general.

Tabla 2.1: Modelo OSI: unidad de datos y propósito general por capa (adaptado de [3]).

#	Capa	PDU	Propósito
7	Aplicación	Data	Interfaces y servicios de alto nivel
6	Presentación	–	Codificación/formato hacia aplicaciones
5	Sesión	–	Gestión del intercambio de datos
4	Transporte	Segment/Datagram	Entrega y confiabilidad extremo a extremo
3	Red	Packet	Direccionamiento lógico, ruteo y control de tráfico
2	Enlace de datos	Frame	Direccionamiento físico (MAC) y <i>framing</i>
1	Física	Bit	Transmisión/recepción sobre el medio

Aunque OSI es un marco conceptual ampliamente utilizado, en la práctica domina la arquitectura TCP/IP como implementación de referencia para redes modernas. Sin embargo, sigue siendo habitual describir sistemas y protocolos usando el lenguaje de “capas” de OSI por su claridad al delimitar funciones [5]. La Figura 2.11 muestra una comparación entre ambas arquitecturas, evidenciando cómo TCP/IP agrupa varias funciones de OSI en menos capas, manteniendo una correspondencia funcional aproximada [5].

Además, en tecnologías de comunicación industrial basadas en estándares IEEE 802 (por ejemplo, Ethernet y varias tecnologías inalámbricas), es común describir el alcance de la estandarización en términos de capas inferiores. En particular, IEEE 802 organiza las capas bajas separando el control lógico de enlace (*Logical Link Control*, LLC) y el control de acceso al medio (MAC), además de los elementos de la capa física (PHY) [5]. La Figura 2.12 ilustra esta relación entre OSI e IEEE 802, mostrando que el foco del estándar se concentra en Enlace de datos y Física, mientras que los protocolos de capas superiores se mantienen independientes de la tecnología de acceso [5].

Este marco por capas se utiliza en las subsecciones siguientes para ordenar la discusión: en 2.3.2 se revisan protocolos cableados industriales como parte de la infraestructura OT, mientras

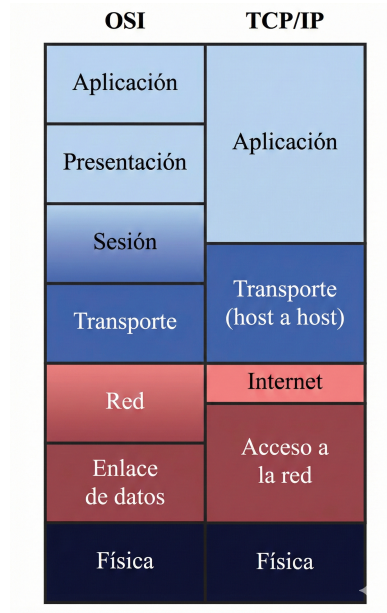


Figura 2.11: Comparación entre las arquitecturas de protocolos OSI y TCP/IP. Fuente: adaptado de [5].

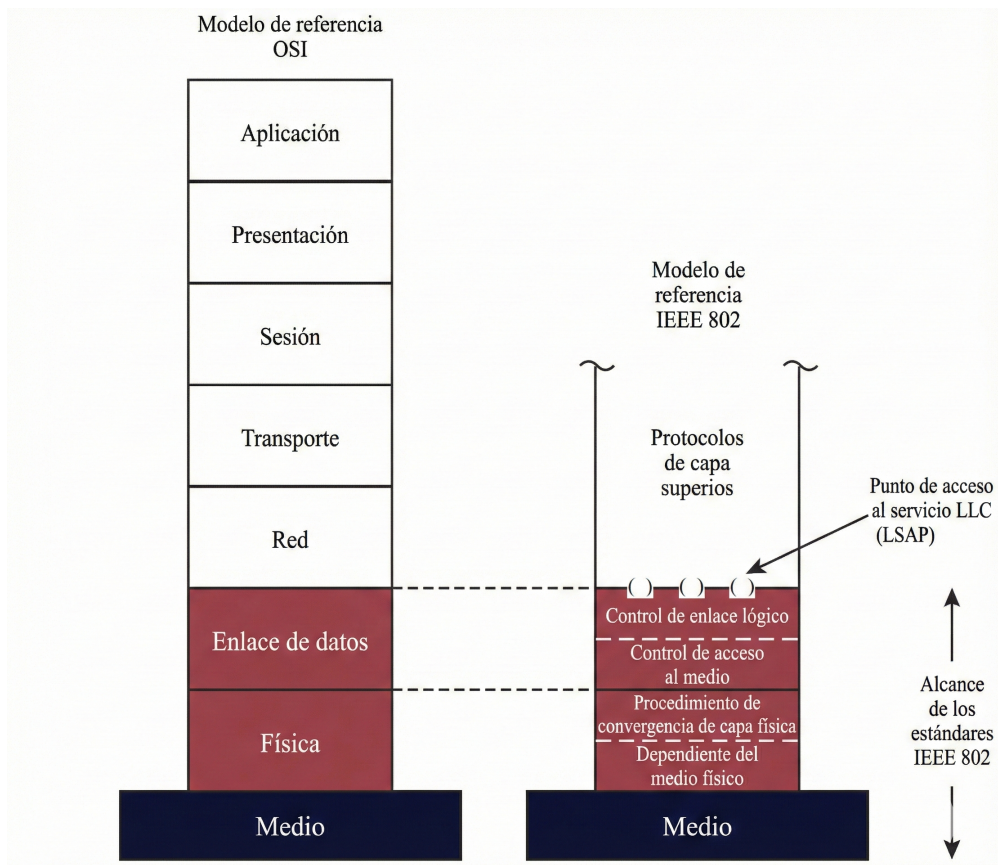


Figura 2.12: Relación entre el modelo OSI y el modelo de referencia IEEE 802 (LLC/MAC/PHY). Fuente: adaptado de [5].

que en 2.3.3 se revisan protocolos inalámbricos industriales, donde las decisiones en PHY/MAC y en topología influyen directamente en el comportamiento operativo de la conectividad [3].

2.3.2. Protocolos de comunicación industrial cableada

En automatización industrial, los protocolos cableados han sido tradicionalmente el medio principal para integrar instrumentos, módulos de E/S, actuadores y controladores, debido a su alta disponibilidad y a su comportamiento determinista en entornos exigentes. En la práctica, coexisten dos familias: (i) *buses de campo* orientados al nivel de planta (sensores/actuadores y E/S remotas) y (ii) redes basadas en Ethernet industrial, que facilitan integración con sistemas de ingeniería, diagnóstico y, en ciertos casos, operación en tiempo real.

Buses de campo (nivel de campo e instrumentación)

Los *fieldbuses* responden a la necesidad de reducir cableado punto-a-punto y estandarizar el intercambio de datos con dispositivos distribuidos. Un ejemplo en el nivel más bajo es Actuator-Sensor Interface (AS-i), concebido para sustituir mazos de señales discretas entre sensores/actuadores y el controlador mediante un único cable, simplificando la instalación y permitiendo intercambio de datos cíclico con tiempos de reacción del orden de milisegundos [41, 42].

En instrumentación y comunicación serie, Modbus se utiliza ampliamente debido a su simplicidad y adopción. El estándar contempla variantes como Modbus RTU/ASCII (típicamente sobre enlaces RS-232/RS-485) y Modbus TCP/IP sobre Ethernet, además de especificar direccionamiento y un modelo de comunicación maestro/esclavo (cliente/servidor) [41, 42].

Adicionalmente, en instrumentación de procesos, HART (Highway Addressable Remote Transducer) se diseñó para superponer datos digitales sobre el lazo 4–20 mA mediante modulación FSK, habilitando comunicación digital con cambios mínimos en el cableado existente [41, 42]. Este punto es pertinente en minería, donde parte de la instrumentación de planta mantiene infraestructura basada en lazos analógicos, y el valor suele estar en la retrocompatibilidad e interoperabilidad.

Ethernet industrial

La adopción de Ethernet en planta habilita mayores anchos de banda y compatibilidad con estándares IT, manteniendo requisitos industriales de robustez y diagnóstico. En este contexto, PROFINET se presenta como una evolución basada en Ethernet e integrada con la experiencia previa de PROFIBUS e Industrial Ethernet, con el objetivo de ser un estándar abierto para automatización y de permitir el uso conjunto de componentes Ethernet estándar y equipos reforzados para el entorno industrial [41, 42].

A nivel funcional, PROFINET IO se concibe para aplicaciones descentralizadas de automatización y se apoya en conmutación Ethernet (*switched Ethernet*) en modo dúplex, permitiendo transmisión y recepción simultánea, con anchos de banda típicos de 100 Mbit/s en implementaciones descritas en la bibliografía [41, 42]. Esta base facilita integrar E/S remotas y dispositivos de

campo con herramientas de ingeniería y diagnóstico comunes, y permite estrategias de migración desde redes PROFIBUS manteniendo una vista de aplicación familiar para el programador.

En la instalación, Ethernet industrial suele operar en topologías como estrella, árbol y línea; en PROFINET, la estructura en línea puede reducir cableado al aprovechar *switches* integrados en dispositivos, aunque la falla de un elemento de acoplamiento puede segmentar la red [41, 42].

En automatización de procesos, una tendencia reciente es Ethernet-APL (*Advanced Physical Layer*), orientada a extender Ethernet hasta el nivel de campo mediante *Single-Pair Ethernet* (SPE). En esta aproximación, Ethernet-APL se basa en 10BASE-T1L (IEEE 802.3cg) y se plantea para operar sobre un par de conductores con alcances del orden de 1000 m a 10 Mbit/s en modo *full-duplex*, apuntando a habilitar instrumentación de campo con conectividad Ethernet manteniendo atributos de robustez para planta de procesos [43, 44]. Para aplicaciones con requerimientos de seguridad intrínseca en áreas potencialmente explosivas, Ethernet-APL incorpora definiciones asociadas a 2-WISE (IEC TS 60079-47), lo que permite especificar segmentos y parámetros de instalación compatibles con dicho tipo de protección [45]. Dado que se trata de una capa física, su uso es compatible con distintos protocolos Ethernet industriales en capas superiores, manteniendo el principio de separación por capas descrito previamente [43, 46].

En síntesis, los protocolos cableados constituyen la base de conectividad más extendida en automatización industrial, aportando estabilidad y facilidad de integración en la infraestructura OT de planta. Sobre este marco, la subsección siguiente revisa protocolos inalámbricos industriales, cuyo diseño debe enfrentar un medio compartido y variable sin perder requisitos de disponibilidad y robustez en aplicaciones de minería.

2.3.3. Protocolos de comunicación inalámbrica

Visión funcional de protocolos inalámbricos industriales

En una red inalámbrica industrial, los protocolos se organizan por capas para separar funciones y facilitar la interoperabilidad. En las capas inferiores se resuelven la transmisión por radio y el acceso al medio compartido, mientras que en capas superiores se definen mecanismos de transporte, direccionamiento e integración de datos hacia aplicaciones industriales [3]. Esta separación permite describir el comportamiento de la comunicación inalámbrica de forma modular, distinguiendo los fenómenos dominados por el entorno radioeléctrico de aquellos asociados al intercambio lógico de información.

En la práctica, los datos que genera un sensor o recibe un actuador inalámbrico suelen concentrarse en una puerta de enlace o *gateway*, desde donde se integran a redes y servicios de planta (por ejemplo, control, supervisión, historiadores o analítica). El *gateway* cumple un rol funcional de interoperabilidad al concentrar tráfico y exponer la información en protocolos entendibles por sistemas industriales o plataformas de datos, evitando que el dato quede “encerrado” en un formato propio de la red inalámbrica [3]. La Figura 2.13 ilustra este flujo conceptual, donde múltiples nodos alcanzan el *gateway* directa o indirectamente, y el sistema de planta consume los datos a través de la infraestructura de comunicaciones disponible.

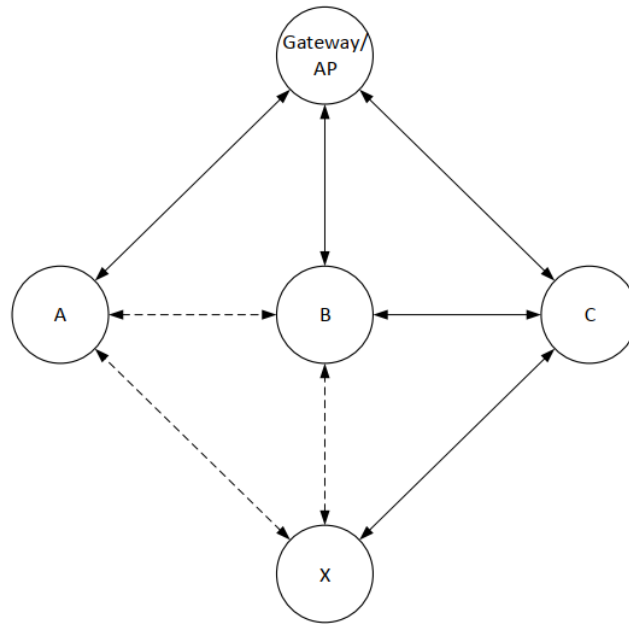


Figura 2.13: Rol funcional del *gateway* como punto de agregación e integración entre la red inalámbrica y los sistemas de planta. Fuente: [3].

Adicionalmente, el intercambio de datos a través de la pila de protocolos implica *encapsulación*: al descender por las capas se agregan encabezados y campos de control (por ejemplo, direccionamiento, verificación de integridad y control del acceso al medio). Como consecuencia, la tasa de transmisión de la capa física y el caudal útil disponible para una aplicación no necesariamente coinciden, y la diferencia depende del *overhead* y de mecanismos de confiabilidad como detección de errores y retransmisiones [5].

En entornos industriales, el desempeño inalámbrico suele describirse mediante parámetros de operación y mecanismos de robustez declarados por el sistema, junto con verificación funcional en condiciones representativas. En este contexto, conceptos como salto en frecuencia (FH, *frequency hopping*) y espectro ensanchado (SS, *spread spectrum*) son ejemplos de técnicas empleadas para mejorar la convivencia y la tolerancia a degradaciones del canal. Comprender la función de cada capa y de estos mecanismos permite caracterizar el comportamiento de la comunicación sin depender de detalles internos de implementación de cada equipo [3].

WirelessHART e ISA100.11a: perfiles de protocolo para instrumentación inalámbrica

Como ejemplos representativos de protocolos inalámbricos industriales para instrumentación, WirelessHART e ISA100.11a se construyen sobre radios de baja potencia en la banda ISM de 2.4 GHz y estructuran sus funciones de manera coherente con la visión por capas descrita en la subsección anterior. En términos generales, ambos perfiles combinan mecanismos en las capas inferiores (radio y acceso al medio) orientados a robustez en un medio compartido, junto con funciones superiores de gestión, seguridad e integración de datos hacia sistemas de planta [3, 47].

Desde una perspectiva funcional de red, ambos enfoques se apoyan en una arquitectura con dispositivos de campo y componentes de infraestructura que habilitan agregación y coordinación. La Figura 2.14 ilustra, para WirelessHART, una organización típica donde múltiples *field devices* se conectan hacia un *gateway* y se coordinan mediante funciones de gestión de red [6]. De forma análoga, la Figura 2.15 muestra una arquitectura ISA100.11a que explicita roles de infraestructura (por ejemplo, *gateway* y *backbone routers*) orientados a facilitar la integración con redes troncales y servicios de planta [6, 7].

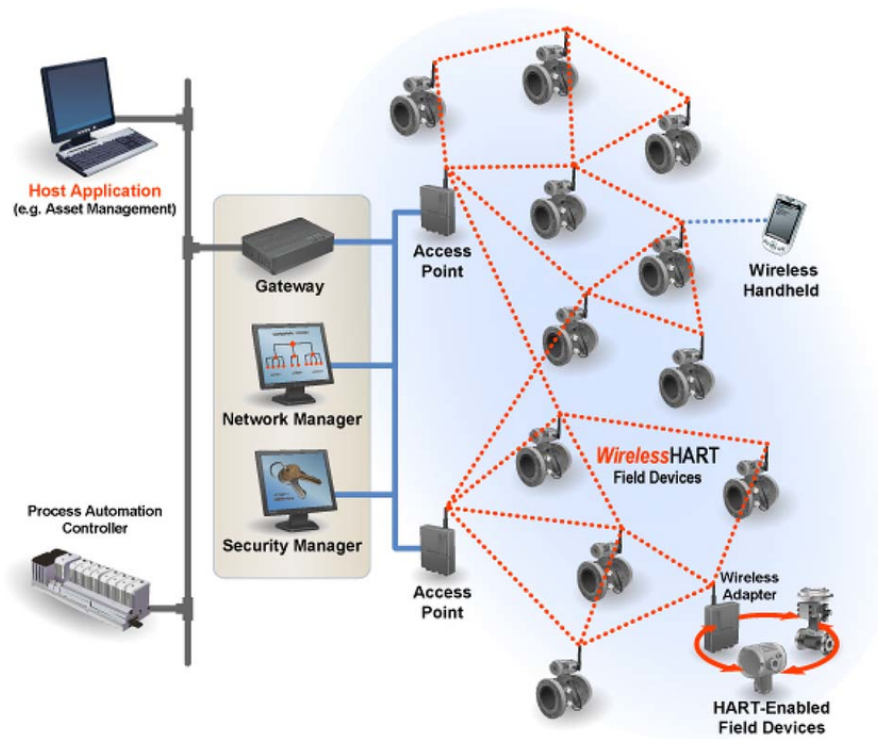


Figura 2.14: Elementos típicos de una red WirelessHART (dispositivos de campo, *gateway* y gestión de red). Fuente: adaptado de [6].

En cuanto al comportamiento esperado en el medio radioeléctrico, se reporta que ambos perfiles incorporan estrategias para evitar depender de un único canal de RF y para enfrentar interferencia y variabilidad del canal mediante comunicaciones coordinadas en el tiempo y *channel hopping* [47]. Este principio se alinea con el hecho de que, al operar en bandas compartidas, la ocupación espectral y el nivel de interferencia pueden variar, por lo que técnicas de diversidad en frecuencia y coordinación temporal permiten reducir la exposición sostenida a perturbaciones localizadas [3].

Aun compartiendo objetivos de robustez, una comparación técnica destaca diferencias a nivel de perfil de protocolo que son útiles para contextualizar su integración. Por un lado, WirelessHART se describe como más prescriptivo en su especificación, lo que favorece interoperabilidad entre implementaciones, mientras que ISA100.11a se describe como más flexible al ofrecer opciones de implementación que pueden influir en el grado de interoperabilidad efectiva [48]. Por otro lado, también se reportan diferencias en el enfoque de capas superiores: WirelessHART mantiene

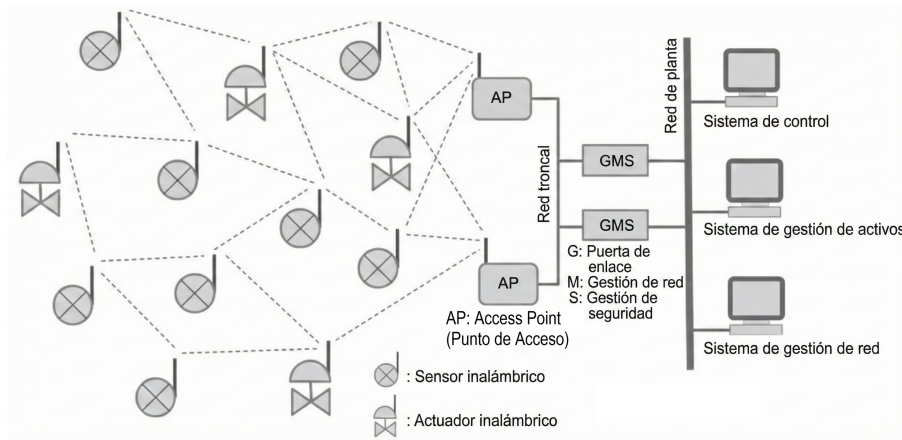


Figura 2.15: Arquitectura típica ISA100.11a con dispositivos de campo e infraestructura (por ejemplo, *gateway* y *backbone routers*). Fuente: adaptado de [7].

una organización estrechamente alineada con el ecosistema HART, mientras que ISA100.11a incorpora mecanismos orientados a integración con infraestructuras basadas en IP en su pila superior, manteniendo igualmente un marco de gestión y seguridad para uso industrial [7, 48].

En conjunto, WirelessHART e ISA100.11a representan perfiles de protocolo orientados a instrumentación inalámbrica industrial, al combinar una arquitectura con componentes de campo e infraestructura, mecanismos de robustez en el uso del espectro y del acceso al medio, y funciones de gestión y seguridad acordes a aplicaciones de proceso [3, 47]. De forma general, los protocolos industriales —cableados e inalámbricos— establecen las reglas de intercambio de información que permiten integrar dispositivos de campo con sistemas de planta de manera interoperable. Sobre este marco, la Sección 2.4 organiza las principales tecnologías y familias inalámbricas disponibles y discute sus compromisos de desempeño (alcance, tasa, latencia, consumo y disponibilidad) bajo condiciones típicas de operación en minería.

2.4. Tecnologías de Comunicación Inalámbrica

2.4.1. Criterios de clasificación por alcance, tasa y consumo (visión por familias)

Esta subsección organiza las tecnologías inalámbricas en *familias* a partir de las relaciones de compromiso físicas y operacionales ampliamente reconocidas en comunicaciones: el alcance de cobertura, la tasa de transmisión y el consumo energético no se pueden optimizar simultáneamente. Por ello, las distintas tecnologías priorizan combinaciones específicas según su propósito de diseño [3, 9]. Cabe señalar que esta clasificación se utiliza únicamente como marco descriptivo para estructurar la revisión tecnológica; la definición de criterios de selección y su aplicación sistemática se desarrollará posteriormente en el Capítulo 3.

Una forma práctica de visualizar este concepto es relacionar el *alcance típico* con el *intervalo de reporte* o periodicidad de tráfico asociado a cada familia. La Figura 2.16 ilustra un mapeo conceptual donde las tecnologías de corto alcance tienden a soportar reportes frecuentes, mientras

que aquellas orientadas a largo alcance suelen operar con tráfico esporádico para favorecer la autonomía energética y la cobertura extendida [3, 9]. Esta representación no pretende fijar umbrales universales, sino entregar una intuición coherente sobre la coexistencia de múltiples alternativas inalámbricas en plantas industriales.

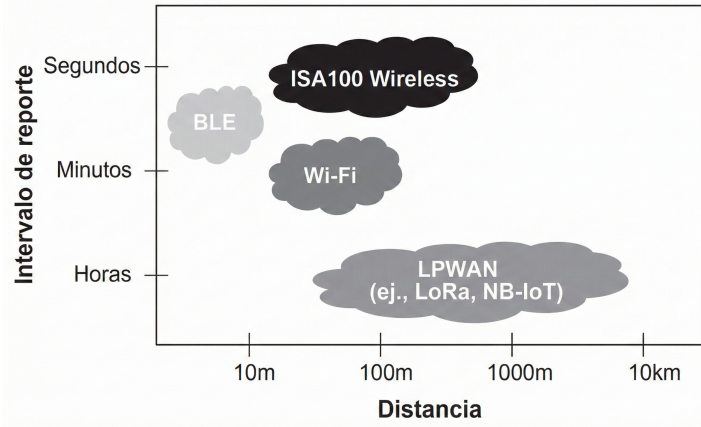


Figura 2.16: Mapa conceptual de familias inalámbricas según alcance típico e intervalo de reporte asociado. Fuente: adaptado de [3].

En el extremo de *proximidad*, tecnologías como RFID y BLE se emplean cuando la comunicación ocurre a muy corta distancia (por ejemplo, en identificación, presencia o interacción con activos cercanos), privilegiando la simplicidad y el bajo consumo [3]. Para *alcances cortos a medios*, las redes tipo WPAN/WN (como los perfiles basados en IEEE 802.15.4) se orientan a la instrumentación y el sensado distribuido, recurriendo frecuentemente a topologías de múltiples saltos (*mesh*) para otorgar robustez y cobertura dentro de áreas acotadas [3]. En *alcances medios* con mayores tasas, las tecnologías WLAN (como Wi-Fi) habilitan la conectividad para aplicaciones con alta demanda de datos, asumiendo, en contrapartida, un mayor consumo energético y una sensibilidad más alta a la interferencia en bandas compartidas [3].

Cuando el caso de uso requiere *cobertura extendida* con operación de baja potencia, surgen las familias LPWAN (como LoRaWAN o perfiles celulares IoT). Su diseño busca maximizar la autonomía y el alcance aceptando tasas de transferencia acotadas y un tráfico típicamente menos frecuente [9]. Finalmente, las tecnologías celulares permiten una cobertura amplia e integración con la infraestructura del operador, ofreciendo perfiles adaptables a distintos compromisos entre tasa, latencia y consumo, según la categoría de servicio y el tipo de dispositivo [9].

El fundamento común detrás de estas familias es el balance entre distancia, velocidad de transmisión y eficiencia energética. La Figura 2.17 resume este *trade-off* como un triángulo conceptual: aumentar el alcance tiende a exigir mayor potencia o reducir la tasa útil; inversamente, aumentar la tasa suele requerir mayor ancho de banda y mejores condiciones de señal, lo cual limita el alcance o incrementa el consumo [3, 9]. Este marco permite interpretar por qué, en entornos mineros, la conectividad se diseña a partir de un portafolio de tecnologías complementarias en lugar de una solución única.

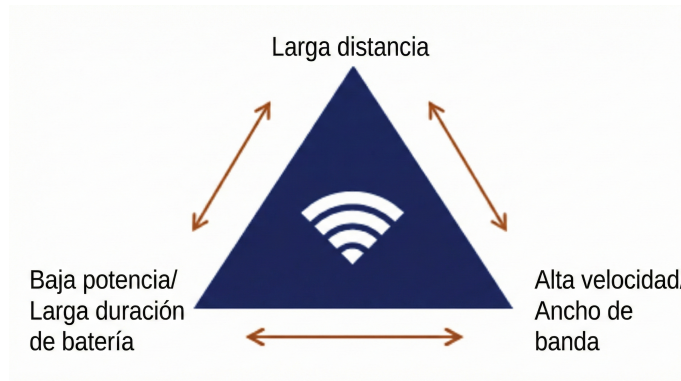


Figura 2.17: Mapa conceptual de familias inalámbricas según alcance típico e intervalo de reporte asociado. Fuente: adaptado de [3].

2.4.2. WPAN industriales (IEEE 802.15.4, WirelessHART, ISA100.11a, Zigbee)

Las *Wireless Personal Area Networks* (WPAN) orientadas a la industria se fundamentan en el estándar IEEE 802.15.4 como capa física y de acceso al medio (PHY/MAC) de baja potencia. Sobre este sustrato técnico se construyen perfiles y pilas con objetivos diferenciados: *Zigbee*, como red de sensores de propósito general, y *WirelessHART* (IEC 62591) e *ISA100.11a*, como soluciones de instrumentación diseñadas específicamente para entornos de proceso, donde la confiabilidad y la coexistencia en bandas ISM son requisitos críticos [3]. En el contexto minero, esta familia resulta pertinente para plantas concentradoras e infraestructura de proceso debido a su idoneidad para el sensado distribuido, la expansión gradual de redes y la operación de instrumentos mediante baterías.

Desde el punto de vista topológico, estas WPAN pueden adoptar configuraciones *star* (estrella) o *mesh* (malla) según el estándar y el diseño de red. En términos generales, las topologías *star* tienden a exhibir mayor determinismo de retardo debido a la conexión directa, mientras que las *mesh* privilegian la robustez mediante rutas alternativas, a costa de una mayor variabilidad en la latencia [3]. En la práctica, muchas arquitecturas industriales se despliegan como híbridas: operan en malla en el segmento de campo para sortear obstrucciones, y agregan tráfico de forma centralizada mediante *gateways* hacia la red troncal de planta.

En cuanto al uso del espectro, estas tecnologías heredan la canalización definida por IEEE 802.15.4. En la banda ISM de 2.4 GHz se disponen 16 canales numerados 11–26, con separación entre centros de 5 MHz y un ancho de canal (ocupación) del orden de 2 MHz, lo que habilita la coexistencia mediante separación en frecuencia dentro de la banda compartida [49, 50]. En sub-GHz, la canalización es dependiente de la región: por ejemplo, en 868 (Europa) MHz se define un único canal centrado en 868.3 MHz, mientras que en 915 MHz (Norteamérica) se definen 10 canales con centros separados 2 MHz (centros en $906 + 2(k - 1)$ MHz, para $k = 1, \dots, 10$) [50]. Sobre este marco común, las diferencias entre Zigbee, WirelessHART e ISA100.11a provienen principalmente de cómo se administran estos canales (selección fija, diversidad por salto y planificación centralizada), más que de la canalización base.

Zigbee (pila sobre IEEE 802.15.4)

Zigbee se caracteriza por su bajo consumo y el uso extensivo de topologías de malla, lo que permite extender la cobertura mediante múltiples saltos. Sin embargo, se documenta una degradación del rendimiento a medida que aumentan la profundidad de la red y la carga de tráfico [10]. En entornos confinados, la malla mejora indicadores como la tasa de entrega de paquetes (*Packet Delivery Rate*) al habilitar rutas alternativas frente a obstrucciones dinámicas. En términos de capacidad, se reportan límites prácticos del orden de 255 dispositivos y alcances por salto cercanos a los 100 m, lo que refuerza la necesidad de una alta densidad de nodos para cubrir galerías complejas [10].

Desde la perspectiva de la capa física, en la banda de 2.4 GHz Zigbee utiliza la canalización IEEE 802.15.4 (portadoras separadas por 5 MHz con ancho de banda de señal del orden de 2 MHz), por lo que su coexistencia se apoya críticamente en la selección de canal y en la gestión de carga dentro de un espectro compartido [49, 50]. En variantes sub-GHz, la canalización depende del dominio regulatorio (p. ej., 868 MHz con un canal o 915 MHz con separación de 2 MHz), lo que puede mejorar la propagación en interiores a costa de ecosistemas de hardware más reducidos y restricciones regionales [50].

A nivel de especificaciones de hardware, se reportan potencias de transmisión de hasta 12 dBm y sensibilidades entre -97 dBm y -101 dBm en módulos comerciales, manteniendo la tasa física máxima de 250 kbps en la banda principal [10]. Su clasificación global de costo y consumo es *baja*, con una confiabilidad considerada *media* en comparación con estándares de grado industrial estricto, lo que justifica su uso en aplicaciones de sensado masivo no crítico donde se prioriza la autonomía sobre el determinismo temporal.

WirelessHART (IEC 62591)

WirelessHART es un estándar de instrumentación construido sobre IEEE 802.15.4, concebido para garantizar confiabilidad en ambientes industriales mediante el mecanismo de *Time Slotted Channel Hopping* (TSCH). A diferencia de Zigbee, WirelessHART explota de forma explícita la diversidad frecuencial mediante saltos coordinados sobre un subconjunto de 15 canales en 2.4 GHz (centros entre 2 405 MHz y 2 475 MHz, con espaciado de 5 MHz). Esta estrategia, orquestada por el gestor de red, reduce drásticamente la exposición a interferencias persistentes típicas de redes Wi-Fi estáticas.

Complementariamente, su despliegue en malla aprovecha la redundancia de rutas para sostener la conectividad frente al desvanecimiento por multitrayecto, un desafío común en plantas con alta densidad de estructuras metálicas [3, 27].

Técnicamente, WirelessHART reporta potencias de transmisión típicas del orden de 10 dBm a 20 dBm y sensibilidades cercanas a -90 dBm. Aunque la tasa física se mantiene en 250 kbps, la eficiencia de la red prioriza la confiabilidad (*alta*) sobre el ancho de banda. Su costo de implementación se considera *medio* debido a la necesidad de *gateways* y gestión especializada. Respecto a la temporalidad, la latencia base es determinista (*slot* de 10 ms), aunque las tasas de

actualización en industria se configuran típicamente en el orden de segundos para extender la vida útil de las baterías.

ISA100.11a (IEC 62734)

ISA100.11a comparte el sustrato tecnológico de IEEE 802.15.4 y el uso de TSCH para robustez, pero se distingue por una arquitectura orientada a objetos y compatible con IPv6, facilitando una integración profunda con redes IT/OT. Al igual que Zigbee y WirelessHART, utiliza la canalización estándar en 2.4 GHz (centros separados por 5 MHz y ancho de banda de señal del orden de 2 MHz). No obstante, su diferenciación práctica radica en la flexibilidad de gestión: permite definir políticas estrictas de uso de canales (listas negras, *hopping* dedicado) según la arquitectura del sistema de control [3, 49, 50].

Una característica distintiva destacada por el NIST es que la topología es una variable de diseño explícita y no una consecuencia automática de la red. ISA100.11a permite forzar una operación en topología *star* (estrella) para maximizar el determinismo en lazos de control rápidos, manteniendo la capacidad de configurar sub-redes en *mesh* cuando se requiere extender cobertura mediante rutas alternativas [3].

En parámetros típicos, la infraestructura de acceso (Gateways/Backbone Routers) opera con potencias de transmisión cercanas a 20 dBm y sensibilidades del orden de -92 dBm a -100 dBm [7]. Se clasifica con confiabilidad *alta* y consumo *bajo*. Sin embargo, su costo de implementación tiende a ser *medio-alto* debido a la infraestructura de gestión requerida (System Manager, Security Manager), siendo la opción preferente cuando se prioriza la convergencia de servicios y políticas de seguridad unificadas.

2.4.3. WLAN industrial (Wi-Fi y variantes industriales)

Las *Wireless Local Area Networks* (WLAN) basadas en IEEE 802.11, comúnmente referidas como *Wi-Fi*, se emplean en entornos industriales cuando se requiere *alta capacidad de datos* y conectividad IP nativa para servicios tales como video, voz, telemetría con mayor densidad de información y acceso a sistemas corporativos o de operación mediante infraestructura de red existente. En minería, esta familia se utiliza para habilitar cobertura local y sistemas multifunción (monitoreo, despacho, seguridad, posicionamiento), generalmente soportada por una red troncal cableada (p. ej., Ethernet/fibra) a la cual se conectan puntos de acceso (*Access Points*, AP) [10]. La dependencia de un *backhaul* cableado se reconoce como un rasgo estructural de la tecnología: Wi-Fi típicamente no constituye por sí sola la red troncal, sino que se integra a ella como *última milla inalámbrica* [10].

Desde el punto de vista arquitectónico, la unidad funcional básica de 802.11 es el *Basic Service Set* (BSS), donde estaciones cliente se asocian a un AP que actúa como punto de relevo y puente hacia un *Distribution System* (DS), el cual puede corresponder a una red cableada o inalámbrica. En esta configuración, el tráfico entre estaciones de un mismo BSS se cursa típicamente a través del AP, y la cobertura total se extiende mediante múltiples celdas (múltiples

BSS) conectadas al DS [5]. Este modelo resulta consistente con despliegues industriales en los que el AP se alimenta y enlaza al backbone mediante cableado (incluyendo PoE cuando aplica), mientras que los terminales móviles o nodos de borde se conectan por radio [47]. La Figura 2.18 sintetiza esta arquitectura conceptual, destacando la relación entre BSS, AP y el DS como elemento de interconexión hacia la infraestructura de distribución.

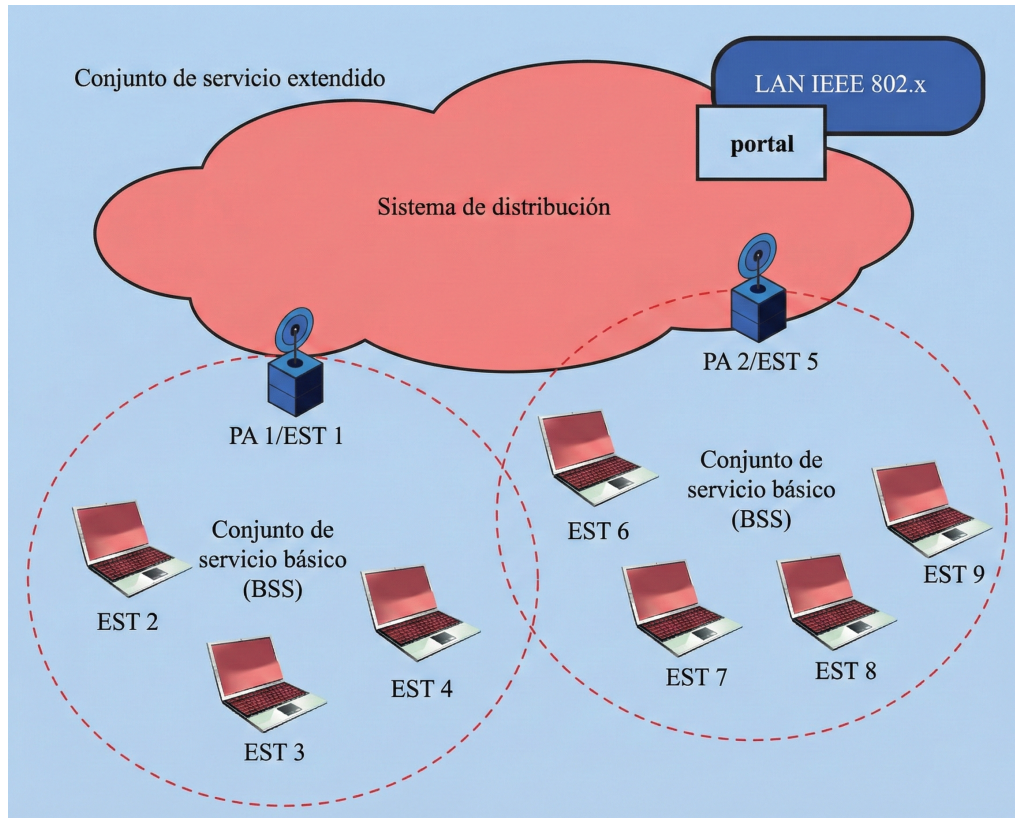


Figura 2.18: Arquitectura conceptual IEEE 802.11: BSS, PA (Access Point) y sistema de distribución (DS). Fuente: Basado en el modelo 802.11 descrito en [5].

Canalización y uso de espectro

El desempeño de Wi-Fi en planta está fuertemente condicionado por la disponibilidad de espectro y la planificación de canales, dado que 802.11 opera en bandas no licenciadas compartidas con múltiples tecnologías. En 2.4 GHz, el espectro utilizable es reducido (del orden de 83 MHz en la mayoría de los dominios), y los canales de Wi-Fi son de 20 MHz, lo que conduce a que solo exista un conjunto acotado de canales no solapados (en la práctica, se utiliza el plan 1–6–11 en numerosos países) [8]. La Figura 2.19 ilustra la canalización típica y la disponibilidad relativa de canales en 2.4 GHz. Esta restricción explica por qué la banda 2.4 GHz se reserva frecuentemente para cobertura de mejor esfuerzo o baja densidad, priorizando 5 GHz (y 6 GHz cuando está disponible) para la capacidad principal [8].

En 5 GHz, 802.11 dispone de un número mayor de canales de 20 MHz que no se superponen,

y que se agrupan en bandas U-NII; además, la tecnología admite *channel bonding* para formar canales de 40, 80 o 160 MHz, incrementando el caudal a costa de consumir mayor espectro efectivo y, típicamente, reducir el número de canales independientes disponibles [8]. En 6 GHz (Wi-Fi 6E/802.11ax en 6 GHz), la disponibilidad de espectro se incrementa significativamente y se habilita una operación más *greenfield*, lo cual favorece el uso de canales anchos (80/160 MHz) con menor co-canalización, incrementando capacidad agregada [8].

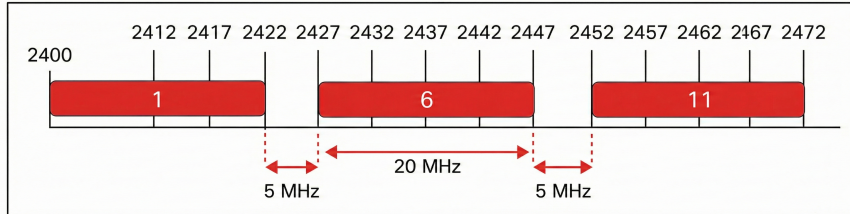


Figura 2.19: Planificación conceptual de canales Wi-Fi por banda 2.4 GHz (canales de 20 MHz con fuerte limitación de no solapamiento). Fuente: [8].

Variantes relevantes para industria (802.11ac/ax y 802.11ah)

Las variantes modernas (p. ej., 802.11ac y 802.11ax) se orientan a elevar el rendimiento mediante técnicas como *channel bonding*, MIMO y modulaciones más densas, logrando tasas muy elevadas en condiciones favorables. Para entornos de alta densidad de dispositivos, 802.11ax incorpora mecanismos que mejoran eficiencia y retardo, reportándose latencias típicas del orden de 10 ms en la literatura revisada [10].

De forma complementaria, *Wi-Fi HaLow* (IEEE 802.11ah) desplaza la operación a bandas sub-1 GHz (p. ej., alrededor de 900 MHz), buscando mayor alcance y mejor penetración en comparación con las bandas tradicionales. Se describe como una alternativa orientada a IoT, con alcances del orden de 1 km y tasas de datos que abarcan desde valores mínimos del orden de 100 kbps hasta decenas de Mbps, junto con la capacidad de soportar un gran número de estaciones por AP (miles) [10]. En escenarios mineros, este perfil resulta conceptualmente atractivo para conectividad IoT de superficie o patios extensos cuando se busca mayor radio de cobertura por celda, aunque su adopción depende del ecosistema de equipos y del dominio regulatorio aplicable.

2.4.4. Celular (4G/LTE, 5G) en entornos industriales

Las tecnologías celulares se basan en espectro *licenciado* y en una arquitectura jerárquica que separa el acceso radio (*radio access network*, RAN) del núcleo de red (*core network*). El área de servicio se divide en *celdas*, cada una servida por una estación base; los terminales (UE) se asocian a una celda y la red coordina recursos radio y movilidad para sostener la conectividad [51]. En escenarios industriales, esta familia se utiliza cuando se requieren *altas tasas*, *movilidad* o *cobertura amplia* con mecanismos de calidad de servicio (QoS); su contrapartida típica es un mayor consumo energético en el equipo terminal y un costo de implementación/operación superior frente a alternativas no licenciadas [10].

Canal, portadora y asignación de recursos. En celular, el término *canal* suele referirse al recurso radio dentro de una *portadora* (carrier) en banda licenciada. En vez de operar con una lista fija de frecuencias centrales (como ocurre en planes regionales ISM), la estación base asigna dinámicamente recursos en una grilla tiempo–frecuencia (mediante un *scheduler*) a cada UE, habilitando Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, por sus siglas en inglés) y control de QoS [51]. Este punto es clave para interpretar NB-IoT y LTE-M más adelante: ambos se integran sobre la estructura de asignación de recursos de LTE, pero restringiendo ancho de banda y/o funcionalidades para optimizar cobertura y energía.

4G/LTE (Cat-4+ como referencia de banda ancha móvil)

LTE (*Long-Term Evolution*) representa el perfil celular de *banda ancha* ampliamente desplegado para datos móviles. Su diseño prioriza capacidad y soporte de movilidad, lo que lo hace apropiado para aplicaciones con tráfico sostenido (p. ej., video, telemetría de alta tasa, conectividad de backhaul o acceso móvil a sistemas corporativos). En comparación con perfiles LPWAN celulares (NB-IoT/LTE-M), LTE convencional tiende a exigir dispositivos más complejos y con mayor consumo, pues mantiene funcionalidades completas para altas tasas y movilidad [51].

En términos operacionales, LTE se organiza por celdas y el desempeño depende de la planificación radio, la carga de usuarios, el ancho de canal disponible por portadora y las condiciones de propagación. En el contexto industrial, se reporta que la conectividad celular ofrece gran alcance y confiabilidad, pero puede ser costosa, demandante en energía y no siempre disponible en ubicaciones remotas [10]. La literatura también reporta velocidades de referencia donde 4G+ presenta promedios del orden de decenas de Mbps y picos del orden de centenas de Mbps (dependiendo de la red) [10].

Ficha mínima (parámetros típicos de referencia). Para caracterización comparativa, se utilizan los parámetros típicos reportados para 4G/LTE (Cat-4+): alcance máximo ~30 km, topología celular; latencia típica ~50 ms; velocidad de datos máxima ~50 000 kbps; confiabilidad alta; consumo alto; costo alto; bandas licenciadas típicas 700–2600 MHz; potencia de transmisión máxima ~23 dBm; sensibilidad mínima (referencial) ~-95 dBm [10].

5G (NR) y canalización por rangos de frecuencia

5G, estandarizado por 3GPP, introduce la interfaz radio *New Radio* (NR) y se organiza, al nivel más alto, en dos rangos: *FR1* (sub-6 GHz) y *FR2* (24–54 GHz, ondas milimétricas). En *FR1* se reportan anchos de canal de hasta 100 MHz, con uso extendido del rango 3.3–4.2 GHz; en *FR2* se reportan anchos de canal desde 50 MHz hasta 400 MHz, con agregación de canales soportada (Release 15). Esta disponibilidad de ancho de canal, junto con el uso de MIMO, sustenta el posicionamiento de 5G como tecnología de alta capacidad, con velocidades máximas teóricas reportadas en el rango 1–10 Gbps y promedios reportados de 130–240 Mbps (según despliegue) [10].

Desde la perspectiva de servicio, 5G se asocia a escenarios que demandan alta tasa de transmisión y baja latencia, siendo especialmente adecuado para aplicaciones de *URLLC* (Ultra-Reliable Low Latency Communication) y *mMTC* (massive Machine Type Communication). *URLLC* se refiere a servicios que requieren alta fiabilidad y baja latencia, tales como control industrial y vehículos autónomos, mientras que *mMTC* se centra en el soporte de grandes cantidades de dispositivos conectados de forma masiva, como en el caso del Internet de las Cosas (IoT). Además, se menciona que las redes privadas 5G pueden reducir la interferencia y el retardo al aproximar el núcleo de la red a la operación local, lo que mejora el rendimiento en áreas específicas. Sin embargo, también se destaca como desventaja su alta demanda energética y su menor viabilidad económica en ubicaciones remotas donde no existe infraestructura previa, lo que refuerza la idea de que su adopción depende del caso de uso y de la estrategia de despliegue a implementar [10].

Ficha mínima (parámetros típicos de referencia). Para comparación tecnológica, se utilizan parámetros típicos reportados: topología celular; latencia típica ~ 10 ms; velocidad de datos máxima ~ 10 Gbps; confiabilidad alta; consumo alto; costo alto; bandas 3.3–4.2 GHz (FR1) y 24–54 GHz (FR2) [10]. En cuanto a alcance, se reportan distancias de retorno multicanal de hasta ~ 100 km en superficie bajo condiciones favorables. Para potencia de transmisión, se reportan umbrales de operación para estaciones base en aplicaciones mineras del orden de hasta 6 W (referencial), lo que corresponde a ~ 38 dBm [10]. (La sensibilidad mínima utilizada en la caracterización comparativa puede mantenerse como parámetro referencial del radio, según el mismo criterio de homogeneización empleado en la Tabla 2 del survey).

2.4.5. LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M)

Las *Low-Power Wide-Area Networks* (LPWAN) agrupan tecnologías diseñadas para conectar dispositivos a gran escala sobre áreas extensas, privilegiando la autonomía energética y la cobertura por sobre el caudal útil. En términos prácticos, esta familia se posiciona entre dos enfoques de espectro: (i) soluciones en bandas *no licenciadas* (p. ej., LoRaWAN), condicionadas por restricciones regulatorias de potencia y ocupación temporal del canal; y (ii) soluciones en bandas *licenciadas* basadas en infraestructura celular 3GPP (p. ej., NB-IoT y LTE-M), donde la exclusividad espectral y la planificación del operador reducen la incertidumbre de interferencia y permiten mayor control de QoS, a costa de un mayor costo de despliegue y operación [9].

LoRa/LoRaWAN

En el análisis de soluciones LPWAN es importante distinguir explícitamente entre *LoRa* y *LoRaWAN*. *LoRa* corresponde a la tecnología de modulación en la capa física, basada en *chirp spread spectrum* (CSS), y define parámetros radio tales como *spreading factor* (SF), ancho de banda (BW) y codificación. En cambio, *LoRaWAN* es el protocolo de red asociado (capa de enlace y capas superiores de la solución), que especifica el método de acceso, los mecanismos de seguridad y la arquitectura de sistema para construir una red de área amplia sobre radios LoRa.

En particular, se reporta que LoRaWAN es un estándar abierto gestionado por la LoRa Alliance, y que su especificación define la capa de enlace de una solución cuya capa física está provista por LoRa [10].

Desde el punto de vista de arquitectura, LoRaWAN se despliega típicamente en una topología estrella: los dispositivos finales transmiten hacia uno o más *gateways*, y estos reenvían el tráfico hacia un *Network Server* mediante una red de mayor capacidad. La Figura 2.20 ilustra la arquitectura y la separación entre *gateways*, servidor de red y servidores de aplicación [9].

En la capa física, LoRa utiliza factores de ensanchamiento típicos entre 7 y 12. Un SF mayor incrementa la ganancia de procesamiento (mejorando el umbral SNR y, por ende, la cobertura), pero reduce la tasa útil y aumenta el *time-on-air*. En cuanto al ancho de banda, aunque existen configuraciones más amplias, en la práctica LoRaWAN opera con BW fijos de 125 kHz, 250 kHz o 500 kHz [9, 10]. Así, el compromiso *rango-tasa* se materializa mediante la combinación de SF y BW, ajustando sensibilidad, tasa y ocupación temporal del canal.

En una caracterización de referencia, se reporta que LoRa/LoRaWAN alcanza del orden de 5 km en escenarios urbanos y hasta 15 km en condiciones favorables, con tasas típicas en el rango 0.3 kbps a 50 kbps dependiendo de la configuración (SF/BW) [10]. En términos de potencia radiada, se informan potencias de transmisión típicas entre 10 dBm a 30 dBm (condicionadas por el dominio regulatorio), y sensibilidades de recepción del orden de -137 dBm a -150 dBm, lo que explica su posicionamiento como tecnología de gran cobertura con baja tasa útil. Considerando estos atributos, LoRaWAN suele clasificarse con consumo energético *muy bajo* y costo de implementación *muy bajo* en comparación con alternativas licenciadas, mientras que su confiabilidad se describe típicamente como *media* debido al acceso al medio no determinista y a la dependencia del perfil de tráfico y del plan regional de frecuencias [9, 10].

La operación concreta de LoRaWAN depende del plan regional, que define canalización y restricciones regulatorias (p. ej., ciclo de trabajo). A modo de referencia, se utilizan los siguientes planes ampliamente adoptados:

- **Europa (EU863–870):** Comúnmente denominado “EU868”, especifica que todo dispositivo debe implementar tres canales por defecto centrados en 868.1 MHz, 868.3 MHz y 868.5 MHz, con un ancho de banda de 125 kHz. Estos canales están espaciados cada 200 kHz para acomodar la señal con guarda suficiente bajo la normativa ETSI, la cual impone restricciones estrictas de ciclo de trabajo (*duty cycle*) [52, 53].
- **Norteamérica y Australia (US902–928 / AU915–928):** La canalización se estructura en bancos de 64+8 canales. En el plan US915 (US902–928), los 64 canales de *uplink* de 125 kHz comienzan en 902.3 MHz incrementándose cada 200 kHz (hasta 914.9 MHz), complementados por 8 canales de 500 kHz. De forma análoga, el plan AU915 utiliza la banda 915 MHz–928 MHz replicando esta estructura, donde el primer canal de 125 kHz inicia en 915.2 MHz manteniendo el mismo espaciamiento de 200 kHz [52].
- **Asia y otras regiones (EU433):** Utiliza la banda ISM de 433.05 MHz a 434.79 MHz. El plan define tres canales obligatorios por defecto centrados en 433.175 MHz, 433.375 MHz

y 433.575 MHz, todos con un ancho de banda de 125 kHz y separación de 200 kHz. Esta banda exige que los dispositivos soporten una capacidad de almacenamiento de al menos 16 canales, los cuales pueden ser configurados dinámicamente por la red para aprovechar el espectro disponible [52].

Esta dependencia del plan regional se combina con un acceso al medio de naturaleza asíncrona (frecuentemente descrito como tipo ALOHA), en el cual los dispositivos transmiten sin verificar previamente si el canal está libre. En consecuencia, a medida que aumenta el tráfico, crece la probabilidad de colisiones y, por tanto, la capacidad efectiva, la latencia práctica y la tasa de entrega dejan de ser magnitudes fijas, pasando a depender críticamente del perfil de tráfico, la densidad de nodos y la configuración SF/BW seleccionada [9].

Finalmente, LoRaWAN define clases de dispositivo (A, B y C) para controlar el comportamiento de recepción en el enlace descendente. La Figura 2.21 resume estas clases: la Clase A minimiza el consumo abriendo ventanas de recepción breves solo tras una transmisión; la Clase B agrega ventanas programadas mediante balizas de sincronización; y la Clase C maximiza la disponibilidad de *downlink* manteniendo la recepción casi continua, a costa de un consumo energético significativamente mayor [9].

NB-IoT (3GPP en banda licenciada)

NB-IoT es una tecnología estandarizada por 3GPP para conectar grandes cantidades de dispositivos con tráfico típicamente esporádico, privilegiando cobertura extendida y bajo consumo. A diferencia de soluciones en bandas ISM, NB-IoT se despliega sobre espectro *licenciado* administrado por el operador móvil, lo que entrega un marco de operación más controlado en términos de planificación radio y coexistencia [9, 54].

Una característica central de NB-IoT es su operación de *banda angosta*: utiliza una portadora de 180 kHz, equivalente al ancho de un Bloque de Recurso Físico (PRB) de LTE, lo que permite integrarlo en infraestructura celular existente con distintas modalidades de despliegue [55]. La Figura 2.22 resume los tres modos contemplados por el estándar: *in-band*, donde NB-IoT ocupa un PRB dentro de un portador LTE activo; *guard-band*, donde se reutiliza la banda de guarda de un portador LTE; y *stand-alone*, donde se reutilizan portadoras heredadas (típicamente de 200 kHz) [9]. Se reporta además que la factibilidad del modo *guard-band* depende del ancho del portador LTE (por ejemplo, en portadores inferiores a 5 MHz la banda de guarda puede ser insuficiente), mientras que el modo *stand-alone* aprovecha directamente la canalización de 200 kHz [9].

Desde la perspectiva de “canalización” y separación de recursos, NB-IoT no se describe como una lista fija de frecuencias centrales definida por planes regionales (como ocurre en bandas ISM), sino como asignaciones ortogonales de recursos dentro de la grilla LTE, planificadas por la estación base sobre espectro licenciado. En este contexto, un PRB corresponde a 180 kHz en frecuencia (12 subportadoras de 15 kHz en LTE convencional), y constituye la unidad mínima de asignación radio; por ello, en modo *in-band* NB-IoT se multiplexa dentro de un PRB LTE, en *guard-band* se reserva parte del espectro de guarda, y en *stand-alone* se opera sobre portadoras

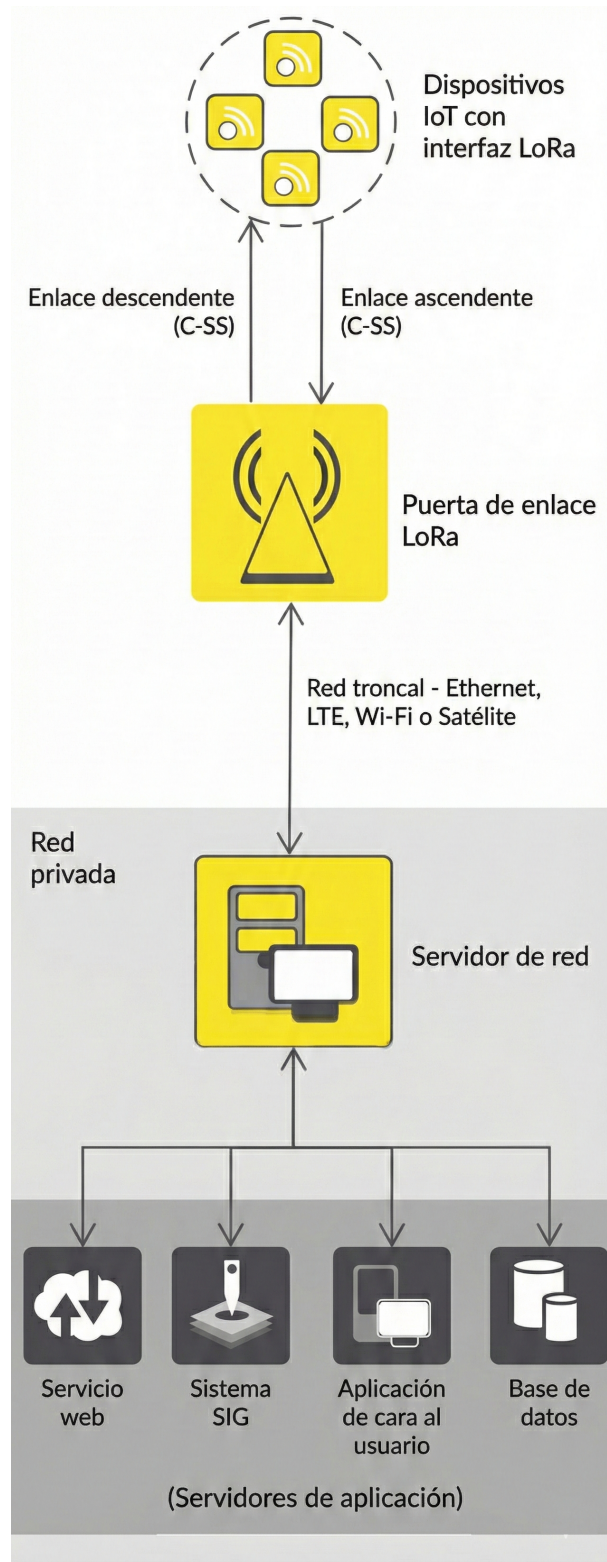


Figura 2.20: Arquitectura LoRaWAN con ejemplos comunes de aplicación. Fuente: adaptado de [9].

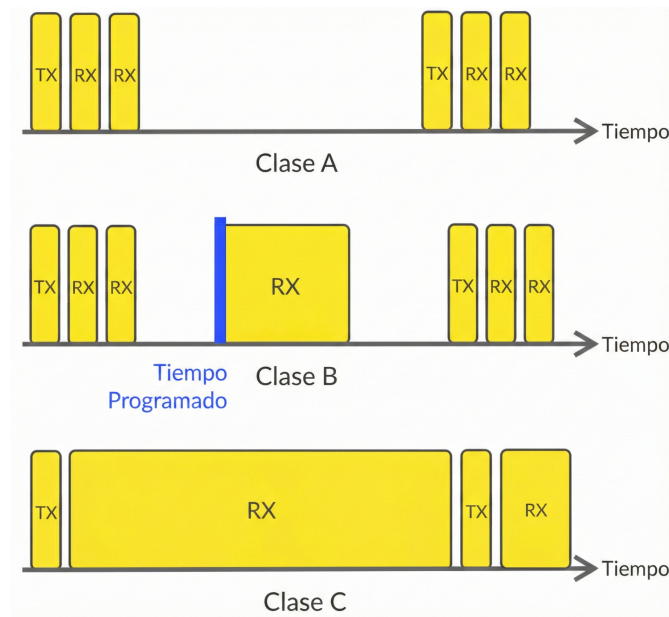


Figura 2.21: Clases de dispositivo LoRaWAN (A/B/C) y ventanas de recepción asociadas. Fuente: adaptado de [9].

reutilizadas [9, 54].

Para una caracterización comparable, NB-IoT opera típicamente con potencias máximas del orden de 20–23 dBm (existiendo clases reducidas, p. ej. 14 dBm, orientadas a dispositivos de menor tamaño/consumo), lo que condiciona el compromiso cobertura–energía [9]. En cuanto a sensibilidad, se adopta como referencia un valor del orden de –141 dBm reportado para NB-IoT, coherente con su objetivo de *cobertura profunda* mediante operación de banda angosta y técnicas de repetición. Finalmente, dado que la tecnología reutiliza bandas celulares existentes, las bandas específicas de operación dependen del despliegue del operador y de la planificación regulatoria del país.

LTE-M (Cat-M1) y diferenciación espectral

LTE-M (Cat-M1) es una tecnología estandarizada por 3GPP orientada a casos IoT que requieren mayor desempeño que NB-IoT, por ejemplo, mayores tasas de transferencia, menor latencia y soporte más completo de movilidad. En la literatura se describe como una alternativa complementaria a NB-IoT: mientras NB-IoT prioriza la conectividad masiva con cargas útiles pequeñas y tráfico esporádico, LTE-M apunta a habilitar capacidades cercanas a *banda ancha* para un subconjunto menor de dispositivos, manteniendo la integración con infraestructura LTE en espectro licenciado [9]. Sobre esta base, se reporta que LTE-M incorpora funcionalidades que amplían el alcance de aplicaciones IoT respecto de NB-IoT, tales como servicios con mayores requerimientos de datos y soporte de funciones adicionales asociadas al ecosistema LTE [9].

En términos de canalización, LTE-M mantiene la estructura radio de LTE y, por tanto, la separación ortogonal de recursos en el dominio tiempo–frecuencia. En Cat-M1, el dispositivo

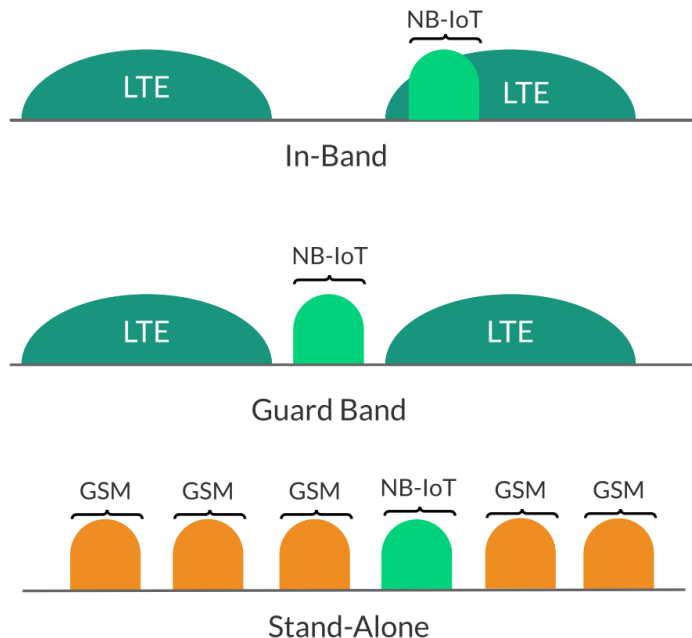


Figura 2.22: Modos de despliegue NB-IoT: *in-band*, *guard-band* y *stand-alone*. Fuente: adaptado de [9].

opera con un ancho de banda efectivo de 1.4 MHz, equivalente a 6 PRBs, utilizando un subconjunto del portador LTE. En consecuencia, es posible multiplexar dinámicamente recursos entre tráfico IoT (LTE-M) y tráfico LTE convencional dentro del mismo espectro licenciado, mediante planificación de PRBs y subtramas por parte de la estación base. Así, la “separación de canales” se expresa como partición de PRBs dentro del portador LTE (y no como un plan fijo de frecuencias en banda ISM), lo que facilita la coexistencia con servicios LTE en la misma celda y habilita mecanismos de priorización y control de calidad de servicio propios de redes celulares [9, 54].

Consistente con esta operación sobre un subconjunto de recursos LTE, se reporta para Cat-M1 una tasa máxima del orden de 1 Mbps con un ancho de banda de operación cercano a 1.08 MHz, reforzando su posicionamiento como opción de mayor capacidad dentro de las tecnologías LPWAN en banda licenciada [9]. Asimismo, se reportan extensiones estandarizadas de LTE-M que permiten operar con mayores anchos de banda y, con ello, incrementar las tasas alcanzables, lo que resulta relevante cuando el caso de uso exige mayor capacidad o menores tiempos de transferencia que los típicos de NB-IoT.

Por otra parte, para mejorar robustez y cobertura, se reporta que LTE-M incorpora mecanismos de extensión de cobertura basados principalmente en repetición de transmisiones y restricciones de modulación. Como consecuencia, es posible aumentar alcance en condiciones desfavorables, aunque a costa de mayor latencia y de un mayor uso de recursos radio, lo que refleja el compromiso cobertura–capacidad propio de estas soluciones. Para una caracterización comparable a nivel de hoja de datos, se reporta una potencia máxima típica del terminal del orden de 20 dBm y una sensibilidad del orden de -132 dBm como referencia de desempeño radio [9]. Finalmente, al

igual que NB-IoT, LTE-M opera sobre espectro *licenciado* y se implementa en portadores LTE existentes, por lo que su disponibilidad práctica depende de las bandas LTE habilitadas por el operador y de la planificación de recursos (PRBs y subtramas) realizada por la estación base [9].

En síntesis, estas características son útiles para la selección tecnológica: LTE-M incrementa la capacidad y reduce la latencia respecto de NB-IoT, manteniendo la ventaja de operar en infraestructura celular licenciada, mientras que su comportamiento de cobertura puede reforzarse mediante mecanismos de robustez cuando el entorno lo exige.

2.4.6. Tecnologías de proximidad (BLE, RFID) para localización/identificación

Las tecnologías de proximidad se emplean cuando el objetivo principal es *identificar* o *detectar presencia/localización* de activos en un radio acotado, privilegiando simplicidad, bajo consumo y bajo costo relativo de infraestructura. En esta familia, RFID se utiliza como mecanismo de identificación por radio (lectura de etiquetas), mientras que Bluetooth Low Energy (BLE) se orienta a conectividad de corto alcance y servicios de proximidad (p. ej., beacons) sobre banda ISM de 2.4 GHz, con perfiles de consumo adecuados para operación en batería y transmisión periódica de estados [10].

RFID (activo/pasivo) para identificación y trazabilidad

RFID (*Radio Frequency Identification*) permite leer información almacenada en una etiqueta sin contacto físico, mediante un lector que interroga por radio y recibe una respuesta del tag. La literatura clasifica RFID por bandas de operación, distinguiendo baja frecuencia (LF), alta frecuencia (HF) y ultra-alta frecuencia/microondas (UHF/microondas), con rangos típicos que abarcan desde decenas de kHz hasta bandas de GHz dependiendo de la aplicación y del tipo de etiqueta [10]. Esta segmentación espectral es relevante porque condiciona el alcance, la sensibilidad a presencia de metal o líquidos y el tipo de antenas/lectores requeridos.

Desde el punto de vista funcional, RFID suele operar como un mecanismo de *percepción/identificación* (equivalente a un nodo extremo) y, por tanto, típicamente requiere integrarse con una red de mayor alcance para transportar los eventos de lectura hacia sistemas de supervisión o bases de datos [10]. En términos de alcance, se reportan distancias prácticas del orden de 10 m para UHF y hasta 100 m en configuraciones microondas bajo condiciones favorables, lo que refuerza su rol en puntos de control, portales de acceso, zonas de despacho/recepción y trazabilidad local [10]. Esta lógica de trazabilidad, donde los *tags* son interrogados por un lector asociado a antenas y los eventos se integran a un sistema de gestión, se resume en la Figura 2.23.

En enlaces RFID, los niveles de potencia y sensibilidad dependen de la combinación lector–tag. Como referencia de diseño, se reportan potencias de transmisión del lector en el orden de 30–33 dBm, mientras que las sensibilidades se sitúan típicamente entre –84 y –92 dBm en equipos comerciales, variando según banda y arquitectura (lector o etiqueta activa) [10]. Respecto de latencia, la dinámica de inventario/interrogación en UHF EPC Gen2 puede operar en escalas de milisegundos en ciclos de lectura (con tiempos del orden de 7 ms reportados en sistemas Gen2

UHF bajo condiciones específicas), lo cual es consistente con tasas elevadas de lectura cuando el diseño del portal y el anti-colisión del protocolo están correctamente dimensionados [56].

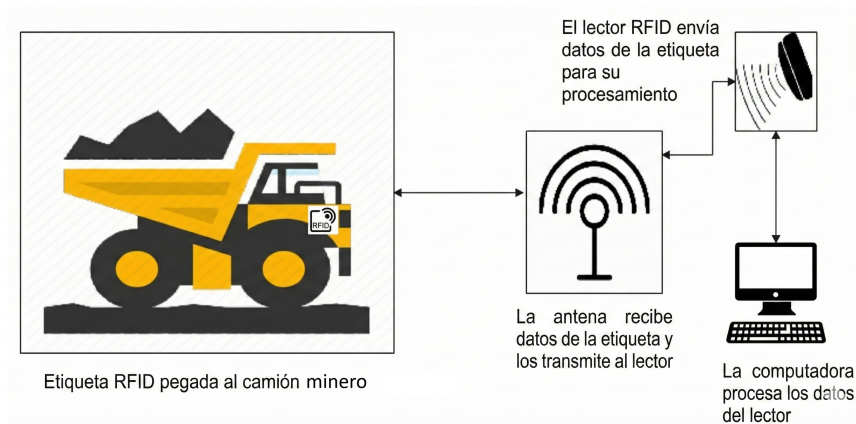


Figura 2.23: Esquema conceptual de trazabilidad RFID: lector/antenas, etiquetas (*tags*) e integración de eventos hacia un sistema de gestión. Fuente: adaptado de [10].

Bluetooth Low Energy (BLE 5.x) para proximidad y beacons

Bluetooth es un estándar inalámbrico de corto alcance que opera en banda ISM no licenciada (2.4–2.485 GHz) y ha evolucionado incorporando BLE como perfil de bajo consumo orientado a transmisiones periódicas y paquetes pequeños, manteniendo al dispositivo en estados de sueño la mayor parte del tiempo y activándolo ante eventos o ventanas de comunicación [10]. Esta orientación lo hace adecuado para aplicaciones de proximidad basadas en beacons y localización en áreas acotadas, donde la infraestructura puede consistir en nodos emisores/receptores y un sistema de agregación de eventos. La Figura 2.24 ilustra este esquema funcional, destacando la relación entre beacon, receptor/terminal y plataforma de backend para gestión y visualización.

En términos de robustez frente a coexistencia, el uso de técnicas de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FH-SS) aporta resistencia a interferencia y multitrayecto en 2.4 GHz [10]. Para caracterización de enlace, se reportan potencias de transmisión desde -20 hasta $+20$ dBm y sensibilidades típicas entre -70 y -82 dBm, con alcances nominales de hasta 100 m dependiendo del entorno y del perfil de potencia. En latencia, el survey reporta que BLE alcanza valores típicos del orden de 6 ms, mientras que Bluetooth clásico se sitúa alrededor de 100 ms, lo que favorece a BLE en aplicaciones de respuesta rápida con bajo consumo [10].

2.4.7. Síntesis comparativa y límites típicos en aplicaciones industriales

Las Tablas 2.2 y 2.3 consolidan una caracterización transversal de tecnologías inalámbricas frecuentes en aplicaciones industriales, organizada en (i) atributos de red/operación y (ii) parámetros RF/uso de espectro. Los valores se presentan como referencias típicas para caracterización y se consolidan a partir de la literatura citada para cada tecnología. Esta visión comparativa permite identificar tendencias consistentes con el compromiso alcance–tasa–consumo: a medida que se

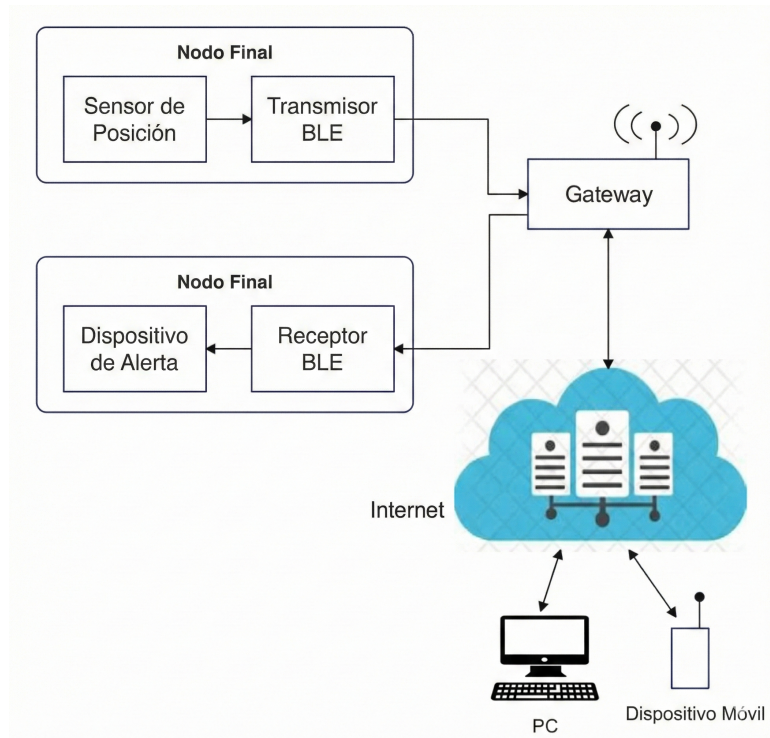


Figura 2.24: Arquitectura conceptual de un sistema BLE para proximidad: beacon (emisor), receptor/terminal y backend de gestión/visualización. Fuente: adaptado de [10].

privilegia cobertura y autonomía energética, la tasa útil y la inmediatez del enlace tienden a reducirse; inversamente, al aumentar la tasa y disminuir la latencia, se incrementan requerimientos de energía y densidad de infraestructura [3, 9].

En el dominio de *proximidad*, RFID y Bluetooth/BLE se emplean cuando la conectividad se limita a distancias cortas y se prioriza simplicidad de despliegue y bajo costo. En estas tecnologías, la operación en bandas compartidas (p. ej., 2.4 GHz) introduce una sensibilidad mayor a la coexistencia con otros sistemas, lo que refuerza la necesidad de planificación básica de canal y control de interferencia en escenarios con alta densidad de radios [3, 10]. En una escala de alcance superior, Zigbee y otras WPAN basadas en IEEE 802.15.4 extienden la cobertura mediante topologías de malla, favoreciendo redundancia de rutas; sin embargo, la eficiencia y la latencia pueden degradarse al aumentar la carga de tráfico y la profundidad de saltos, por lo que su desempeño depende de la densidad efectiva de nodos y del perfil de tráfico.

Para instrumentación de proceso con mayores exigencias de confiabilidad, WirelessHART e ISA100.11a incorporan mecanismos de operación temporal y diversidad en frecuencia (p. ej., *channel hopping*) para mitigar interferencias y multitrayecto en bandas ISM. En consecuencia, aun compartiendo la base PHY/MAC, estas tecnologías suelen exhibir confiabilidad superior a alternativas de propósito general, manteniendo un consumo bajo compatible con operación a baterías, a costa de tasas útiles acotadas y configuraciones típicas de actualización en el orden de segundos en aplicaciones de monitoreo [3, 16, 17].

En el extremo de alta tasa, Wi-Fi habilita conectividad para aplicaciones con demanda sig-

nificativa de datos, pero presenta consumo energético mayor y una dependencia más fuerte de infraestructura de acceso y *backhaul*. Esta familia también opera en bandas compartidas (2.4/5/6 GHz), por lo que el desempeño puede quedar condicionado por coexistencia y planificación de canales, especialmente en ambientes industriales con múltiples sistemas radio concurrentes [3]. Por su parte, las LPWAN se orientan a cobertura extendida con baja potencia. En particular, LoRa/LoRaWAN utiliza bandas ISM con planes regionales de canalización y un acceso al medio de tipo aleatorio, lo que impone restricciones prácticas en capacidad agregada y latencia bajo alta densidad de tráfico; en contraste, NB-IoT y LTE-M operan en bandas licenciadas y heredan mecanismos de planificación celular, lo que reduce incertidumbre por interferencia y habilita control de QoS, manteniendo un compromiso de baja tasa y latencias mayores que tecnologías de banda ancha [9, 10, 52].

Finalmente, las tecnologías celulares de banda ancha (4G/LTE y 5G) entregan conectividad de alta capacidad con perfiles de baja latencia, lo que las hace adecuadas para servicios que requieren movilidad y transmisión intensiva de datos. No obstante, su adopción implica mayores exigencias de energía, infraestructura y costo, además de consideraciones de espectro licenciado y planificación de red [3]. En síntesis, el conjunto de tecnologías revisadas se interpreta como un portafolio complementario, donde cada alternativa ocupa un espacio distinto en el continuo alcance–tasa–consumo; esta caracterización constituye la base descriptiva para la definición posterior de criterios técnicos y su aplicación sistemática en el procedimiento de selección y dimensionamiento.

Tabla 2.2: Síntesis comparativa (A): atributos de red y operación.

Tecnología	Alc. (km)	Topología	Lat. (ms)	Tasa máx.	Conf.	Energía	Costo
RFID (activo/pasivo)	0.1	Punto a punto	50	640 kbps	Media	Bajo	Bajo
Bluetooth / BLE 5.x	0.1	Estrella / Mesh	30	2 Mbps	Media	Muy bajo	Bajo
Zigbee (IEEE 802.15.4)	0.1	Malla / Estrella	100	250 kbps	Media	Bajo	Bajo
WirelessHART (IEC 62591)	0.3	Malla	2000	250 kbps	Alta	Bajo	Medio
ISA100.11a	0.3	Malla	500	250 kbps	Alta	Bajo	Medio
Wi-Fi (802.11ac/ax/ah)	1.0	AP / Mesh	20	9.6 Gbps	Alta	Alto	Medio
LoRa / LoRaWAN	15.0	Estrella	2000	50 kbps	Media	Muy bajo	Muy bajo
NB-IoT (3GPP Rel-13)	10.0	Celular (estrella)	1600	250 kbps	Alta	Bajo	Medio
LTE-M (Cat-M1)	10.0	Celular	100	1 Mbps	Alta	Medio	Medio
4G/LTE (Cat-4+)	30.0	Celular	50	50,000	Alta	Alto	Alto
5G (NR)	10.0	Celular	10	10 Gbps	Alta	Alto	Alto

2.5. Dispositivos IIoT: plataformas, instrumentos y *gateways*

La implementación de soluciones IIoT en entornos industriales no se materializa únicamente a partir de la tecnología de comunicación, sino mediante un conjunto de dispositivos que integran sensado y actuación, procesamiento embebido, alimentación y conectividad hacia redes de planta o infraestructura externa. En consecuencia, la caracterización de tecnologías inalámbricas

Tabla 2.3: Síntesis comparativa (B): parámetros RF y uso de espectro.

Tecnología	Banda de frecuencia	$P_{tx,max}$ (dBm)	Sens. mín. (dBm)	Notas técnicas (breve)
RFID (activo/pasivo)	30–500 kHz; 13.56 MHz; 850–950 MHz; 2.4–5.8 GHz	33	-92	Identificación; sensible a metal/líquidos.
Bluetooth / BLE 5.x	2.4–2.485 GHz	20	-82	Coexistencia en 2.4 GHz.
Zigbee (IEEE 802.15.4)	784/868/915 MHz; 2.4 GHz	12	-101	Malla; requiere densidad de nodos.
WirelessHART (IEC 62591)	2.4 GHz (802.15.4)	20	-90	TSCH; diversidad en frecuencia.
ISA100.11a	2.4 GHz (802.15.4)	20	-92	TSCH; gestión flexible.
Wi-Fi (802.11ac/ax/ah)	900 MHz (802.11ah); 2.4/5/6 GHz	36	-80	Alta tasa; mayor consumo e infraestructura.
LoRa / LoRaWAN	470–510; 863–870; 902–928 MHz (ISM)	20	-137	CSS; SF/BW; restricciones ISM por región.
NB-IoT (3GPP Rel-13)	Licenciada LTE (según operador)	23	-141	Portadora 180 kHz; CE por repetición.
LTE-M (Cat-M1)	Licenciada LTE (según operador)	23	-132	Cat-M1 1.4 MHz (6 PRBs); movilidad.
4G/LTE (Cat-4+)	700–2600 MHz (licenciada)	23	-95	Banda ancha móvil; QoS por planificación.
5G (NR)	3.3–4.2 GHz (FR1); 24–54 GHz (FR2)	38	-95	Sub-6 y mmWave; anchos de canal mayores.

presentada en la Sección 2.4 se complementa con una visión orientada a *dispositivos*, ya que el desempeño observado en campo depende tanto del protocolo como de parámetros de hardware verificables en fichas técnicas. Entre estos parámetros destacan la potencia de transmisión, la sensibilidad de recepción, la banda de operación, el tipo de antena y su instalación, y el consumo en distintos estados de operación.

Para describir coherentemente el rol de los equipos en una arquitectura IIoT, resulta útil agruparlos en tres clases funcionales. En primer lugar, los *dispositivos de campo* corresponden a los elementos que capturan variables del proceso o ejecutan acciones sobre él, por lo que constituyen el origen y el destino final de la información. En esta categoría se incluyen sensores e instrumentos, además de actuadores, los cuales comparten exigencias de continuidad operacional y robustez frente a condiciones ambientales propias de faenas industriales, como polvo, humedad, vibraciones y variaciones de temperatura. Desde el punto de vista de su operación, los atributos más relevantes para caracterizarlos suelen ser su forma de alimentación, sus modos de funcionamiento y el perfil temporal del tráfico que generan o consumen. En particular, la alimentación suele presentarse en tres alternativas prácticas, red eléctrica, energía solar o batería, y se vincula directamente con la autonomía esperable y con las restricciones de consumo del dispositivo. De forma análoga, la periodicidad de reporte permite distinguir instrumentos que transmiten de manera periódica de aquellos que operan por evento, mientras que el grado de criticidad temporal asociado a la función del dispositivo condiciona el nivel de exigencia sobre latencia y disponibilidad del sistema.

En segundo lugar, los *dispositivos de infraestructura de red* son los que habilitan la conectividad del sistema y determinan, en gran medida, su cobertura efectiva. El elemento central suele

ser el *gateway*, cuya función es concentrar el tráfico de múltiples dispositivos de campo y transferirlo hacia una red de mayor capacidad. Por ello, además de parámetros radio, en un *gateway* adquieren importancia atributos de integración y operación, tales como interfaces de *backhaul* y su disponibilidad en terreno, capacidades de gestión, tolerancia ambiental y la alimentación requerida para operación sostenida. En escenarios extensos o con obstrucciones relevantes, se incorporan nodos intermedios de retransmisión, comúnmente denominados repetidores o routers, que extienden cobertura y mejoran disponibilidad al habilitar comunicaciones multi-salto. Este rol intermedio introduce un compromiso práctico: aunque la retransmisión permite salvar limitaciones de propagación, también incrementa el consumo energético de los nodos que participan en el encaminamiento y puede aumentar la carga del medio compartido. En tecnologías malladas industriales, este enfoque se apoya en mecanismos de coordinación y administración de rutas que se implementan de manera centralizada o distribuida según la pila de comunicación, lo que refuerza la importancia del *gateway* como elemento estructural de operación [7].

En tercer lugar, los *equipos de adquisición* (por ejemplo, *dataloggers*) cumplen el rol de concentrar señales locales y transmitir información hacia capas superiores. Este tipo de dispositivo resulta pertinente cuando se requiere agrupar mediciones en un punto, o bien mantener almacenamiento local para envío diferido. Por ello, suelen caracterizarse mediante el tipo y número de entradas disponibles, la capacidad de almacenamiento, el soporte de interfaces/protocolos industriales y la forma de alimentación.

A partir de estas clases funcionales, la caracterización técnica de dispositivos IIoT puede organizarse en un conjunto acotado de atributos comparables de tipo hoja de datos. En primer lugar, se consideran parámetros radioeléctricos, como bandas soportadas, potencia de transmisión, sensibilidad de recepción y canalización. En segundo lugar, se incorpora el desempeño de comunicación, incluyendo tasa de datos, latencia típica, alcance referencial y topología soportada. En tercer lugar, se describen atributos energéticos, tales como tensión de alimentación, consumo por estado y autonomía estimada bajo perfiles de operación típicos. En cuarto lugar, se registran aspectos de robustez industrial, como rango de temperatura, protección ambiental y compatibilidad electromagnética. Finalmente, se incluyen atributos de interoperabilidad e integración, como interfaces físicas, protocolos y capacidades de gestión. Esta estructura permite describir dispositivos de manera consistente, evitando ambigüedades frecuentes al comparar equipos que, aun soportando una misma tecnología de comunicación, exhiben prestaciones diferentes debido a decisiones de diseño de hardware, firmware e integración.

2.6. Procesos y aplicaciones IIoT: servicios y exigencias de comunicación

En entornos industriales, las aplicaciones IIoT pueden describirse de forma operacional como *servicios* que imponen exigencias medibles sobre la infraestructura de comunicación. Estas exigencias incluyen, como mínimo, capacidad requerida, latencia admisible, confiabilidad o disponibilidad, cobertura y restricciones energéticas asociadas al modo de alimentación de los

equipos. En lugar de enumerar tecnologías, esta sección organiza el dominio de aplicación en grupos de servicio, de modo que sea posible expresar necesidades del proceso como *requerimientos de conectividad* verificables. Este enfoque es consistente con la práctica de ingeniería en redes industriales, donde el punto de partida es el caso de uso y su criticidad, y recién luego se estudian alternativas de implementación.

En minería, estos servicios se observan transversalmente en distintos procesos y entornos de operación, como pilas de lixiviación, mineroductos, botaderos, plantas de proceso o labores subterráneas. Sin profundizar en cada proceso, resulta útil notar que su instrumentación y operación suelen combinar servicios de telemetría y monitoreo, alertas y, en casos específicos, control y video. Esta diversidad operacional justifica caracterizar aplicaciones IIoT en términos de servicios y exigencias de comunicación, independientes de la tecnología implementada.

2.6.1. Clasificación por grupos de servicio y criticidad temporal

Para formalizar la variedad de aplicaciones, se adopta una clasificación por grupos de servicio ordenada por criticidad temporal y demanda de datos. En un extremo, el *monitoreo* y la *telemetría* se caracterizan por tráfico predominantemente ascendente, cargas útiles acotadas y tolerancia a latencias del orden de segundos, por lo que suelen privilegiar cobertura y autonomía energética. A continuación, las *alarmas* incrementan la exigencia de latencia y disponibilidad, dado que la utilidad del dato se degrada si no se entrega dentro de una ventana temporal acotada. En un nivel superior de exigencia se ubican las aplicaciones de *control supervisorio/control avanzado de procesos (APC, por su siglas en inglés)* que requieren comunicaciones confiables y tiempos de respuesta acotados para sostener la operación dentro de parámetros deseados. En el extremo de mayor exigencia, el *control regulatorio* y los servicios de *emergencia* demandan latencias bajas y alta confiabilidad, pues su desempeño se asocia a la estabilidad operacional y a la respuesta ante eventos. En paralelo, el servicio de *video* constituye un caso particular: aun cuando su latencia puede ser moderada en ciertos escenarios, su condicionante principal suele ser la necesidad de ancho de banda sostenido y de un *backhaul* capaz de transportar flujos continuos.

Esta taxonomía permite expresar requerimientos de comunicación por servicio de forma homogénea y justificar por qué distintas familias de soluciones resultan más adecuadas para ciertos servicios, sin anticipar la decisión tecnológica. Con el mismo propósito, puede emplearse como mecanismo de parametrización una clasificación por clases de criticidad, como la noción de ISA Clase 0 a 5 descrita en el punto 4.4.2 del Anexo A. En este contexto, la ISA impulsó el grupo de trabajo SP100 para estudiar los requerimientos de distintas aplicaciones de automatización industrial y definió seis clases de operaciones industriales, desde acciones de emergencia hasta funciones de registro de datos [11]. A medida que aumenta la criticidad de la clase, se incrementa la relevancia relativa de la latencia y la confiabilidad, mientras que en aplicaciones de monitoreo y telemetría adquieren mayor peso la cobertura y la eficiencia energética.

Tabla 2.4: Clases para operaciones industriales basadas en la ISA-SP100 [11].

Categoría	Clase	Operación
Seguridad	Clase 0	Acción de emergencia
Control	Clase 1	Control regulatorio en lazo cerrado
	Clase 2	Control supervisorio en lazo cerrado
	Clase 3	Control en lazo abierto
Monitoreo	Clase 4	Generación de alarmas
	Clase 5	Registro de datos

2.6.2. Requerimientos mínimos de comunicación por servicio

Cada grupo de servicio puede representarse, en primera aproximación, mediante un vector de requerimientos mínimos en dos dimensiones fundamentales: capacidad requerida y latencia máxima admisible. La Tabla 2.5 presenta umbrales representativos para caracterizar servicios industriales.

Tabla 2.5: Ejemplos de requerimientos mínimos referenciales por grupo de servicio (capacidad y latencia), adaptados de [3] y alineados conceptualmente con la noción de criticidad de ISA-SP100.

Servicio	Clase ISA	Ancho de banda mín.	Latencia máx.
Monitoreo/Telemetría	Clase 5	1 kbps	5000 ms
Alarma	Clase 4	5 kbps	1000 ms
Control Supervisorio/APC	Clase 2-3	100 kbps	1000 ms
Control Regulatorio	Clase 1	1 Mbps	100 ms
Emergencia	Clase 0	100 kbps	30 ms
Video	N/A	10 Mbps	1000 ms

Nota: Los valores presentados corresponden a umbrales referenciales de ingeniería para análisis preliminar. La asociación con clases ISA-SP100 se emplea de manera conceptual para reflejar criticidad funcional y no como equivalencia normativa directa de desempeño de red. La adecuación de estos valores debe ser evaluada por el ingeniero caso a caso según el contexto del proyecto. Para el servicio *Video* no aplica una clase en particular, simplemente un alto ancho de banda.

En términos de ingeniería, estos umbrales se interpretan como condiciones necesarias, pero no suficientes. Cumplir capacidad y latencia no garantiza viabilidad si la cobertura radioeléctrica no sostiene el enlace o si la alimentación disponible no permite operar con el tráfico requerido.

2.6.3. Del servicio al enlace: cobertura radioeléctrica y topología

Además de capacidad y latencia, la factibilidad de un servicio depende del desempeño del enlace en el entorno de operación. De manera general, la potencia recibida puede expresarse como la potencia transmitida menos pérdidas de propagación y penalizaciones asociadas al medio y a la interferencia electromagnética, lo que se traduce en un margen respecto de la sensibilidad

del receptor. En servicios que admiten comunicaciones multi-salto, la conectividad se evalúa por enlace: cada salto debe cumplir el margen objetivo, y la ruta completa debe sostener el servicio sin exceder una latencia agregada compatible. En consecuencia, la topología se vuelve una propiedad relevante del servicio y de la solución de comunicación. Una topología en malla puede mejorar cobertura y robustez mediante rutas alternativas, pero introduce sobrecarga y puede acumular retardo a medida que aumenta el número de saltos.

2.7. Marco normativo y estándares aplicables a IIoT

El diseño de soluciones IIoT en entornos industriales se apoya en normas y estándares que permiten asegurar interoperabilidad, trazabilidad arquitectónica, ciberseguridad y cumplimiento regulatorio. En esta sección se presentan los principales referentes considerados, organizados en cuatro dominios complementarios: (i) estándares de comunicación e interoperabilidad, (ii) modelos de arquitectura e integración OT/IT, (iii) ciberseguridad para sistemas de automatización y control, y (iv) regulación del espectro radioeléctrico aplicable a tecnologías inalámbricas. Este marco sirve como base técnica para estructurar el análisis de requerimientos y el dimensionamiento de soluciones en capítulos posteriores.

2.7.1. Estándares de comunicación industrial e interoperabilidad

En el dominio de redes inalámbricas industriales para instrumentación, IEC 62591 (WirelessHART) e IEC 62734 (ISA100.11a) establecen perfiles de comunicación basados en IEEE 802.15.4 orientados a operación robusta y segura en entornos de proceso, incorporando mecanismos de gestión de red y seguridad adecuados a aplicaciones industriales [16, 17]. Para LPWAN en bandas no licenciadas, la especificación LoRa Alliance TS001 define la capa de enlace de LoRaWAN, incluyendo procedimientos de operación y requisitos asociados a interoperabilidad y certificación en redes LoRaWAN [57].

A nivel de interoperabilidad entre sistemas y aplicaciones, OPC UA (IEC 62541) proporciona un marco estandarizado para el intercambio de información con foco en seguridad e independencia de plataforma, lo que resulta pertinente para integrar datos de campo con capas superiores de supervisión y analítica [58]. En el plano de mensajería ligera para IoT, MQTT (ISO/IEC 20922) estandariza un esquema publish/subscribe utilizado ampliamente en telemetría y comunicación M2M, especialmente cuando se privilegia simplicidad de implementación y eficiencia en el uso de recursos [59].

2.7.2. Modelos de arquitectura y alineamiento OT/IT

Para ordenar el diseño de sistemas IIoT y mantener trazabilidad entre capas OT y TI, se emplean modelos de arquitectura de referencia que normalizan conceptos y delimitan responsabilidades. ISA-95 (IEC 62264-1) define modelos y terminología para la integración entre control y gestión de operaciones y la capa empresarial, facilitando el alineamiento entre información de

producción y sistemas corporativos [60]. Complementariamente, RAMI 4.0 (DIN SPEC 91345) organiza el sistema mediante un modelo tridimensional que integra capas funcionales, jerarquía y ciclo de vida, mientras que ISO/IEC 30141 entrega una arquitectura de referencia IoT estandarizada con vistas reutilizables para diseñar sistemas IoT/IIoT de forma consistente [61, 62]. En la misma línea, la Industrial Internet Reference Architecture (IIRA) del IIC propone perspectivas de análisis (por ejemplo, negocio, uso, funcional e implementación) que ayudan a estructurar decisiones de arquitectura en sistemas IIoT con énfasis en interoperabilidad y escalabilidad [63].

2.7.3. Ciberseguridad industrial

La ciberseguridad en IIoT industrial se aborda como una propiedad extremo a extremo que involucra dispositivos, redes y plataformas de integración, considerando además requerimientos de continuidad operacional propios de OT. En este contexto, IEC 62443-3-3 define requisitos técnicos de seguridad y niveles de seguridad para sistemas de automatización y control industrial, proporcionando una base para derivar controles relacionados con autenticación, control de acceso, integridad, disponibilidad y gestión de eventos [64]. De forma complementaria, NIST SP 800-82 Rev. 3 entrega una guía específica para seguridad de OT/ICS, enfatizando prácticas de gestión de riesgo y medidas de protección compatibles con la operación segura de sistemas industriales [65].

En Chile, el marco regulatorio transversal en esta materia incluye la Ley 21.663 (Ley Marco de Ciberseguridad e Infraestructura Crítica de la Información), que establece lineamientos institucionales y de coordinación en ciberseguridad, y crea gobernanza asociada a la gestión de incidentes y a la resiliencia digital. Para proyectos IIoT en el sector industrial, este tipo de normativa es relevante en la medida en que introduce obligaciones y prácticas de gestión que pueden impactar el diseño organizacional y técnico de la operación, particularmente cuando los sistemas se vinculan con servicios o infraestructuras consideradas críticas.

2.7.4. Normativa chilena de espectro para equipos de corto alcance

Para tecnologías que operan en bandas de libre utilización o de corto alcance, la regulación nacional condiciona directamente el diseño radioeléctrico, incluyendo banda de operación, potencia, ocupación espectral y requisitos de certificación del equipo. En Chile, la norma técnica SRD consolidada en la Resolución Exenta N° 1985/2017 fija condiciones técnicas para equipos de corto alcance y uso de bandas de libre utilización, y sus modificaciones posteriores actualizan aspectos regulatorios y exigencias asociadas al equipamiento [66, 67]. Este marco es particularmente relevante para tecnologías en bandas ISM, dado que delimita condiciones de operación que afectan cobertura, coexistencia y cumplimiento.

Capítulo 3

Metodología de Selección de Tecnologías IIoT

3.1. Análisis de requerimientos del proyecto

Disponer de información completa, consistente y trazable del proyecto constituye el primer requisito para sustentar una decisión técnica sobre conectividad IIoT en entornos mineros. En redes inalámbricas industriales, el levantamiento de requerimientos es una tarea multidisciplinaria porque integra variables geográficas, ambientales, operacionales y propias de telecomunicaciones. Por ello, esta sección formaliza el análisis de requerimientos como la etapa inicial de la metodología, cuyo propósito es transformar una necesidad operacional en parámetros de ingeniería comparables y verificables.

Desde la perspectiva de comunicaciones, el levantamiento fija las hipótesis que alimentan el presupuesto de enlace (*link budget*) y el margen de enlace (*link margin*). En términos prácticos, el presupuesto de enlace reúne los términos que determinan la potencia recibida a partir de la potencia transmitida, incorporando pérdidas de propagación y pérdidas adicionales del entorno, mientras que el margen cuantifica la holgura disponible (en dB) para absorber degradaciones no previstas. En consecuencia, los datos recopilados en esta etapa determinan directamente la validez del análisis posterior.

Con el fin de estructurar el levantamiento y asegurar congruencia metodológica, la información de entrada se organiza en tres grupos: (i) información del proyecto y su contexto operacional, (ii) caracterización del entorno físico y electromagnético, y (iii) inventario de dispositivos y su distribución espacial. Estos antecedentes se obtienen típicamente a partir de planos y documentación de planta, especificaciones de instrumentación, documentos de ingeniería de procesos, antecedentes de telecomunicaciones y, cuando se dispone, visitas técnicas al sitio.

3.1.1. Información del proyecto

La información base del proyecto define el marco operativo en el cual se desplegará la solución IIoT. En primer lugar, se registra el nombre e identificación del proyecto para asegurar trazabilidad entre entradas, cálculos y resultados. En segundo lugar, se define la ubicación geográfica del área de interés mediante coordenadas, lo que permite referenciar el escenario en cartografía y sustentar estimaciones de distancia y relieve cuando corresponda. En tercer lugar, se especifica el tipo de proceso minero donde se desplegará la red, como pilas de lixiviación, botaderos,

ductos o tranques de relaves, dado que estos entornos suelen asociarse a condiciones ambientales diferentes.

3.1.2. Caracterización del entorno

Las condiciones ambientales del sitio de despliegue influyen directamente en el rendimiento del enlace de radiofrecuencia y, por consiguiente, en la factibilidad de las alternativas consideradas. En esta metodología, dichas condiciones se incorporan como restricciones de compatibilidad de hardware o como penalizaciones explícitas dentro del presupuesto y margen de enlace. En particular, se consideran el rango de temperatura operativa, el escenario de polvo/arena, la humedad relativa y el nivel de interferencia electromagnética.

En primer lugar, el rango de temperatura operativa se registra mediante una temperatura mínima y máxima esperada en el sitio. Este parámetro se utiliza como verificación de factibilidad del equipamiento, dado que instrumentos, *gateways* y repetidores declaran rangos de operación acotados por fabricante; excederlos puede degradar confiabilidad, disponibilidad y vida útil del dispositivo. En consecuencia, T_{\min} y T_{\max} se tratan como condiciones de borde del despliegue y se reportan como parte del levantamiento.

En segundo lugar, la presencia de material particulado en suspensión puede introducir pérdidas adicionales sobre el enlace. Para capturar este efecto de manera operacional y trazable, la atenuación por polvo/arena se modela como una pérdida lineal proporcional a la distancia del enlace,

$$L_{\text{polvo}} = \gamma_{\text{dust}}(f, \text{escenario}) \cdot d_{\text{km}} \quad [\text{dB}], \quad (3.1)$$

donde d_{km} es la distancia en km y γ_{dust} corresponde a la atenuación específica en dB/km. Esta formulación es consistente con el tratamiento empleado en la literatura base, donde la atenuación específica por tormentas de polvo y arena se expresa como función de la frecuencia, la visibilidad, el radio equivalente de partícula y parámetros dependientes de la permitividad del material, incorporando además el efecto de la humedad relativa a través de la permitividad compleja. En ese marco, la visibilidad se utiliza como variable representativa de la densidad del evento, evitando modelar explícitamente la concentración total de partículas, mientras que los resultados reportados muestran que la atenuación aumenta con la frecuencia y la humedad relativa, y disminuye al aumentar la visibilidad [37].

A partir de ello, en esta metodología no se adopta una constante fija para γ_{dust} , sino una función dependiente de la frecuencia de operación y de un escenario ambiental discreto. Dicho escenario se define combinando un nivel de polvo, representado mediante visibilidad, con un nivel de humedad relativa, de modo que cada combinación remite a un conjunto reproducible de valores de atenuación específica. Esta decisión permite trasladar a la aplicación la dependencia observada en la fuente sin incorporar directamente toda la complejidad del modelo analítico original, pero manteniendo coherencia con sus variables dominantes. En particular, el artículo de referencia reporta valores tabulados de atenuación específica para visibilidades de 4, 10, 40 y 120 m, y para humedades relativas de 20 %, 40 % y 60 %, lo que entrega una base suficiente para construir una parametrización discreta del entorno [37].

La Tabla 3.1 resume la discretización adoptada para visibilidad como *proxy* operacional de concentración de material particulado. Los valores de γ_{dust} allí incluidos se presentan únicamente como referencia de orden de magnitud a 4 GHz y para un nivel de humedad definido, con el fin de evidenciar la variación entre escenarios. En efecto, para una humedad relativa de 20 %, la fuente reporta a 4 GHz atenuaciones específicas de 0.016 dB/km, 0.048 dB/km, 0.194 dB/km y 0.485 dB/km para visibilidades de 120, 40, 10 y 4 m, respectivamente, confirmando el aumento de la atenuación a medida que el escenario se vuelve más severo.

Tabla 3.1: Escenarios discretos de polvo asociados a visibilidad y valores referenciales de γ_{dust} a 4 GHz (RH 20 %).

Nivel de polvo	Visibilidad asociada	γ_{dust} (4 GHz, RH 20 %)
Bajo	$V \approx 120$ m	0.016 dB/km
Medio	$V \approx 40$ m	0.048 dB/km
Alto	$V \approx 10$ m	0.194 dB/km
Extremo	$V \approx 4$ m	0.485 dB/km

Ahora bien, dado que la aplicación compara alternativas tecnológicas que pueden operar en bandas distintas, el cálculo metodológico no utiliza directamente un único valor tabulado de γ_{dust} . En su lugar, para operacionalizar el ajuste en frecuencia de forma simple, reproducible y consistente con los datos reportados, se adopta una ley de potencia por escenario ambiental,

$$\gamma_{\text{dust}}(f; s) = a_s \cdot f^{b_s} \quad [\text{dB/km}], \quad (3.2)$$

donde f se expresa en GHz y s identifica la combinación discreta entre nivel de polvo y nivel de humedad relativa. Esta expresión no pretende reemplazar el fundamento físico del modelo original, sino actuar como una aproximación de implementación en la aplicación, calibrada con los valores tabulados del artículo base [37] para cada escenario.

Los parámetros (a_s, b_s) se obtienen a partir de los valores tabulados de atenuación específica a 4 GHz y 8 GHz reportados para cada escenario, según

$$b_s = \frac{\ln(\gamma_{\text{dust}}(8 \text{ GHz}; s) / \gamma_{\text{dust}}(4 \text{ GHz}; s))}{\ln(8/4)}, \quad (3.3)$$

$$a_s = \frac{\gamma_{\text{dust}}(4 \text{ GHz}; s)}{4^{b_s}}. \quad (3.4)$$

Por ejemplo, para humedad relativa de 20 %, la fuente reporta a 4 GHz y 8 GHz los pares (0,016; 0,042), (0,048; 0,126), (0,194; 0,502) y (0,485; 1,256) dB/km para visibilidades de 120, 40, 10 y 4 m, respectivamente; de forma análoga, entrega los pares correspondientes para 40 % y 60 % de humedad relativa. Así, cada combinación polvo \times humedad queda asociada a una expresión específica $\gamma_{\text{dust}}(f; s)$, lo que evita sesgos al comparar tecnologías en bandas diferentes utilizando un único valor fijo.

Bajo esta formulación, la humedad relativa no se incorpora como un término atmosférico continuo e independiente dentro del presupuesto de enlace, sino como una covariable que participa en la definición del escenario s . En otras palabras, la humedad relativa modifica indirectamente

la atenuación específica empleada en el cálculo al alterar, junto con la visibilidad, los valores tabulados de referencia y, por ende, los parámetros (a_s, b_s) de la ley de potencia. Considerando cuatro niveles discretos de polvo y tres niveles discretos de humedad relativa, la aplicación utiliza en total 12 expresiones de $\gamma_{\text{dust}}(f; s)$, una para cada combinación posible. El detalle de estas expresiones y los valores de atenuación tabulados en el estudio se presentan en el Anexo A.

La Tabla 3.2 presenta los niveles discretos de humedad relativa adoptados como referencia operacional para parametrizar dichos escenarios ambientales.

Tabla 3.2: Niveles discretos de humedad relativa utilizados para parametrizar escenarios ambientales.

Nivel	Humedad relativa
Baja	~ 20 %
Media	~ 40 %
Alta	~ 60 %

En particular, contribuciones como atenuación por gases y vapor de agua según ITU-R P.676 [68], o por niebla/nubes según ITU-R P.840 [69], se consideran despreciables para enlaces típicos en bandas sub-6 GHz y distancias acotadas del orden de decenas de kilómetros, por lo que no se incorporan como términos independientes dentro del presupuesto de enlace en la etapa de selección. En consecuencia, dentro de esta metodología, el efecto de la humedad relativa queda representado únicamente a través de su influencia sobre el escenario de polvo/arena y la correspondiente función $\gamma_{\text{dust}}(f; s)$.

Finalmente, la interferencia electromagnética se incorpora como una degradación operacional del margen de enlace. A diferencia de las pérdidas de propagación, la EMI se manifiesta como una elevación del piso de ruido efectivo del receptor, dificultando la demodulación de la señal útil. Para representar este efecto de forma trazable y conservadora en una metodología de selección, se modela la EMI mediante una penalización fija en dB aplicada al margen disponible, de acuerdo con niveles discretos de severidad. La Tabla 3.3 resume los valores adoptados, consistentes con directrices prácticas para despliegues inalámbricos industriales y con reportes técnicos sobre interferencia en ambientes de planta [70].

Tabla 3.3: Penalización de margen asociada a niveles discretos de interferencia electromagnética (EMI).

Nivel EMI	Penalización
Bajo	0 dB
Medio	3 dB
Alto	10 dB

3.1.3. Registro del inventario de dispositivos

El levantamiento se completa con el registro del inventario de dispositivos y su localización aproximada. Este inventario incluye la identificación de cada nodo, su rol funcional, el servicio asociado y el tipo de alimentación. En este contexto, el *servicio asociado* corresponde a la función industrial que cumple el dispositivo dentro del proceso, de acuerdo con los grupos definidos en la Sección 2.6. Su propósito en esta etapa es describir el uso esperado de cada nodo dentro del proyecto y entregar una clasificación funcional mínima que permita interpretar sus exigencias operacionales.

Conviene distinguir este concepto de los *perfiles de servicio*. Mientras el servicio asociado identifica *qué hace* el dispositivo dentro de la operación, el perfil de servicio representa una *asignación de ponderaciones* utilizada posteriormente en la evaluación multicriterio. En otras palabras, un perfil de servicio traduce un determinado tipo de servicio industrial a un perfil de criticidad con pesos relativos sobre criterios tales como latencia, confiabilidad/disponibilidad, cobertura, ancho de banda, consumo energético y costo. Esta asignación se apoya conceptualmente en las clases definidas por ISA-SP100, no como equivalencia normativa directa de desempeño de red, sino como referencia funcional para reflejar niveles relativos de criticidad.

Bajo esta lógica, la metodología emplea los perfiles de servicio resumidos en la Tabla 3.4, donde se agrupan las principales categorías funcionales del proyecto en perfiles de ponderación.

Tabla 3.4: Correspondencia entre perfiles de servicio, servicios asociados y criterios prioritarios de evaluación.

Perfil de servicio	Servicio asociado	Prioridad
Crítico (Seguridad/Control)	Emergencia, Control Regulatorio	Latencia, confiabilidad/disponibilidad
Control	Control Supervisorio/APC	Confiabilidad/disponibilidad, latencia
Alarmas	Alarma	Confiabilidad/disponibilidad, cobertura
Telemetría	Monitoreo / Telemetría	Consumo, cobertura
Multimedia / Video	Video	Ancho de banda

La localización de cada dispositivo se documenta mediante coordenadas geográficas u otra referencia equivalente que permita estimar distancias entre nodos y relacionar el despliegue con el relieve del terreno. En esta etapa el inventario se utiliza únicamente como *entrada* del análisis, ya que la definición de topología, asignación de roles de red y verificación de conectividad se desarrolla en la Sección 3.3.

3.2. Criterios de selección tecnológica

La metodología de selección de tecnologías IIoT se organiza en dos etapas complementarias. En primer lugar, se aplica un *filtro de factibilidad* basado en restricciones duras, cuyo propósito es descartar alternativas que no puedan cumplir los requerimientos mínimos del servicio bajo las condiciones del sitio. En segundo lugar, las tecnologías que resultan factibles se comparan me-

diante una evaluación multicriterio ponderada, utilizando restricciones blandas para priorizarlas según compromisos de desempeño e implementación. Esta separación entre factibilidad y priorización mejora la trazabilidad, ya que evita recomendar una alternativa por su buen desempeño relativo si no cumple condiciones necesarias de operación.

3.2.1. Parámetros técnicos requeridos para la evaluación

La evaluación se sustenta en un conjunto mínimo de parámetros por tecnología, obtenibles desde estándares, fichas técnicas y revisiones técnicas. En términos de desempeño de comunicación se consideran, al menos, la tasa máxima de datos R_{\max} y la latencia típica τ . Para el análisis radioeléctrico se requieren la banda de operación, la potencia máxima de transmisión P_{TX} y la sensibilidad de recepción S_{RX} . Adicionalmente, se registra la topología soportada, por ejemplo estrella, malla o celular, y niveles cualitativos asociados a confiabilidad, consumo energético y costo de implementación. La procedencia de estos parámetros debe quedar documentada para permitir revisión técnica de los supuestos [9, 16, 17, 54, 57].

3.2.2. Restricciones duras: filtro de factibilidad

Las restricciones duras corresponden a condiciones necesarias. Si una tecnología incumple alguna de ellas, se descarta del análisis posterior.

Capacidad mínima del servicio

Para un servicio dado, la capacidad máxima de la tecnología debe ser suficiente para satisfacer el ancho de banda requerido:

$$R_{\max} \geq R_{\text{req}}. \quad (3.5)$$

Aquí, R_{req} corresponde al umbral de capacidad definido en el levantamiento de requerimientos.

Latencia máxima admisible

La latencia típica de la tecnología debe ser compatible con la latencia máxima tolerable del servicio:

$$\tau \leq \tau_{\text{req}}. \quad (3.6)$$

Esta verificación se interpreta como condición necesaria a nivel comparativo, dado que la latencia práctica también depende de carga, planificación y arquitectura de red.

Compatibilidad energética

La factibilidad energética depende del tipo de alimentación disponible en los nodos. Cuando un servicio incorpora dispositivos alimentados exclusivamente por batería, la energía disponible es estrictamente limitada y se requiere privilegiar alternativas de bajo consumo para asegurar operación sostenida y minimizar intervenciones de mantenimiento. Por ello, en esta metodología

el filtro energético se aplica de forma condicional: si el servicio incluye nodos a batería, se descartan tecnologías clasificadas con consumo energético *alto* en condiciones representativas de operación.

En cambio, cuando la alimentación se realiza mediante energía solar (típicamente con almacenamiento), la disponibilidad energética puede ser mayor, pero queda condicionada al dimensionamiento del sistema de generación y a la irradiancia del sitio. En consecuencia, la presencia de energía solar no implica, por sí sola, descartar tecnologías de mayor consumo; más bien, la compatibilidad debe verificarse mediante un balance energético coherente con el perfil de carga y las condiciones ambientales del emplazamiento.

Factibilidad radioeléctrica mediante presupuesto de enlace

La cobertura no se evalúa mediante alcances nominales, sino mediante presupuesto de enlace bajo las condiciones del sitio. Para cada enlace se calcula la potencia recibida P_{RX} y el margen de enlace M respecto de la sensibilidad del receptor. En forma general,

$$P_{RX} = P_{TX} - L_{\text{path}} - L_{\text{extra}}, \quad (3.7)$$

$$M = P_{RX} - S_{RX}. \quad (3.8)$$

La pérdida de gran escala L_{path} se estima con el modelo log-distance:

$$L_{\text{path}}(d) = L_0(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right), \quad (3.9)$$

donde d es la distancia del enlace, d_0 es la distancia de referencia y n es el exponente de pérdida, seleccionado según la condición de propagación.

La pérdida de referencia $L_0(d_0)$ se obtiene, por ejemplo, desde pérdida en espacio libre a d_0 :

$$L_0(d_0) = 32,44 + 20 \log_{10}(f_{\text{MHz}}) + 20 \log_{10}(d_{0,\text{km}}), \quad (3.10)$$

donde f_{MHz} es la frecuencia en MHz y $d_{0,\text{km}}$ corresponde a d_0 expresada en km.

En la implementación desarrollada no se incorpora explícitamente el término aleatorio X_σ asociado al *shadowing* lognormal. En su lugar, la incertidumbre de propagación se aborda de manera conservadora mediante la consideración de pérdidas adicionales L_{extra} y del margen de enlace M , de modo que el presupuesto de enlace quede penalizado hacia un escenario desfavorable. Así, la holgura respecto de la sensibilidad del receptor permite absorber parcialmente la variabilidad no modelada de la potencia recibida. En este contexto, un mayor margen de desvanecimiento equivale a asumir una mayor aleatoriedad del canal y, por tanto, una mayor exigencia de factibilidad radioeléctrica. Esta simplificación es coherente con el carácter preliminar de la aplicación, cuyo objetivo es entregar una estimación conservadora de factibilidad más que una modelación estadística detallada del canal.

Las pérdidas adicionales L_{extra} agrupan degradaciones del entorno y efectos no capturados por el modelo de gran escala. En esta metodología se consideran: (i) pérdida por polvo o arena

proporcional a la distancia bajo un escenario ambiental, $L_{\text{polvo}} = \gamma_{\text{dust}}(f, \text{escenario}) d_{\text{km}}$, basada en literatura [37]; (ii) penalización por interferencia electromagnética como degradación conservadora del margen, de acuerdo con directrices de despliegue industrial [70]; y (iii) una penalización por obstrucción parcial en la primera zona de Fresnel.

La condición de factibilidad radioeléctrica exige:

$$M \geq M_{\text{obj}}, \quad (3.11)$$

donde M_{obj} representa una holgura de diseño frente a condiciones, variabilidad de diseño y atenuaciones no modeladas.

Factibilidad topológica

La evaluación debe ser coherente con la topología soportada por cada alternativa. En tecnologías de tipo estrella o celular, la conectividad se verifica sobre enlaces directos entre nodos y su punto de agregación. En tecnologías con soporte de malla, la conectividad se evalúa verificando la existencia de al menos una ruta multi-salto entre nodos de un mismo servicio. Para acotar latencia y sobrecarga, se puede definir un número máximo de saltos como parámetro de diseño. La factibilidad en malla exige que cada salto cumpla con la condición de la ecuación (3.11) y que exista al menos una ruta válida.

3.2.3. Evaluación ponderada de candidatas

Las tecnologías que cumplen las restricciones duras se comparan mediante criterios blandos. En esta etapa se utiliza una escala normalizada $S_i \in [1, 10]$ para cada criterio, de modo que el resultado represente una priorización relativa bajo supuestos explícitos. Se consideran seis criterios: cobertura, latencia, capacidad, confiabilidad/disponibilidad, consumo energético y costo de implementación.

Los tres criterios cuantitativos se definen en términos de *holgura respecto del requerimiento del servicio*. De este modo, una tecnología no se favorece solo por tener valores absolutos altos o bajos, sino por cuánta distancia deja respecto del umbral exigido. Los tres criterios cualitativos se integran mediante mapeos discretos trazables, coherentes con la información disponible a nivel de familia tecnológica.

En la literatura de selección tecnológica y MCDM se emplean funciones de utilidad y normalizaciones para comparar criterios heterogéneos, preservando el orden y evitando la dominancia de magnitudes no comparables [19]. No obstante, no existe una formulación única para estas funciones. En consecuencia, las ecuaciones (3.12) – (3.17) se proponen como un aporte del desarrollo de este trabajo: funciones monótonas y acotadas, con saturación y rendimiento decreciente cuando corresponde, diseñadas para reflejar la holgura relativa de cada criterio de forma interpretable y reproducible.

Cobertura: robustez del margen del peor enlace

Para cada tecnología se calcula el margen de enlace en todos los enlaces asociados al servicio y se define M_{\min} como el margen del peor enlace. En particular, dado que el filtro de factibilidad exige $M \geq M_{\text{obj}}$ en todos los enlaces evaluados, se cumple $M_{\min} \geq M_{\text{obj}}$ para toda tecnología que llega a esta etapa. Por lo tanto, se puntúa la holgura $M_{\min} - M_{\text{obj}}$ para diferenciar tecnologías más robustas. El puntaje de cobertura se define mediante la ecuación (3.12),

$$S_{\text{cob}} = 1 + 9 \sqrt{\min\left(1, \frac{M_{\min} - M_{\text{obj}}}{M_{\text{SAT}}}\right)}, \quad (3.12)$$

donde $M_{\text{SAT}} = 10$ dB corresponde a la holgura de margen a partir de la cual el puntaje alcanza su máximo. El uso de una raíz cuadrada introduce rendimiento decreciente, asignando mayor valor relativo a los primeros decibeles de holgura.

Latencia: holgura temporal respecto del máximo admisible

La latencia se evalúa comparando la latencia máxima admisible del servicio τ_{req} con la latencia típica de la tecnología τ . El puntaje se define en función de cuántas veces la tecnología es más rápida que el máximo permitido, como se formaliza en la ecuación (3.13),

$$S_{\tau} = 1 + 9 \cdot \min\left(1, \frac{\tau_{\text{req}}/\tau - 1}{19}\right). \quad (3.13)$$

Con esta definición, el puntaje adopta el valor mínimo cuando $\tau = \tau_{\text{req}}$ y su valor es máximo cuando $\tau_{\text{req}}/\tau \geq 20$. Esta saturación evita que latencias extremadamente bajas dominen el criterio cuando el servicio no lo requiere.

Capacidad: holgura de tasa con escala logarítmica

La capacidad se evalúa comparando la tasa máxima de la tecnología con el ancho de banda mínimo del servicio. Para reducir el efecto de tecnologías de muy alta capacidad en servicios de baja demanda, se utiliza una escala logarítmica, definida en la ecuación (3.14),

$$S_R = 1 + 9 \cdot \min\left(1, \log_{10}\left(\frac{R_{\text{max}}}{R_{\text{req}}}\right)\right). \quad (3.14)$$

Confiabilidad/disponibilidad

La confiabilidad/disponibilidad se integra como criterio cualitativo, mapeado a puntajes normalizados mediante escalas discretas.

Para confiabilidad/disponibilidad, se utiliza un índice ordinal $c \in \{1, 2, 3, 4\}$ asociado a {Baja, Media, Alta, Muy Alta}. El mapeo se define mediante la ecuación (3.15),

$$S_{\text{conf}} = \min(10, 2 + 2c). \quad (3.15)$$

Consumo energético

El consumo energético se mapea análogo al criterio cualitativo de confiabilidad, utilizando un $e \in \{1, 2, 3, 4\}$ asociado a {Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto}. El mapeo inverso se define en la ecuación (3.16),

$$S_{\text{energ}} = \max(1, 11 - 2e). \quad (3.16)$$

Costo de implementación

Análogo al criterio anterior, el costo de implementación utiliza un $k \in \{1, 2, 3\}$ asociado a {Bajo, Medio, Alto}. El mapeo inverso se define en la ecuación (3.17),

$$S_{\text{cost}} = \max(1, 11 - 3k). \quad (3.17)$$

3.2.4. Agregación ponderada por perfil de servicio

El puntaje global se obtiene mediante una suma ponderada, definida en la ecuación (3.18),

$$\text{Score} = \sum_{i=1}^6 w_i S_i, \quad (3.18)$$

donde la condición de normalización $\sum_i w_i = 1$ asegura comparabilidad entre perfiles. Los pesos w_i se asignan según la criticidad del servicio, de modo que servicios críticos prioricen latencia y confiabilidad, mientras que servicios de telemetría prioricen energía y robustez de enlace. La Tabla 3.5 resume perfiles representativos utilizados como referencia metodológica.

Tabla 3.5: Perfiles de servicio considerados.

Perfil	w_{cob}	w_{τ}	w_{conf}	w_R	w_{energ}	w_{cost}
Crítico (Seguridad/Control)	0.10	0.35	0.35	0.05	0.10	0.05
Control	0.15	0.25	0.30	0.05	0.15	0.10
Alarmas	0.20	0.20	0.30	0.05	0.20	0.05
Telemetría	0.25	0.05	0.10	0.05	0.35	0.20
Multimedia/video	0.10	0.15	0.15	0.45	0.10	0.05

Los pesos presentados corresponden a umbrales referenciales para análisis preliminar, por lo que su adecuación debe ser revisada por el ingeniero en función del contexto específico del proyecto.

3.2.5. Salida del proceso y trazabilidad

El proceso concluye con un ranking de tecnologías factibles ordenadas por Score, junto con un registro explícito de descartes y su causalidad, por ejemplo capacidad, latencia, energía, factibilidad radioeléctrica o topología. Esta trazabilidad permite justificar recomendaciones y facilita revisiones iterativas del levantamiento cuando una restricción resulte excesivamente conservadora o cuando el escenario real difiera de las hipótesis adoptadas.

3.3. Dimensionamiento del sistema IIoT

Una vez priorizadas las tecnologías factibles por perfil de servicio, se procede al dimensionamiento del sistema IIoT. En esta metodología, dimensionar significa definir una arquitectura de conectividad verificable a partir del inventario levantado, estableciendo la topología lógica de comunicación y comprobando la robustez radioeléctrica de los enlaces bajo las hipótesis del proyecto. De este modo, el dimensionamiento no reemplaza la selección, sino que la complementa, ya que traduce el resultado del ranking en un diseño preliminar trazable.

En coherencia con las secciones previas, el dimensionamiento utiliza como entradas el inventario de nodos y su localización, las condiciones ambientales caracterizadas en la Sección 3.1.2, los umbrales por servicio definidos en la Sección 3.1 y los parámetros técnicos de la tecnología seleccionada en la Sección 3.2. En lo que sigue, se describen los pasos para construir la topología, definir el conjunto de enlaces a evaluar y verificar conectividad mediante presupuesto de enlace.

3.3.1. Arquitectura por grupo de servicio

El dimensionamiento se realiza por grupo de servicio, debido a que distintos servicios pueden requerir tecnologías y niveles de desempeño diferentes. Para cada servicio se identifica el conjunto de nodos asociados y se define la alternativa tecnológica recomendada, junto con su topología de operación. Esta definición fija el patrón de conectividad que se evaluará en la etapa de verificación radioeléctrica. En términos prácticos, el resultado de este paso es una partición del problema en sub-redes por servicio, cada una con su tecnología y su esquema de conectividad.

3.3.2. Asignación de roles de red y definición de conectividad

A partir del inventario, se asignan roles coherentes con la topología definida. En topologías de tipo estrella o celular, los nodos de campo operan como terminales y se comunican de forma directa con un punto de agregación. En topologías de malla, además de terminales, pueden existir nodos que participen en el reenvío para habilitar rutas alternativas hacia el punto de agregación. Cuando se consideran repetidores dedicados, estos se tratan explícitamente como infraestructura adicional, diferenciándolos del ruteo propio de una malla autoorganizada.

Con la asignación de roles se define el conjunto de enlaces que serán evaluados. En estrella o celular, el conjunto de enlaces corresponde a los enlaces directos nodo–agregador. En malla, se define un grafo de conectividad potencial entre nodos, donde dos nodos se consideran vecinos potenciales si es plausible que formen un enlace radioeléctrico en el sitio. La ruta final se determina en la verificación de conectividad, imponiendo una cota de saltos H_{\max} como parámetro de diseño cuando se requiere acotar retardo y sobrecarga.

3.3.3. Parámetros de instalación para el análisis de enlaces

Para evaluar la conectividad de manera reproducible, se declaran parámetros de instalación consistentes con el escenario del proyecto. En primer lugar, se fija la frecuencia de operación f

asociada a la alternativa tecnológica y se emplea para calcular pérdidas de referencia a través de la ecuación (3.10). En segundo lugar, se consideran los parámetros de radio del enlace, en particular P_{TX} y S_{RX} , de acuerdo con la parametrización definida en la Sección 3.2.1. En tercer lugar, se declaran alturas de instalación representativas para transmisor y receptor, en tanto estas afectan el despeje geométrico y la probabilidad de obstrucciones del terreno. Cuando no se dispone de alturas definidas por ingeniería de detalle, se recomienda utilizar valores de diseño coherentes con el tipo de dispositivo y documentarlos como hipótesis del análisis.

Finalmente, se fijan los parámetros de propagación del modelo log-distance, en particular el exponente de pérdida n de la ecuación (3.9). En esta metodología, n se selecciona según la condición de propagación adoptada para el enlace, distinguiendo entre condiciones con línea de vista despejada y condiciones con obstrucciones relevantes. Si se utiliza una penalización por obstrucción parcial de Fresnel, esta se incorpora en L_{extra} como un término adicional de pérdidas, coherente con la formulación de presupuesto de enlace.

3.3.4. Verificación radioeléctrica de enlaces y margen mínimo

La verificación de conectividad se realiza mediante presupuesto de enlace y margen de enlace. Para cada enlace evaluado se calcula la potencia recibida a partir de la ecuación (3.7) y, con ello, el margen de enlace mediante la ecuación (3.8). Las pérdidas de gran escala se obtienen con la ecuación (3.9), mientras que las pérdidas adicionales se incorporan en L_{extra} incluyendo, cuando corresponda, la pérdida por polvo/arena según el escenario definido en la Sección 3.1.2 y la penalización por interferencia electromagnética.

Para un servicio dado, se evalúan todos los enlaces relevantes de acuerdo con la topología definida. En estrella o celular, se verifica el margen de cada enlace nodo–agregador. En malla, se verifica el margen en enlaces entre vecinos potenciales y se determina la existencia de rutas factibles hacia el punto de agregación. En todos los casos, la condición de factibilidad exige que el margen cumpla el umbral objetivo definido en la ecuación (3.11). Esta verificación permite identificar enlaces críticos, cuantificar holgura disponible y detectar necesidades de ajuste de instalación, por ejemplo modificación de ubicación o incorporación de infraestructura adicional.

3.3.5. Validación de conectividad en topologías de malla

Cuando la alternativa tecnológica soporta malla, la conectividad se valida a nivel de ruta. En esta metodología, se considera factible una red si existe al menos una ruta desde cada nodo hacia el punto de agregación, tal que cada salto individual cumple la condición de margen definida en la ecuación (3.11). Para controlar complejidad y retardo acumulado, se define una cota H_{max} de saltos permitidos como parámetro de diseño. Si una ruta supera H_{max} o no existe una ruta que satisfaga el umbral de margen en todos sus saltos, el despliegue se considera no factible bajo la alternativa evaluada para ese servicio.

Como verificación complementaria de robustez, puede evaluarse la densidad local de conectividad en torno a cada nodo, dado que un mayor número de vecinos potenciales tiende a mejorar

la redundancia de rutas ante degradaciones del canal. Este tipo de verificación se utiliza como criterio de calidad del despliegue y es coherente con recomendaciones reportadas para redes malladas industriales [27]. En caso de detectarse nodos con conectividad limitada, se recomienda revisar ubicación, alturas de instalación o la incorporación de nodos de apoyo, manteniendo trazabilidad de los cambios efectuados.

3.3.6. Síntesis del dimensionamiento y entregables

El dimensionamiento culmina en un conjunto de resultados que permiten auditar la solución propuesta y preparar documentación de ingeniería. En primer lugar, se consolida el inventario de dispositivos por servicio, incluyendo rol de red, tipo de servicio, alimentación y localización. En segundo lugar, se reporta la topología resultante, indicando el punto de agregación y las conexiones evaluadas. En tercer lugar, se entrega una tabla de verificación de enlaces que incluya distancia, pérdidas consideradas, margen calculado y estado de cumplimiento respecto del umbral M_{obj} según la ecuación (3.11). En cuarto lugar, se documentan los casos no factibles y su causa, de modo que sea posible iterar sobre el levantamiento o sobre hipótesis de instalación cuando corresponda.

En conjunto, esta sección cierra el ciclo metodológico del capítulo al traducir requerimientos y criterios de selección en un diseño preliminar verificable. Sobre esta base, la comparación final entre alternativas puede incorporar criterios complementarios de implementación, tales como disponibilidad de proveedores, soporte local, compatibilidad con infraestructura existente y restricciones regulatorias, manteniendo trazabilidad entre requerimientos, verificación radioeléctrica y decisión de implementación.

3.4. Comparación de alternativas y decisión de implementación

Una vez dimensionado el sistema por grupo de servicio, la metodología incorpora una etapa final de comparación para consolidar la recomendación de implementación. Esta etapa no reemplaza los resultados de factibilidad ni el puntaje global, sino que los organiza para respaldar una decisión trazable. En particular, permite distinguir entre la alternativa principal y alternativas de respaldo cuando existen diferencias marginales en el puntaje global o cuando el proyecto impone restricciones prácticas adicionales.

3.4.1. Consolidación de resultados por servicio

Para cada servicio se consolida el conjunto de tecnologías factibles, su ranking según el puntaje global definido por la ecuación (3.18) y los puntajes parciales por criterio. En paralelo, se registra la causalidad de descarte de tecnologías no factibles, de acuerdo con las restricciones duras de la Sección 3.2.2. Esta consolidación permite identificar si el resultado está dominado por limitaciones estructurales, como incapacidad o latencia insuficiente, o por condiciones del sitio relacionadas con margen de enlace y topología.

Cuando el proyecto involucra múltiples servicios, la consolidación se realiza por sub-red, manteniendo trazabilidad de los umbrales R_{req} y τ_{req} asociados, así como del margen objetivo M_{obj} utilizado en la verificación radioeléctrica descrita por la ecuación (3.11). Con ello, la recomendación final refleja el conjunto de necesidades del proyecto y no únicamente el desempeño en un servicio aislado.

3.4.2. Criterios complementarios a la evaluación cuantitativa

En la práctica, la decisión de implementación puede verse influida por factores que no siempre se representan con precisión en una función de puntaje, especialmente cuando la comparación se realiza a nivel de familia tecnológica. Por esta razón, la metodología considera criterios complementarios que se documentan junto con el ranking.

En primer lugar, se evalúa la compatibilidad con infraestructura existente en la faena, incluyendo redes troncales, disponibilidad de enlaces de retorno y restricciones de operación y mantenimiento. En segundo lugar, se consideran aspectos de soporte y mantenibilidad, tales como disponibilidad de proveedores, repuestos, capacidades de integración y experiencia previa del operador con tecnologías similares. En tercer lugar, se revisan restricciones regulatorias aplicables a la banda de operación y a la certificación del equipamiento, de modo que la alternativa recomendada sea implementable bajo el marco normativo vigente. Finalmente, cuando existen requisitos de seguridad y ciberseguridad relevantes para el servicio, se verifica que la alternativa sea compatible con controles y prácticas coherentes con estándares de seguridad industrial aplicables [64, 65].

3.4.3. Selección final y alternativas de respaldo

La selección final se expresa como una recomendación por servicio, compuesta por una alternativa principal y, cuando corresponda, una alternativa de respaldo. La alternativa principal corresponde a la tecnología con mayor puntaje global que además presenta un dimensionamiento factible y consistente con los supuestos del proyecto. La alternativa de respaldo se selecciona entre las tecnologías con puntaje cercano, privilegiando aquella que mantenga factibilidad radioeléctrica y reduzca riesgos de implementación asociados a disponibilidad, soporte o restricciones externas.

Para mantener trazabilidad, la recomendación final se acompaña del ranking de tecnologías factibles, del motivo de descarte de alternativas no factibles, de los supuestos principales del dimensionamiento y del margen objetivo, y de los criterios complementarios considerados.

Capítulo 4

Desarrollo de la aplicación web y gestión de datos

4.1. Alcance de implementación y restricciones de acceso

La aplicación desarrollada en este trabajo se implementa como una herramienta de uso interno orientada a apoyar procesos de ingeniería. En consecuencia, su acceso se encuentra restringido por acuerdos de confidencialidad y por políticas de operación del entorno corporativo. En particular, la ejecución y utilización de la aplicación se limita a la red interna de Hatch, de modo que el sistema no se expone públicamente a Internet ni se habilita para usuarios externos.

Esta restricción condiciona decisiones de despliegue y operación. Por una parte, permite asumir un perímetro de red controlado, facilitando el cumplimiento de requisitos de seguridad y confidencialidad de información del proyecto. Por otra parte, delimita el esquema de administración de usuarios y acceso, priorizando mecanismos compatibles con la infraestructura existente de la organización. Bajo este marco, la aplicación se concibe como un sistema de apoyo a la ingeniería cuya disponibilidad y uso se circunscriben al entorno de trabajo definido por Hatch.

4.2. Requisitos del sistema

El desarrollo de la aplicación se sustentó en un conjunto de requisitos funcionales y no funcionales definidos en etapas tempranas del trabajo. Estos requisitos se derivaron de necesidades operacionales de equipos de ingeniería de Hatch y se alinearon con el procedimiento metodológico establecido en el Capítulo 3.

4.2.1. Requisitos funcionales

Los requisitos funcionales describen las capacidades que el sistema debe ofrecer para soportar el flujo de trabajo definido en el Capítulo 3. En particular, el sistema debe permitir:

RF01. Gestionar proyectos. La herramienta debe permitir crear, cargar, actualizar y eliminar proyectos, manteniendo trazabilidad entre entradas, cálculos y resultados. Para cada proyecto se deben registrar atributos mínimos de contexto, incluyendo nombre, ubicación geográfica de mina (latitud y longitud decimal), tipo de aplicación minera y condiciones ambientales tales como temperatura, nivel de polvo, interferencia electromagnética

y humedad. En particular, la temperatura deberá registrarse como rango de operación de sitio, definido a partir de los antecedentes entregados por el cliente para cada proyecto, de modo de representar la variación estacional real de la mina; por ejemplo, este rango puede abarcar condiciones del orden de -10°C a 40°C , según la ubicación y exigencias operacionales del sitio.

RF02. Registrar y/o seleccionar el inventario de dispositivos del proyecto. Se debe permitir registrar los equipos que participan en la red, incorporando tipo de dispositivo, identificador o TAG, servicio asociado, tipo de alimentación, coordenadas geográficas y una descripción opcional. Asimismo, se debe permitir la selección de dispositivos disponibles en la base de datos de la aplicación. La generación de identificadores debe favorecer consistencia entre reportes y documentación de ingeniería.

RF03. Parametrizar condiciones de dimensionamiento. Se debe permitir definir parámetros generales del caso, tales como topología de conectividad considerada, alturas de instalación representativas para transmisión y recepción, y frecuencia de operación de referencia cuando corresponda.

RF04. Definir servicios y sus requisitos. Se debe permitir especificar los servicios requeridos, incluyendo requisitos mínimos de capacidad y latencia máxima admisible.

RF05. Caracterizar enlaces sobre un componente cartográfico interactivo. Se debe disponer de una vista cartográfica que permita posicionar nodos, definir y eliminar enlaces, visualizar la topología sobre cartografía y exportar la configuración en un formato interoperable para revisión externa.

RF06. Verificar línea de vista y perfil del terreno. Se debe permitir consultar modelos digitales de elevación y evaluar el despeje de la primera zona de Fresnel, entregando una estimación orientativa de requerimientos de altura de instalación cuando se detecten obstrucciones.

RF07. Evaluar alternativas y recomendar tecnologías por servicio. Se debe implementar una evaluación consistente con el Capítulo 3, aplicando restricciones duras y una evaluación multicriterio ponderada. El análisis debe considerar el presupuesto de enlace y sus pérdidas asociadas, además de ponderaciones ajustables por perfil de servicio. Cuando una alternativa soporte topologías de malla, se debe evaluar conectividad multi-salto de forma consistente con la etapa de dimensionamiento.

RF08. Generar un reporte ejecutivo en formato PDF. Se debe producir un documento que consolide la recomendación, el ranking de alternativas factibles, el listado de descartes con causalidad, la topología evaluada, el inventario de dispositivos, el detalle de verificación de enlaces y las hipótesis radioeléctricas utilizadas.

RF09. Mantener un catálogo de tecnologías y fichas técnicas. Se debe disponer de un catálogo persistente de tecnologías IIoT con parámetros técnicos relevantes para la

evaluación, junto con fichas de consulta y visualizaciones comparativas. El catálogo debe poder actualizarse mediante carga de archivos estructurados.

RF10. Persistir y recuperar el estado de trabajo. La información asociada a un proyecto debe persistir en una base de datos relacional, permitiendo reanudar el análisis en sesiones posteriores sin pérdida de datos, incluyendo configuración, inventario, nodos, enlaces, evaluaciones y metadatos del reporte.

La Tabla 4.1 resume estos requisitos funcionales y su relación con los módulos principales de la aplicación.

Tabla 4.1: Resumen de requisitos funcionales y módulos asociados.

RF	Requisito funcional	Módulo asociado
RF01	Gestión de proyectos	Contexto del proyecto
RF02	Registro del inventario de dispositivos	Dimensionamiento y servicios
RF03	Parametrización de condiciones de dimensionamiento	Dimensionamiento y servicios
RF04	Definición de servicios y sus requisitos	Dimensionamiento y servicios
RF05	Caracterización de enlaces sobre mapa interactivo	Caracterización de enlaces
RF06	Verificación de línea de vista y perfil del terreno	Caracterización de enlaces
RF07	Evaluación multicriterio y recomendación por servicio	Análisis y selección
RF08	Generación de reporte ejecutivo en PDF	Reporte ejecutivo
RF09	Catálogo de tecnologías y fichas técnicas	Fichas técnicas
RF10	Persistencia y recuperación del estado de trabajo	Base de datos

4.2.2. Requisitos no funcionales

Los requisitos no funcionales definen propiedades del sistema que condicionan decisiones de arquitectura, tecnología y despliegue. En particular, el sistema debe cumplir:

RNF01. Operación en red interna. De acuerdo con lo establecido en la Sección 4.1, la aplicación debe operar exclusivamente dentro de la red corporativa, sin exposición pública a Internet, orientando el despliegue hacia un servidor interno accesible vía navegador.

RNF02. Interactividad adecuada del componente cartográfico. La edición de topologías con decenas de nodos y enlaces debe mantenerse fluida, con una respuesta percibida adecuada para tareas de ingeniería.

RNF03. Compatibilidad con navegadores modernos. El sistema debe ejecutarse en navegadores web actuales sin requerir extensiones adicionales en las estaciones de trabajo.

RNF04. Trazabilidad y reproducibilidad. Cada evaluación debe preservar parámetros radioeléctricos, hipótesis de propagación, criterios de filtrado y ponderaciones aplicadas, de manera que los resultados sean reproducibles y auditables.

RNF05. Extensibilidad del catálogo. El catálogo de tecnologías debe poder extenderse mediante carga de archivos estructurados, permitiendo inserción y actualización sin requerir modificaciones de código.

RNF06. Mantenibilidad por modularidad. La base de código debe mantener separación de responsabilidades entre interfaz, lógica de análisis, persistencia y visualización, facilitando evolución independiente de módulos.

RNF07. Soporte de fuentes de elevación heterogéneas. El sistema debe soportar múltiples fuentes de elevación, incorporando una lógica de respaldo para continuar operación cuando alguna fuente no se encuentre disponible.

RNF08. Generación programática de documentos. El reporte PDF debe generarse programáticamente dentro del sistema, sin depender de herramientas externas de edición ni de servicios de redacción en la nube.

4.3. Diseño del sistema

Una vez definidos los requisitos del sistema en la Sección 4.2, se aborda el diseño de la arquitectura, el modelo de datos y la organización modular de la aplicación. Las decisiones de diseño se orientaron a satisfacer simultáneamente necesidades de interactividad, persistencia y trazabilidad, manteniendo coherencia con el flujo metodológico descrito en el Capítulo 3.

4.3.1. Arquitectura lógica y componentes

La arquitectura adoptada sigue un modelo de tres capas lógicas: presentación, lógica de negocio y persistencia. Este enfoque permite separar la interacción con el usuario, los cálculos del dominio y el almacenamiento de información del proyecto. La Figura 4.1 presenta la arquitectura general y el intercambio de información entre componentes.

Capa de presentación. La capa de presentación se implementó como una interfaz web desarrollada con Streamlit. Esta capa concentra el enrutamiento entre módulos, los formularios de entrada y la visualización de resultados. Para el mapa dinámico se incorporó un componente personalizado desarrollado en React y embebido como componente de Streamlit, el cual encapsula la librería Leaflet para la visualización de nodos y enlaces y para la edición interactiva de la topología.

La interfaz se organiza en siete módulos funcionales: portada, contexto del proyecto, dimensionamiento y servicios, caracterización de enlaces, análisis y selección, reporte ejecutivo y fichas técnicas. El módulo principal de la aplicación se encarga de la navegación entre módulos mediante un selector en la barra lateral, manteniendo una estructura coherente con el flujo de trabajo del Capítulo 3.

Capa de lógica de negocio. La lógica de negocio agrupa los módulos que implementan las funciones de análisis y generación de resultados. En particular, el motor de evaluación

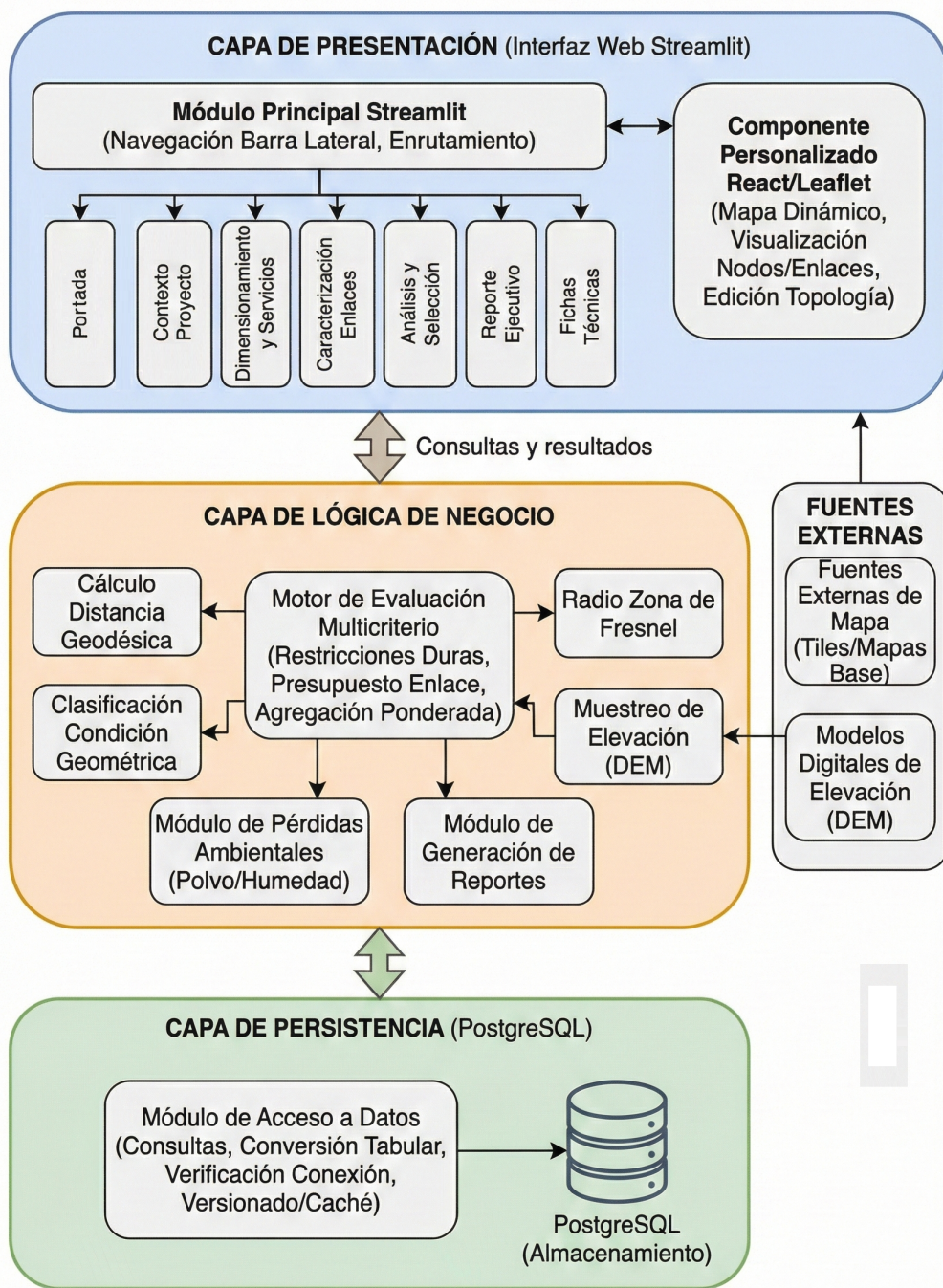


Figura 4.1: Arquitectura lógica del sistema, organizada en capas de presentación, lógica de negocio y persistencia, e integración con fuentes externas de mapa y elevación. Fuente: elaboración propia.

multicriterio implementó la metodología descrita en el Capítulo 3, incluyendo la aplicación de restricciones duras, el cálculo del presupuesto de enlace y la agregación ponderada por perfil de servicio. Para ello, se integraron módulos de apoyo que realizan cálculos de distancia geodésica, radio de la zona de Fresnel, muestreo de elevación mediante modelos digitales de elevación y clasificación de condición geométrica del enlace. Adicionalmente, se incorpora un módulo dedicado a pérdidas ambientales para parametrizar atenuación por polvo y humedad de forma consistente con la caracterización del entorno, así como un módulo de generación de reportes que construye un documento ejecutivo con resultados, supuestos y trazabilidad.

Capa de persistencia. La persistencia se implementó sobre PostgreSQL, accedido desde la aplicación mediante un módulo de acceso a datos. Esta capa encapsula la ejecución de consultas y la conversión de resultados a estructuras tabulares para su visualización. Con el fin de mantener consistencia durante sesiones de trabajo extensas, el acceso a datos incorporó verificación de conexión y un mecanismo de versionado por proyecto para invalidación selectiva de cachés cuando la información persistida cambia.

4.3.2. Modelo de datos

El modelo de datos se diseñó con una estructura relacional centrada en la entidad `proyectos`, desde la cual se derivan las entidades que describen el entorno, el dimensionamiento, los servicios, la topología de nodos y enlaces, y los resultados de evaluación. Se priorizó la integridad referencial mediante claves foráneas con eliminación en cascada, de modo que la eliminación de un proyecto remueva automáticamente toda la información asociada. La Figura 4.2 muestra el diagrama entidad-relación del esquema.

El esquema se compone de las siguientes tablas, organizadas por dominio:

proyectos. Tabla central que almacena información descriptiva del proyecto, incluyendo nombre, descripción y localización geográfica, además de metadatos utilizados en el reporte ejecutivo.

entorno. Tabla con relación uno a uno respecto de `proyectos`, destinada a registrar condiciones ambientales relevantes para el análisis, tales como rango de temperatura, nivel de polvo, nivel de interferencia electromagnética y humedad.

dimensionamiento. Tabla con relación uno a uno respecto de `proyectos`, que almacena parámetros generales del caso, incluyendo topología, alturas de instalación representativas y frecuencia de referencia.

servicios. Tabla con relación uno a muchos respecto de `proyectos`, que permite definir múltiples servicios por proyecto, incluyendo sus requerimientos mínimos.

enlaces_nodos y enlaces_conexiones. Las entidades de topología se modelan separando nodos y enlaces. La tabla `enlaces_nodos` almacena la localización de cada nodo, su rol y el servicio asociado. La tabla `enlaces_conexiones` registra enlaces entre pares de nodos e incorpora atributos de caracterización geométrica del enlace. Este diseño permite representar redes con diferente densidad y topología manteniendo consistencia por proyecto.

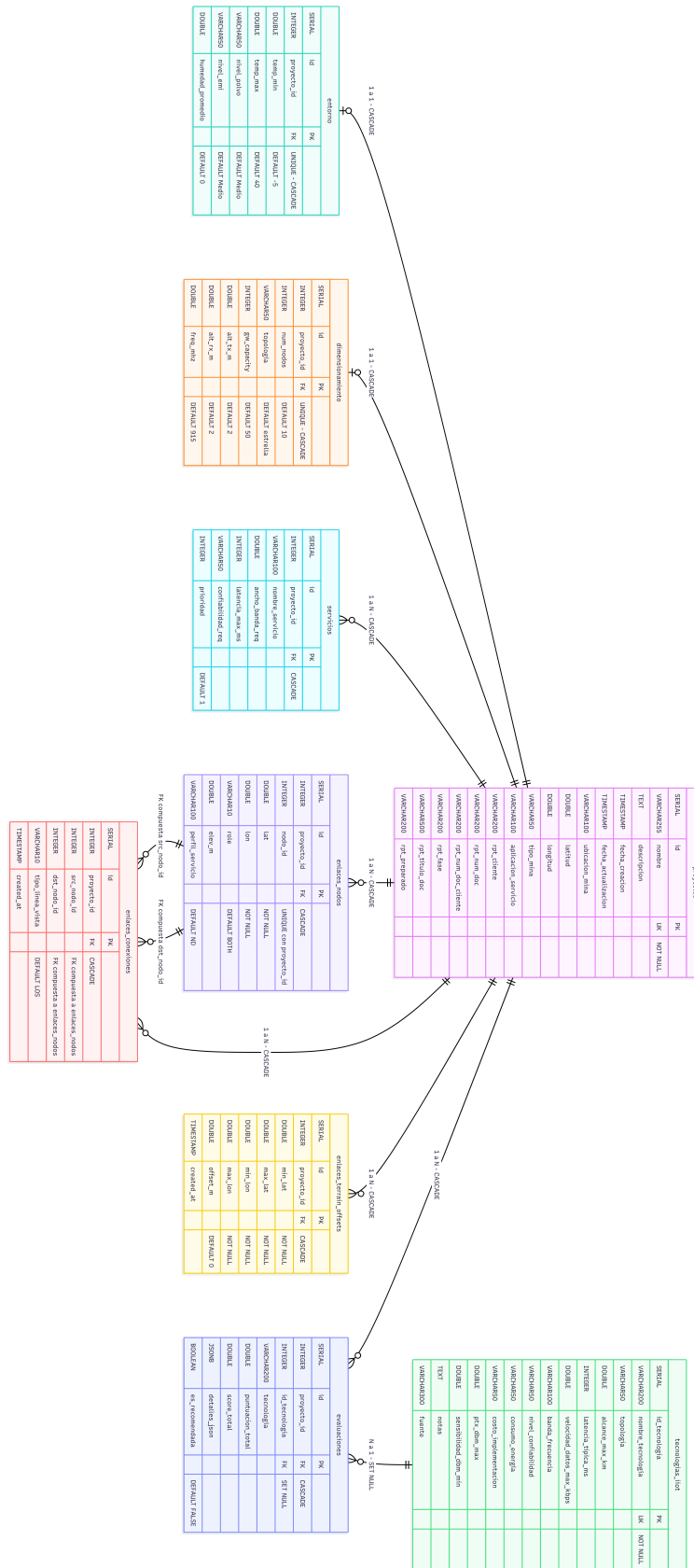


Figura 4.2: Diagrama entidad–relación del esquema de base de datos. Fuente: elaboración propia.

enlaces_terrain_offsets. Tabla auxiliar que almacena correcciones locales de elevación en regiones geográficas definidas, utilizada para ajustar el perfil de terreno cuando se requiere coherencia con información de terreno actualizada.

evaluaciones. Tabla que persiste resultados del motor de evaluación, incluyendo puntaje agregado y desglose de resultados. Para mantener flexibilidad ante cambios de estructura en el desglose, se utilizó un campo estructurado para almacenar el detalle de puntajes y causalidades.

tecnologias_iiot. Tabla independiente que contiene el catálogo de tecnologías y sus parámetros técnicos. Este catálogo se mantiene desacoplado de `proyectos` y es referenciado desde `evaluaciones`, lo que permite actualizar parámetros tecnológicos sin modificar información histórica de proyectos.

Cabe señalar que, dado que la aplicación ejecuta automáticamente el motor de análisis al ingresar a la sección de evaluación, los resultados no se consideran históricamente inmutables, sino que la evaluación del enlace reflejará el estado vigente de los parámetros definidos en el catálogo tecnológico al momento del cálculo.

4.3.3. Estructura de la aplicación

La aplicación se organizó en una estructura de directorios que refleja la separación de responsabilidades descrita en la Sección 4.3.1. La Tabla 4.2 resume los archivos y directorios principales y su rol en el sistema.

La navegación del usuario se implementó como un flujo secuencial guiado, coherente con las dependencias metodológicas entre etapas. La Figura 4.3 resume el flujo funcional entre módulos, destacando la dependencia desde el contexto del proyecto hasta la generación de reporte.

4.4. Implementación

Esta sección describe decisiones de implementación adoptadas para materializar la arquitectura presentada en la Sección 4.3. Se abordan, en primer lugar, la configuración del entorno de ejecución; en segundo lugar, la implementación de la base de datos y sus restricciones; y, finalmente, aspectos relevantes de la implementación de la aplicación, incluyendo gestión de estado, componente de mapa dinámico y generación de reportes.

4.4.1. Configuración del entorno

La aplicación se desarrolló y desplegó sobre un entorno Python 3.11, administrado mediante un entorno virtual (`venv`) creado en la raíz del proyecto. Las dependencias se declararon en el archivo `requirements.txt` y se instalaron mediante `pip`. La Tabla 4.3 resume las bibliotecas principales y su rol en el sistema.

Para el mapa dinámico embebido (`st_leaflet`), el *frontend* se construyó en React y se integró como componente personalizado de Streamlit. En términos de dependencias, el

Tabla 4.2: Estructura de archivos del proyecto y responsabilidades principales.

Archivo / directorio	Responsabilidad
app.py	Punto de entrada, configuración general y navegación entre módulos.
db.py	Capa de acceso a datos: conexión, ejecución SQL y utilidades de persistencia.
rf_profile.py	Cálculos geoespaciales y de enlace: distancia, Fresnel, perfil de elevación y condición geométrica.
utils_rf_losses.py	Pérdidas ambientales y parametrización de atenuación por polvo/humedad.
utils_state.py	Inicialización de estado, constantes y configuración del motor de evaluación.
utils_map.py	Generación de imagen de topología para inserción en reporte.
reports.py	Generación del reporte ejecutivo en PDF.
sections/	Módulos de interfaz: contexto, inventario/servicios, enlaces, fichas técnicas, análisis, reporte y catálogo.
st_leaflet/	Mapa dinámico embebido: integración React–Leaflet con Streamlit.
data/	Archivos de datos auxiliares, incluyendo catálogo base de tecnologías.
assets/	Recursos estáticos del reporte, como logotipos y fuentes tipográficas.

Tabla 4.3: Dependencias principales del proyecto y rol en el sistema.

Paquete	Versión	Rol en el sistema
streamlit	≥ 1.30	Interfaz web declarativa y gestión de interacción.
psycopg2-binary	≥ 2.9	Adaptador PostgreSQL para Python.
pandas	≥ 2.0	Manipulación tabular y conversión SQL a estructuras de datos.
numpy	≥ 1.24	Cálculos numéricos utilizados en procesamiento de perfiles y métricas.
plotly	≥ 5.15	Visualizaciones interactivas de comparación y resultados.
fpdf2	≥ 2.7	Generación programática del reporte ejecutivo en PDF.
requests	–	Consultas HTTP a servicios de elevación y mapas estáticos.
Pillow	–	Procesamiento de imágenes asociado a tiles y mapas.
srtm.py	0.3.7	Fuente alternativa de elevación basada en SRTM.

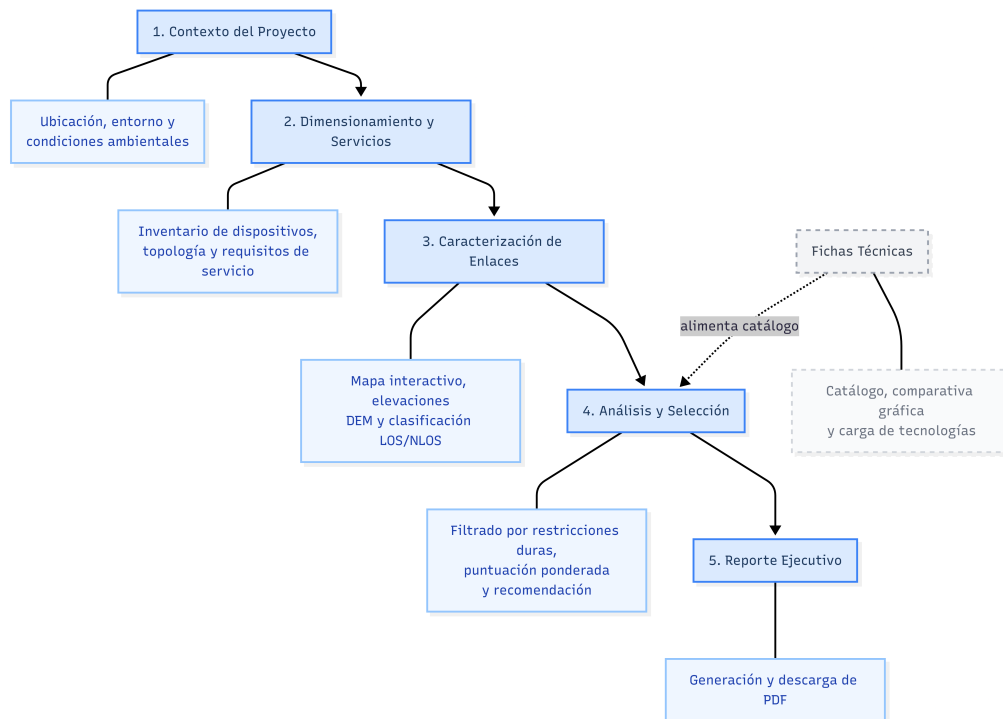


Figura 4.3: Flujo funcional de uso de la aplicación, desde el registro del contexto del proyecto hasta la generación del reporte ejecutivo. Fuente: elaboración propia.

componente utilizó React como marco de renderizado, Leaflet como librería cartográfica y `streamlit-component-lib` como puente de comunicación entre el *frontend* y la aplicación en Python.

El despliegue en la red interna de Hatch se realizó ejecutando el servidor Streamlit en una máquina designada, accesible desde estaciones de trabajo mediante navegador web. La configuración de conexión a la base de datos se gestionó mediante el archivo `secrets.toml` de Streamlit, lo que permitió mantener credenciales fuera del código fuente y reducir su exposición accidental.

4.4.2. Implementación de la base de datos

La persistencia se implementó sobre PostgreSQL, administrado mediante pgAdmin 4. El esquema se mantuvo como referencia en un archivo DDL y, adicionalmente, su inicialización se automatizó desde la aplicación mediante una rutina que crea tablas cuando no existen. Este enfoque permitió iterar sobre el esquema durante el desarrollo, manteniendo consistencia con el modelo entidad-relación descrito en la Sección 4.3.2.

Las restricciones de integridad incluyeron claves foráneas con eliminación en cascada desde `proyectos`, garantizando que la eliminación de un proyecto remueva toda la información asociada. Asimismo, se aplicaron restricciones de unicidad coherentes con las relaciones uno a uno y con la identificación compuesta de nodos y enlaces dentro de un mismo proyecto.

En particular, se utilizó unicidad sobre `proyecto_id` en tablas uno a uno, unicidad compuesta (`proyecto_id`, `nodo_id`) para nodos, y unicidad compuesta (`proyecto_id`, `src_nodo_id`, `dst_nodo_id`) para enlaces, evitando duplicación de registros y asegurando consistencia topológica.

Para los resultados de evaluación se utilizó el tipo `JSONB` en PostgreSQL, permitiendo persistir el desglose de puntajes y causalidades sin rigidizar el esquema de datos. Esta decisión se adoptó debido a que el detalle interno de la evaluación puede evolucionar con el tiempo, mientras que el resultado agregado y su trazabilidad deben mantenerse estables.

4.4.3. Implementación de la aplicación

Modelo de ejecución y rendimiento. La aplicación se desarrolló bajo el modelo reactivo de Streamlit, en el cual cada interacción del usuario desencadena una re-ejecución del *script* asociado. Para reducir el costo computacional de este comportamiento, se emplearon mecanismos de caché para recursos persistentes y para datos de carga frecuente, en particular conexión a base de datos y lectura del catálogo de tecnologías. Adicionalmente, se segmentaron secciones de interfaz para acotar re-ejecuciones a componentes relevantes cuando se actualiza información puntual.

Gestión de estado. El estado de sesión de Streamlit se utilizó como almacenamiento transitorio para el proyecto activo, el inventario de dispositivos, la topología de nodos y enlaces y variables de control de la interfaz. Al cargar un proyecto, la aplicación reconstruyó el estado de trabajo desde la base de datos, asegurando continuidad de la sesión. Para mantener consistencia entre persistencia y visualización, se incorporó un mecanismo de versionado por proyecto que permite invalidar selectivamente cachés cuando se actualizan datos asociados a un proyecto específico.

Mapa dinámico embebido. El mapa se implementó como un componente personalizado de Streamlit, con un *backend* en Python que declara el componente y un *frontend* en React que implementa la interacción cartográfica. La comunicación se realizó de forma bidireccional, transmitiendo desde el mapa eventos asociados a creación y edición de nodos y enlaces, y recibiendo desde la aplicación el estado vigente de la topología para su renderizado. Este diseño permitió integrar edición interactiva de la red con persistencia en base de datos y con los cálculos posteriores de caracterización de enlaces.

Generación del reporte ejecutivo. La generación del reporte se implementó de forma programática con FPDF2. El módulo de reportes definió plantillas de encabezado y pie de página, e integró tablas de resultados, mapas estáticos y secciones de trazabilidad que consolidan supuestos del análisis. Para asegurar portabilidad del documento, se utilizaron fuentes tipográficas embebidas y se incorporaron imágenes en formato estándar.

Persistencia integrada. La persistencia de datos combinó operaciones explícitas para acciones de creación y eliminación con actualizaciones controladas para edición de campos. De este modo, la información relevante queda almacenada en base de datos sin depender de la continuidad de la sesión de navegador, lo que permite retomar el trabajo posteriormente y asegurar trazabilidad

entre entradas, resultados y reportes.

4.5. Funcionalidades principales

En esta sección se describen las capacidades funcionales del sistema desde la perspectiva de las tareas de ingeniería que soporta, manteniendo el foco en qué información procesa cada módulo, qué resultados entrega y cómo se preserva la trazabilidad, sin constituir un manual de uso.

4.5.1. Gestión del contexto del proyecto

El módulo *Contexto del Proyecto* constituye el punto de entrada del flujo de trabajo. Su función es registrar la identificación del proyecto y su localización geográfica, además de parametrizar las condiciones ambientales que se utilizarán posteriormente en el presupuesto de enlace. Para facilitar consistencia, se incorporó un conjunto de ubicaciones preconfiguradas de operaciones mineras, las cuales permiten inicializar coordenadas de referencia y reducir errores de ingreso. Sobre esta base, se registran las variables del entorno consideradas en la metodología, incluyendo temperatura, polvo o arena, interferencia electromagnética y humedad. Cuando corresponde, dichos parámetros se inicializan mediante valores predefinidos asociados a la aplicación minera en superficie, manteniendo la posibilidad de ajuste manual para reflejar condiciones particulares del sitio.

4.5.2. Gestión de dispositivos y servicios

El módulo *Dimensionamiento y Servicios* permite construir el inventario de dispositivos que componen el sistema IIoT y asociar cada dispositivo a un servicio. En el inventario se registran atributos esenciales para el análisis posterior, tales como tipo de dispositivo, identificación por TAG, fuente de alimentación y ubicación geográfica. Con el fin de simplificar el levantamiento en proyectos con alta cantidad de nodos, se implementó generación automática de identificadores y soporte para creación masiva de dispositivos, manteniendo consistencia en la nomenclatura.

En el mismo módulo se definen los servicios requeridos por el proyecto y sus requisitos mínimos de comunicación, incluyendo capacidad y latencia máxima admisible, además de atributos asociados a criticidad. Esta información se utiliza como entrada directa del motor de evaluación descrito en el Capítulo 3, permitiendo que el análisis se ejecute por perfil de servicio con umbrales verificables.

4.5.3. Caracterización de enlaces mediante mapa dinámico

El módulo *Caracterización de Enlaces* integra un mapa dinámico embebido que permite definir la topología física del sistema mediante la ubicación de nodos y la creación de enlaces entre ellos. Este módulo consolida, para cada enlace, la información geométrica requerida por el

presupuesto de enlace: distancia geodésica, perfil de elevación del terreno y evaluación del despeje de la primera zona de Fresnel. En caso de detectarse obstrucciones, se entrega una estimación orientativa de requerimientos de altura de instalación para mejorar el despeje geométrico.

Como salida, el módulo clasifica enlaces según su condición geométrica, distinguiendo enlaces con línea de vista despejada, enlaces con obstrucción parcial y enlaces sin línea de vista. Esta clasificación se incorpora posteriormente en el cálculo de pérdidas adicionales del presupuesto de enlace. La topología construida puede exportarse en un formato KMZ interoperable para revisión externa, facilitando validación con equipos de proyecto.

4.5.4. Evaluación y recomendación por perfil de servicio

El módulo *Análisis y Selección* materializa la metodología de evaluación descrita en el Capítulo 3. Para cada servicio definido, el sistema ejecuta un proceso en dos etapas. En primer lugar, aplica un filtro de factibilidad basado en restricciones duras, descartando alternativas que no cumplan los umbrales mínimos de capacidad, latencia, compatibilidad energética y factibilidad radioeléctrica según el presupuesto de enlace. En segundo lugar, compara las tecnologías factibles mediante una evaluación ponderada por criterios, utilizando los puntajes normalizados y la agregación descritos en la Sección 3.2.3 y la Sección 3.2.4.

El resultado se presenta como un ranking por grupo de servicio, junto con un registro de tecnologías descartadas y su causalidad. Este enfoque permite justificar el resultado final y facilita la revisión técnica cuando el levantamiento del proyecto o las hipótesis del entorno cambian.

4.5.5. Persistencia y trazabilidad de resultados

El sistema persiste la información del proyecto y los resultados del análisis en la base de datos descrita en la Sección 4.3.2. En particular, se almacenan tanto los resultados agregados de evaluación como el desglose por criterios, permitiendo consultar evaluaciones previas sin necesidad de re-ejecutar el cálculo completo. Esta persistencia habilita continuidad de trabajo entre sesiones y mantiene trazabilidad entre entradas del proyecto, configuración de servicios, topología de enlaces y recomendaciones obtenidas.

Para asegurar consistencia en la interfaz durante sesiones extensas, se incorporó un mecanismo de invalidación selectiva de caché por proyecto. Con ello, los resultados presentados al usuario se mantienen sincronizados con la información persistida, evitando la visualización de estados desactualizados.

4.5.6. Generación del reporte ejecutivo

El módulo *Reporte Ejecutivo* genera un documento PDF que consolida resultados y supuestos del análisis en un formato orientado a revisión de ingeniería. El reporte incluye la recomendación por grupo de servicio y el ranking de alternativas factibles, junto con el listado de descartes y su causalidad. Adicionalmente, integra la topología definida y un detalle por enlace que resume

distancia, condición geométrica y desglose de pérdidas consideradas en el presupuesto de enlace, además de los márgenes obtenidos y las hipótesis de cálculo utilizadas.

Los metadatos de portada se registran como parte de la información del proyecto, lo que permite mantener coherencia entre sesiones y asegurar que el documento resultante sea trazable al caso evaluado.

4.5.7. Fichas técnicas y administración del catálogo de tecnologías

El sistema incluye un módulo de consulta de fichas técnicas y un módulo de administración del catálogo de tecnologías. La vista de fichas técnicas permite revisar parámetros relevantes por tecnología y efectuar comparaciones visuales, facilitando el análisis cualitativo previo o posterior a la evaluación. Por su parte, la administración del catálogo permite incorporar y actualizar tecnologías mediante carga de archivos estructurados, manteniendo el catálogo desacoplado de los proyectos y habilitando su evolución sin comprometer la integridad de análisis previos. El catálogo base se inicializó con un conjunto acotado de tecnologías representativas de distintas familias inalámbricas, consistente con la caracterización presentada en el Capítulo 3.

Capítulo 5

Caso de estudio

En aplicaciones industriales, los sistemas IIoT se emplean para instrumentar variables de proceso o de condición en puntos donde el cableado resulta costoso o poco flexible, habilitar telemetría continua y generar alarmas oportunas para operación y mantenimiento. En la práctica, esta necesidad se materializa en servicios como monitoreo y telemetría, alarmas de seguridad y monitoreo de integridad de activos, los cuales se observan de forma recurrente en casos reportados de implementación industrial, incluyendo detección de gases, monitoreo de trampas de vapor, medición de nivel en tanques y monitoreo de corrosión o condición de equipos [71].

Con el propósito de ilustrar los pasos del procedimiento de selección descrito en el Capítulo 3, se presenta a continuación un caso de estudio basado en antecedentes de ingeniería de un proyecto real desarrollado por Hatch. Este caso permite aplicar la metodología sobre un escenario representativo, utilizando datos de contexto, servicios, inventario y topología de enlaces, y constituye además una validación preliminar del procedimiento al contrastar los resultados obtenidos con criterios y decisiones de ingeniería previamente utilizados en el proyecto.

5.1. Levantamiento de requerimientos del proyecto

En esta sección se aplica la estructura definida en la Sección 3.1 al caso de estudio. El objetivo es consolidar, en un formato trazable, la información mínima requerida para ejecutar la evaluación de conectividad, incluyendo antecedentes del proyecto, caracterización del entorno y registro del inventario con distribución espacial. Esta información constituye la base para parametrizar el presupuesto de enlace y para definir umbrales de servicio verificables, tal como se establece en el Capítulo 3.

5.1.1. Información del proyecto

El proyecto corresponde a una extensión de botadero de ripios con requerimientos de monitoreo geotécnico–ambiental. En términos funcionales, el propósito del sistema es disponer mediciones distribuidas asociadas al estado del suelo, de manera que puedan ser recopiladas y transferidas hacia la plataforma de monitoreo del cliente. Por confidencialidad, no se reporta la ubicación específica de la faena ni la identidad del mandante; en adelante se utiliza únicamente el término *cliente*.

Desde el punto de vista de la metodología, el caso se formula como un sistema de monitoreo que opera predominantemente en régimen ascendente, donde los datos de campo se concentran

hacia un punto de agregación. Por ello, se clasifica dentro del servicio *Monitoreo/Telemetría*, asociado al perfil *Telemetría*, de acuerdo con la definición de perfiles establecida en el Capítulo 3. La Tabla 5.1 resume los antecedentes mínimos del proyecto utilizados como entrada del análisis.

Tabla 5.1: Antecedentes mínimos del proyecto utilizados como entrada del caso de estudio.

Campo	Descripción
Tipo de proyecto	Extensión de botadero de ripios.
Propósito del sistema	Monitoreo geotécnico–ambiental con adquisición distribuida y concentración de datos.
Servicio	Monitoreo/Telemetría.
Topología de referencia	Estrella, con concentración hacia un nodo de agregación.
Restricción de confidencialidad	Se omite ubicación específica y nombre del cliente.

5.1.2. Caracterización del entorno

Las condiciones ambientales del sitio se incorporan como condiciones de borde del despliegue y como penalizaciones explícitas en el presupuesto de enlace, de acuerdo con lo descrito en la Sección 3.1.2. En particular, se considera el rango de temperatura, el escenario de polvo o arena, la humedad relativa y el nivel de interferencia electromagnética. Estos parámetros se utilizan para mantener consistencia entre el levantamiento del entorno y el cálculo radioeléctrico aplicado en el filtro de factibilidad.

El documento de condiciones del sitio registró un rango de temperaturas mediante los valores $T_{\min} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $T_{\max} = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$, tratados como verificación de compatibilidad del equipamiento. En cuanto al material particulado, se documentó un escenario de polvo alto, utilizando una visibilidad del orden de $V \approx 10\text{ m}$. La humedad relativa se fijó en un nivel medio, aproximadamente $RH \sim 40\%$, y se utilizó como covariable del escenario ambiental para parametrizar la atenuación específica asociada al material particulado, obteniéndose un valor de 0.119 dB/km para una frecuencia (por defecto) de 2.4 GHz , de acuerdo con la estimación desarrollada en el Anexo D. Finalmente, el nivel de interferencia electromagnética se consideró medio y se representó mediante una penalización fija de 3 dB sobre el margen de enlace. La Figura 5.1 muestra la configuración de la caracterización del entorno relacionada al caso base, ocultando la ubicación de la mina por motivos de confidencialidad.

5.1.3. Inventario de dispositivos y distribución espacial

El inventario de dispositivos se registró siguiendo la estructura descrita en la Sección 3.1.3. Para el caso se definieron cinco nodos de adquisición de datos en terreno, todos asociados al servicio *Monitoreo/Telemetría* y alimentados por batería, además de un nodo de agregación configurado como *gateway/punto de acceso*, alimentado por red. Cada nodo se identificó mediante un TAG y se asoció a coordenadas geográficas, lo que permite derivar distancias y definir enlaces para el análisis radioeléctrico.

1. Contexto del Proyecto

Seleccionar Proyecto
 Proyecto Botadero RDC

Nombre del Proyecto: Proyecto Botadero RDC Aplicación de servicio: Botadero de rípios

Ubicación Mina: [dropdown] T° Mínima (°C): 0,00 T° Máxima (°C): 33,00

Latitud (decimal): [input] Nivel de Polvo (Visibilidad): Alto (V ≈ 10m) Interferencia (EMI): Medio (Margen 3 dB)

Longitud (decimal): [input] Humedad Relativa (RH): Media (40%)

Atenuación por polvo/RH @ 2.4 GHz: 0.119 dB/km

Figura 5.1: Contextualización del caso base en la aplicación.

En términos instrumentales, el sistema se orienta al monitoreo geotécnico–ambiental mediante dos tipos de medición. En primer lugar, se incorporan puntos de medición de *nivel freático* mediante piezometría. En segundo lugar, se consideran puntos multivariable para caracterización de condición del suelo, incorporando mediciones de *pH* y *conductividad*, junto con nivel freático. Estas variables se transmiten con periodicidad de registro compatible con un servicio de telemetría, donde prima la operación sostenida y la trazabilidad temporal de datos por sobre requerimientos de latencia estrictos.

A nivel de arquitectura, la solución se concibe como una cadena de adquisición y concentración de datos, donde los *dataloggers* en terreno transmiten hacia un nodo de agregación y, desde allí, la información se integra a la red IT/OT del cliente y a la plataforma de monitoreo. La Figura 5.2 resume el esquema propuesto en la etapa inicial del proyecto, basado en LoRaWAN.

La topología de referencia corresponde a una arquitectura tipo estrella, donde los nodos de adquisición se conectan directamente con el nodo de agregación. La Tabla 5.2 resume el inventario utilizado en el caso, incorporando el tipo de medición asociada a cada nodo, además de rol funcional, tipo de alimentación y servicio.

Tabla 5.2: Inventario de dispositivos del caso de estudio y atributos relevantes para el análisis.

Nodo	TAG	Tipo	Descripción	Alimentación	Servicio
1	010-PR-01	Datalogger	Registrador de Nivel freático	Batería	Telemetría
2	010-PR-02	Datalogger	Registrador de Nivel Freático	Batería	Telemetría
3	010-PR-03	Datalogger	Reg. NF, pH y conductividad	Batería	Telemetría
4	010-PR-04	Datalogger	Reg. NF, pH y conductividad	Batería	Telemetría
5	010-PR-05	Datalogger	Reg. NF, pH y conductividad	Batería	Telemetría
6	010-GW-01	Gateway/AP	Puerta de enlace Backbone cliente	Red	Telemetría

La distribución espacial se formaliza mediante la definición de enlaces entre cada nodo de campo y el nodo de agregación, de modo que el presupuesto de enlace se evalúe sobre distancias

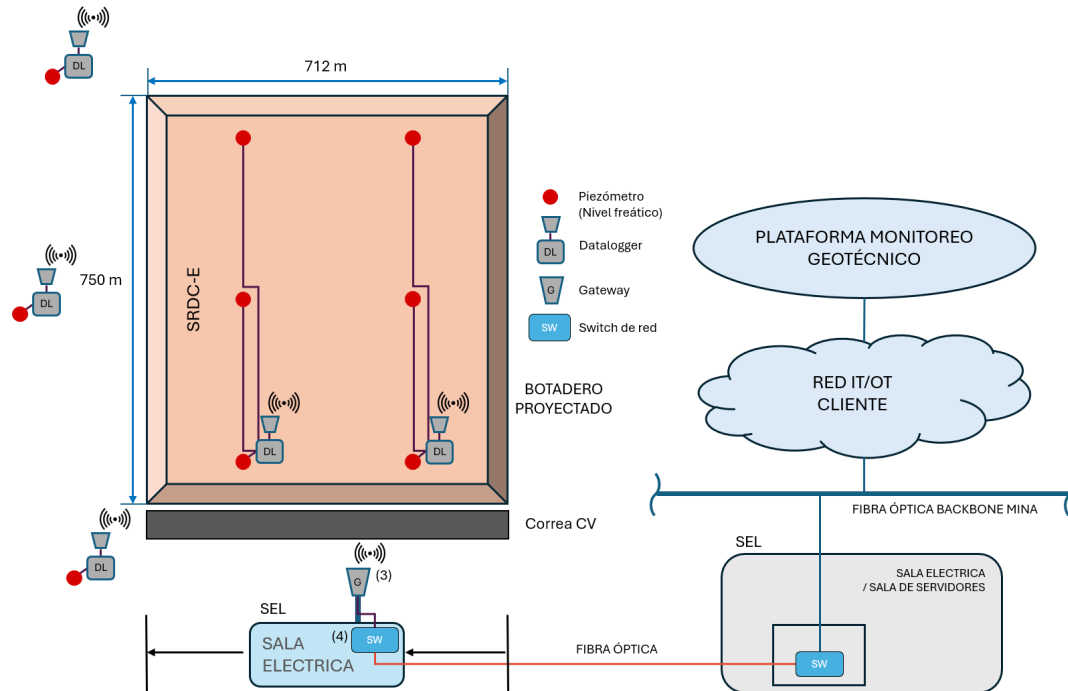


Figura 5.2: Arquitectura del caso de estudio y propuesta inicial de conectividad basada en LoRaWAN. Fuente: elaboración propia a partir del caso.

reales. La Figura 5.3 presenta el mapa del caso con la topología resultante y la clasificación geométrica de enlaces, mientras que la Tabla 5.3 resume distancias y condición de línea de vista asociada.

En el mapa, LOS indica línea de vista despejada (enlace en verde), LOS* corresponde a línea de vista con obstrucción parcial de Fresnel (enlace en naranja) y NLOS indica ausencia de línea de vista (enlace en rojo).

Tabla 5.3: Enlaces definidos en la topología del caso y caracterización geométrica.

Enlace	Condición geométrica	Distancia (m)
1-6	LOS	241
2-6	LOS*	490
3-6	LOS*	92
4-6	LOS*	316
5-6	LOS*	811

En particular, el enlace 5-6 corresponde al enlace de mayor distancia y se utiliza como referencia para ejemplificar el análisis geométrico de un enlace crítico. La Figura 5.4 presenta el perfil de elevación y el criterio de despeje de la primera zona de Fresnel aplicado a dicho enlace, considerando la frecuencia de evaluación y las alturas de instalación configuradas. Notar que se sugiere aumentar la altura de las antenas en 4 metros para condición LOS sin obstrucción en la primera zona de Fresnel.

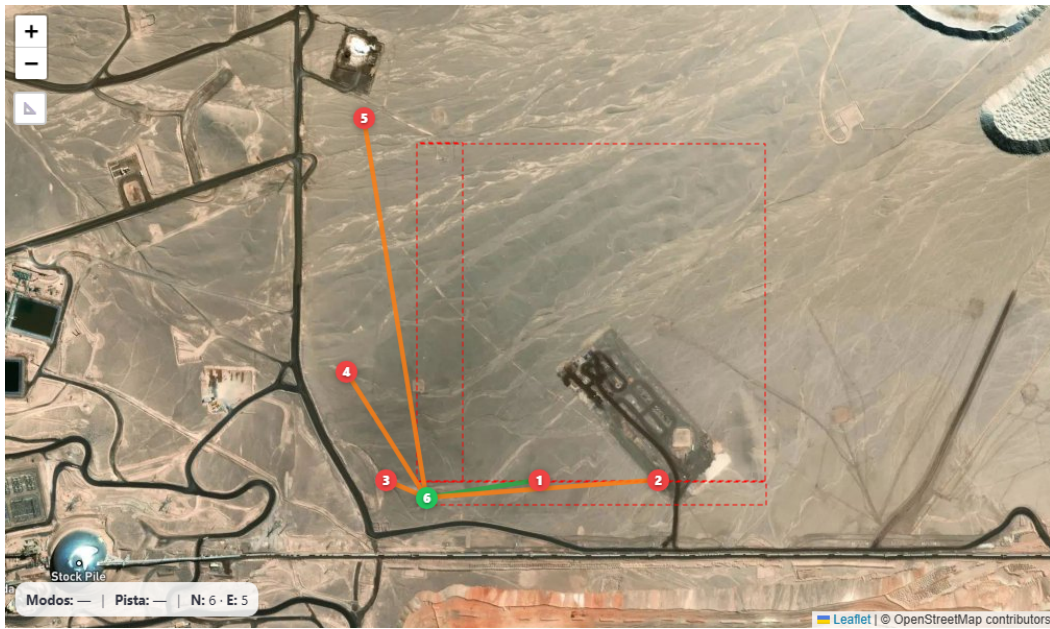


Figura 5.3: Topología del caso de estudio sobre mapa y enlaces definidos hacia el nodo de agregación. Fuente: aplicación web desarrollada, módulo 3.



Figura 5.4: Perfil de elevación y verificación de despeje geométrico para el enlace crítico 5-6. Fuente: aplicación web desarrollada, módulo 3.

5.2. Aplicación de los criterios de selección tecnológica

En esta sección se aplica el procedimiento de la Sección 3.2 al caso de estudio. La evaluación se organiza en dos etapas: (i) un filtro de factibilidad basado en restricciones duras, orientado a descartar alternativas que no cumplen los requerimientos mínimos del servicio bajo las condiciones del sitio; y (ii) una comparación multicriterio ponderada entre las tecnologías factibles, utilizando criterios blandos para priorizar alternativas según compromisos de desempeño e implementación.

5.2.1. Parámetros técnicos utilizados en la evaluación

La evaluación requiere un conjunto mínimo de parámetros por tecnología, obtenibles desde estándares, fichas técnicas y revisiones técnicas, tal como se estableció en la Sección 3.2.1. Para el caso se consideran parámetros de desempeño de comunicación (tasa máxima de datos R_{\max} y latencia típica τ), parámetros radioeléctricos (banda de operación, potencia máxima de transmisión P_{TX} y sensibilidad de recepción S_{RX}), y la topología soportada como propiedad de factibilidad funcional. Adicionalmente, se incorporaron atributos cualitativos asociados a confiabilidad/disponibilidad, consumo energético y costo de implementación.

Los umbrales mínimos del servicio de *Monitoreo/Telemetría* se derivan de la parametrización impuesta por el ingeniero. El tamaño de mensaje considerado fue $L = 1\ 280$ bits, correspondiente a una carga útil de 80 bytes con 100 % de overhead. El período de reporte se fijó en 1 h, lo que determina una tasa promedio $R_{\text{prom}} = 0,355\ 6$ bps. Para un dimensionamiento conservador de capacidad se utiliza la tasa pico $R_{\text{pico}} = 512$ bps (aprox. 0.5 kbps) como referencia del ancho de banda requerido R_{req} en la verificación de la ecuación (3.5). La latencia máxima admisible se fijó como $\tau_{\text{req}} = 5$ s, utilizada en la verificación de la ecuación (3.6) y como referencia de holgura en el puntaje definido por la ecuación (3.13). La configuración de estos requerimientos por servicio se puede observar en la Figura A.6 del Anexo A.

5.2.2. Restricciones duras: filtro de factibilidad

El filtro de factibilidad se aplicó siguiendo la Sección 3.2.2. Dado que el perfil de servicio es *Telemetría*, las restricciones de capacidad y latencia se interpretan como umbrales mínimos; la cobertura se evalúa mediante presupuesto de enlace en todos los enlaces definidos hacia el nodo de agregación; y, debido a la presencia de nodos alimentados por batería, se activa la restricción condicional de compatibilidad energética descrita en la Sección 3.2.2. En este caso, la topología operacional considerada es estrella, por lo que la conectividad se verifica mediante enlaces directos entre los nodos de campo y el nodo de agregación.

Compatibilidad de capacidad y latencia del servicio

La factibilidad por desempeño del servicio se verificó mediante dos condiciones. Primero, se exige que la capacidad máxima de la tecnología sea suficiente para satisfacer el ancho de banda

mínimo del servicio, conforme a la desigualdad de la ecuación (3.5). Segundo, se requiere que la latencia típica de la tecnología no exceda la latencia máxima admisible del servicio, conforme a la ecuación (3.6). Dado el carácter de telemetría del caso, ambas verificaciones actúan como condiciones necesarias de compatibilidad, sin requerimientos estrictos del orden de control regulatorio.

Compatibilidad energética

Debido a la presencia de nodos alimentados por batería en el inventario, se aplicó el filtro condicional definido en la Sección 3.2.2, descartando aquellas tecnologías clasificadas con consumo energético *alto* bajo condiciones representativas de operación. Esta restricción busca asegurar operación sostenida y reducir la carga de mantenimiento asociada a recambios frecuentes en terreno.

Factibilidad radioeléctrica mediante presupuesto de enlace

La factibilidad radioeléctrica se evalúa mediante presupuesto de enlace sobre todos los enlaces definidos en la topología del caso, de acuerdo con la Sección 3.2.2. Para cada tecnología se calculó la potencia recibida y el margen de enlace según las ecuaciones (3.7) y (3.8), utilizando el modelo de pérdidas de gran escala de la ecuación (3.9) y el exponente de pérdida asociado a la condición geométrica del enlace. La condición de factibilidad exige el cumplimiento de la ecuación (3.11) en cada enlace evaluado.

En el caso se adoptó un margen objetivo $M_{obj} = 8$ dB, el cual representa la holgura mínima exigida para absorber variaciones de instalación y degradaciones no modeladas. En enlaces clasificados como LOS* se incorporó una penalización adicional de 6 dB. Adicionalmente, se incluyó la penalización por interferencia electromagnética de 3 dB y la pérdida por polvo/arena parametrizada con el escenario ambiental definido en la Sección 5.1.2. La configuración de estos parámetros de evaluación y del presupuesto de enlace en la aplicación se realiza mediante el panel mostrado en la Figura A.12 del Anexo A.

Resultado del filtro de factibilidad

Como resultado del filtro de factibilidad, se descartaron ocho tecnologías de un total de once candidatas del catálogo. El motivo dominante de descarte correspondió a cobertura insuficiente, manifestada como margen mínimo bajo el umbral M_{obj} en al menos un enlace. En un subconjunto de tecnologías, el descarte se justificó adicionalmente por incompatibilidad energética debido a la presencia de nodos a batería. La Tabla 5.4 resume las tecnologías descartadas, su causalidad y el margen mínimo obtenido en el peor enlace para cada alternativa.

Tabla 5.4: Tecnologías descartadas por restricciones duras y causalidad de descarte.

Tecnología	Motivo de descarte	Margen mín. (dB)
RFID (activo/pasivo)	Cobertura: margen insuficiente	-10.7
Bluetooth / BLE 5.x	Cobertura: margen insuficiente	-26.0
Zigbee (IEEE 802.15.4)	Cobertura: margen insuficiente	-6.3
Wi-Fi (802.11ac/ax/ah)	Cobertura: margen insuficiente; consumo energético incompatible	-3.1
5G (NR)	Cobertura: margen insuficiente; consumo energético incompatible	0.2
4G/LTE (Cat-4+)	Cobertura: margen insuficiente; consumo energético incompatible	-10.4
WirelessHART (IEC 62591)	Cobertura: margen insuficiente	-17.7
ISA100.11a	Cobertura: margen insuficiente	-15.7

5.2.3. Evaluación ponderada de candidatas

Las tecnologías que superaron el filtro de factibilidad se compararon mediante la evaluación ponderada definida en la Sección 3.2.3. En este caso, las candidatas factibles fueron LoRa/LoRaWAN, NB-IoT y LTE-M, como se observa en la Figura A.13 del Anexo A.. La ponderación se asignó de acuerdo con el perfil de *Telemetría*, priorizando consumo energético y robustez de enlace por sobre latencia estricta.

Cobertura: robustez del margen del peor enlace

Para cada candidata se calculó el margen de enlace en todos los enlaces de la topología y se definió M_{\min} como el margen del peor enlace. La cobertura se evaluó como robustez del margen disponible sobre el margen objetivo, de acuerdo con la ecuación (3.12). En este caso, LoRa/LoRaWAN obtuvo $M_{\min} = 37,7$ dB, NB-IoT obtuvo $M_{\min} = 32,9$ dB y LTE-M obtuvo $M_{\min} = 14,6$ dB, evidenciando que las tecnologías sub-GHz entregan mayor holgura en el peor enlace bajo las condiciones del caso.

Latencia: holgura temporal respecto del máximo admisible

La latencia se evaluó mediante la relación entre el máximo admisible del servicio y la latencia típica de cada tecnología, utilizando la ecuación (3.13). En el perfil de *Telemetría*, este criterio recibe un peso reducido y actúa principalmente como factor de diferenciación secundaria entre tecnologías que ya cumplen el umbral de factibilidad.

Capacidad: holgura de tasa con escala logarítmica

La capacidad se evaluó como holgura respecto del ancho de banda mínimo del servicio, utilizando la ecuación (3.14). La escala logarítmica evita que tecnologías de muy alta capacidad

saturen el puntaje sin aportar proporcionalmente al servicio evaluado.

Confiabilidad, consumo energético y costo

Los criterios cualitativos se mapearon a puntajes normalizados de acuerdo con las ecuaciones (3.15), (3.16) y (3.17). En particular, el consumo energético adquiere relevancia en este caso por la presencia de nodos a batería y por el perfil de *Telemetría* que asigna alta ponderación a dicho criterio.

5.2.4. Agregación ponderada por perfil de servicio

La agregación multicriterio se realiza mediante la suma ponderada definida en la ecuación (3.18). Para el caso se utilizó el perfil de ponderación representativo para el servicio *Monitoreo/Telemetría*, donde el consumo energético y la robustez de enlace reciben las mayores ponderaciones. La Tabla 5.5 presenta el ranking resultante, incluyendo el puntaje global y el margen mínimo asociado al peor enlace.

Tabla 5.5: Ranking de tecnologías factibles para el servicio Monitoreo/Telemetría.

Tecnología	Topología	Frecuencia	Score	Margen mín. (dB)
LoRa / LoRaWAN	Estrella	915 MHz	8.8	37.7
NB-IoT (3GPP Rel-13)	Estrella	900 MHz	7.3	32.9
LTE-M (Cat-M1)	Celular	2.6 GHz	6.5	14.6

5.2.5. Salida del proceso y trazabilidad

La salida del proceso se expresa como un ranking de tecnologías factibles y un registro de descartes con causalidad, conforme a la Sección 3.2.5. En el caso de estudio, la tecnología recomendada para el perfil *Logging y Telemetría* fue LoRa/LoRaWAN, sustentada por el cumplimiento de factibilidad radioeléctrica en todos los enlaces y por su desempeño relativo en los criterios priorizados por el perfil de servicio, particularmente consumo energético y robustez del margen en el peor enlace. La Tabla 5.4 y la Tabla 5.5 consolidan la trazabilidad del resultado al explicitar qué alternativas se descartaron, su causalidad, y el ranking final entre las candidatas factibles.

5.3. Dimensionamiento del sistema para el caso de estudio

Esta sección aplica el procedimiento de dimensionamiento definido en la Sección 3.3 al caso de estudio. El propósito es traducir la tecnología recomendada y el servicio en una arquitectura de conectividad coherente, junto con parámetros de instalación y verificaciones radioeléctricas sobre los enlaces críticos. Dado que el caso se formuló bajo un servicio de *Monitoreo/Telemetría* y una topología de referencia tipo estrella, el dimensionamiento se centra en la asignación de

roles y en la verificación del margen por enlace hacia el nodo de agregación, reportando como indicador global el margen mínimo entre enlaces.

5.3.1. Arquitectura por servicio

El servicio asociado al caso corresponde a *Monitoreo/Telemetría*, por lo que la arquitectura se organiza como una red de adquisición distribuida con concentración de datos en un punto de agregación. En este contexto, la solución recomendada en la Sección 5.2 se implementa como un acceso inalámbrico de baja tasa con transmisión periódica, donde los nodos de campo operan como dispositivos finales y el nodo de agregación actúa como interfaz de concentración. Esta organización es consistente con el patrón estrella típico de telemetría, evitando complejidad de ruteo y reduciendo la verificación de conectividad a enlaces directos hacia el nodo de agregación.

5.3.2. Asignación de roles de red y definición de conectividad

La asignación de roles se definió de acuerdo con el inventario de la Tabla 5.2. Los nodos 1 a 5 se consideran nodos de adquisición de datos que operan como dispositivos finales, responsables de muestreo, registro y transmisión de mediciones del terreno. El nodo 6 se define como el punto de agregación de la red, actuando como pasarela de acceso y concentrador lógico del tráfico. La conectividad se establece mediante enlaces directos desde cada nodo de adquisición hacia el nodo 6, conforme a la topología estrella descrita en la Tabla 5.3.

5.3.3. Parámetros de instalación para el análisis de enlaces

Para el análisis de enlaces se adoptaron parámetros de instalación y de cálculo coherentes con el caso. La evaluación geométrica se realizó considerando alturas de instalación de antena de 4 m para el nodo 5 y de 4 m para el nodo 6 en el enlace de referencia, junto con una frecuencia de 915 MHz utilizada para el estudio del perfil del enlace más largo. Estos parámetros sustentan la clasificación LOS/LOS* de los enlaces y determinan la aplicación de penalizaciones asociadas a obstrucción parcial de la primera zona de Fresnel.

En el presupuesto de enlace se mantuvieron los valores utilizados en la etapa de selección: margen objetivo $M_{obj} = 8$ dB, penalización LOS* de 6 dB y penalización por interferencia electromagnética de 3 dB. Para el modelo log-distance se emplearon los exponentes $n_{LOS} = 2,5$ y $n_{NLOS} = 4,0$. Mantener consistencia de parámetros entre selección y dimensionamiento permite que la verificación radioeléctrica sea trazable respecto de los supuestos del Capítulo 3.

5.3.4. Verificación radioeléctrica de enlaces y margen mínimo

La verificación radioeléctrica se efectuó sobre los enlaces definidos en la Tabla 5.3 mediante cálculo de margen por enlace y comparación con el umbral de factibilidad. El desempeño global del dimensionamiento se resume en el margen mínimo M_{min} , definido como el peor margen entre los enlaces evaluados.

En este caso, el enlace 5–6 corresponde al enlace de mayor distancia y se adopta como enlace crítico. La Figura 5.4 presenta la verificación geométrica del despeje, que justifica la clasificación LOS* y, por consiguiente, la aplicación de la penalización asociada. Aun bajo esta condición, la tecnología recomendada mantiene un margen mínimo $M_{\min} = 37,7$ dB, valor que supera el umbral $M_{\text{obj}} = 8$ dB. Esta holgura entrega margen operativo frente a variaciones de instalación y degradaciones no modeladas, y es consistente con la robustez observada en la etapa de selección.

5.3.5. Entregables del dimensionamiento

El dimensionamiento del caso se consolida en entregables que permiten trazabilidad entre inventario, topología y verificación de enlaces. El inventario de dispositivos y su rol se resume en la Tabla 5.2. La topología georreferenciada y la clasificación geométrica de enlaces se presentan en la Figura 5.3 y en la Tabla 5.3. La verificación geométrica del enlace crítico se presenta en la Figura 5.4. Finalmente, la factibilidad radioeléctrica y el margen mínimo M_{\min} asociado a la tecnología recomendada se reportan como resultado de la verificación de enlaces, constituyendo el insumo principal para la decisión de implementación discutida en la sección siguiente.

5.4. Comparación de alternativas y decisión de implementación

Esta sección consolida los resultados del caso de estudio y discute la decisión de implementación, distinguiendo entre el resultado del procedimiento cuantitativo y consideraciones de ingeniería que pueden condicionar la selección final.

5.4.1. Consolidación de resultados por perfil de servicio

Dado que el caso se formuló bajo el perfil de servicio *Telemetría*, la comparación se resume en el ranking de la Tabla 5.5 y en el registro de descartes de la Tabla 5.4. En este perfil, LoRa/LoRaWAN obtiene el mayor *Score*, seguido por NB-IoT y LTE-M. La diferencia entre alternativas se explica principalmente por la mayor reserva radioeléctrica del peor enlace, capturada por M_{\min} , y por el desempeño relativo en consumo energético, criterio priorizado en la ponderación utilizada.

En particular, la holgura disponible en LoRa/LoRaWAN en el enlace crítico 5–6 se traduce en un mejor desempeño del criterio de cobertura y, por consiguiente, en una ventaja en el puntaje agregado frente a las otras candidatas factibles.

5.4.2. Criterios complementarios a la evaluación cuantitativa

En la práctica, la selección de conectividad puede verse condicionada por factores no incluidos explícitamente en el modelo, como políticas de seguridad y gobernanza de datos, disponibilidad de infraestructura existente y criterios internos de estandarización y operación. En el caso analizado, se registró que el cliente adoptó LTE, asociado a consideraciones de operación y confianza en

la infraestructura disponible. Este resultado se incorpora como contraste respecto del ranking obtenido, sin interpretarse como una invalidación del procedimiento, sino como una decisión basada en restricciones y preferencias externas al modelo cuantitativo.

5.4.3. Selección final y alternativas de respaldo

Con base en el ranking consolidado, la alternativa recomendada por la metodología para el servicio *Monitoreo/Telemetría* es LoRa/LoRaWAN. Como alternativa de respaldo, NB-IoT se mantiene como candidata viable en el caso, con un *Score* inferior pero con holguras relevantes respecto del umbral de diseño. LTE-M, aun siendo factible, presenta una reserva menor en el peor enlace, lo que reduce margen operativo ante cambios del entorno o desviaciones de instalación y explica su posición relativa.

En una primera instancia, el levantamiento y la definición del caso se sustentaron en una solución de ingeniería orientada a evaluar una alternativa basada en LoRaWAN para el sistema de monitoreo definido. En consecuencia, la aplicación del procedimiento al caso de estudio constituye una evaluación coherente con ese marco de trabajo y con los antecedentes disponibles durante la etapa de análisis.

Finalmente, cuando existe infraestructura LTE preexistente y el cliente privilegia esa opción por estandarización y confianza operacional, LTE puede transformarse en la alternativa de implementación. En el caso, el cliente reportó contar con cobertura asegurada a través de su red LTE y una arquitectura de integración ya disponible, lo que se ilustra conceptualmente en la Figura 5.5. Sin embargo, esta alternativa no se reevaluó con el mismo nivel de detalle geométrico aplicado al resto de tecnologías, debido a que no se dispone de la ubicación ni de los parámetros de instalación de la infraestructura LTE existente, información necesaria para reconstruir enlaces y calcular márgenes de forma comparable. En este escenario, el procedimiento aporta al explicitar la brecha de desempeño radioeléctrico y energético entre alternativas evaluadas, y al documentar las hipótesis y restricciones que sustentan la recomendación obtenida.

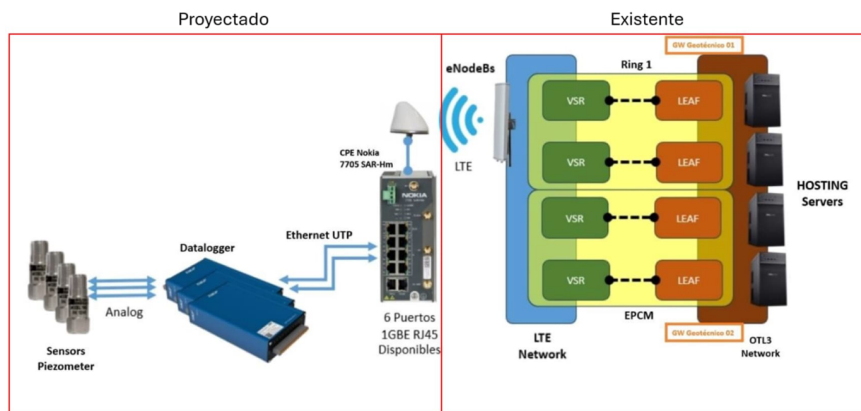


Figura 5.5: Esquema referencial de arquitectura LTE existente reportada por el cliente para integración del sistema de monitoreo. Fuente: documentación provista para el caso de estudio.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Propuesta de valor

La propuesta de valor de este trabajo se materializa en la combinación de una metodología formal de selección y dimensionamiento de tecnologías IIoT para minería, junto con una aplicación web que permite aplicarla de forma consistente, trazable y reproducible. En términos prácticos, el aporte central es transformar un proceso que suele ejecutarse de manera heterogénea, apoyado en experiencia y en revisiones no sistematizadas de fichas técnicas, en un flujo estructurado que separa la verificación de factibilidad de la priorización entre alternativas. Esta separación reduce ambigüedades al justificar decisiones, ya que evita recomendar una tecnología por buen desempeño relativo si no cumple condiciones necesarias de operación en el sitio.

En relación con el estado del arte revisado en esta memoria, el aporte se formula como respuesta a una brecha práctica: las herramientas disponibles tienden a concentrarse en la planificación y validación *una vez* que la familia tecnológica ya fue definida. En particular, predominan plataformas especializadas (frecuentemente comerciales y de alto costo) orientadas a redes celulares, LTE/5G o Wi-Fi, junto con calculadoras y estimadores provistos por fabricantes para ecosistemas específicos. Si bien estos recursos aportan precisión en etapas acotadas (por ejemplo, cobertura, capacidad o restricciones de configuración), no entregan un marco integrado que permita comparar de forma homogénea, en un mismo flujo de decisión, alternativas pertenecientes a familias distintas, incluyendo estándares de instrumentación inalámbrica industrial como WirelessHART e ISA100.11a junto con tecnologías LPWAN y celulares. En este contexto, el valor del trabajo radica en proponer un procedimiento transversal y auditable que unifica criterios, supuestos y verificaciones, habilitando comparaciones consistentes entre familias tecnológicas bajo un mismo servicio y condiciones de sitio.

A partir de lo anterior, el aporte se concentra en tres dimensiones. Primero, se establece un puente explícito entre servicios industriales y requerimientos de comunicación verificables, de modo que la clasificación por criticidad se traduzca en umbrales y ponderaciones aplicables a la comparación de tecnologías. Segundo, se incorpora la verificación radioeléctrica mediante presupuesto de enlace como condición de factibilidad, integrando pérdidas de propagación y penalizaciones ambientales en una formulación operativa orientada a entornos mineros. Tercero, se enfatiza la trazabilidad del proceso al registrar de forma explícita supuestos, parámetros y causalidad de descarte, de manera que el resultado sea auditable y reutilizable en iteraciones de ingeniería.

La herramienta desarrollada contribuye además a estandarizar la captura de información del proyecto, a consolidar parámetros técnicos en un catálogo y a generar entregables de soporte para ingeniería, incluyendo trazabilidad de supuestos, restricciones aplicadas, causas de descarte y ranking final por grupo de servicio. Bajo el alcance de esta memoria, la aplicación integra el levantamiento de requerimientos, el análisis radioeléctrico mediante presupuesto de enlace y la evaluación multicriterio ponderada, permitiendo documentar el proceso completo de forma coherente con la metodología presentada.

6.2. Cumplimiento de objetivos

El objetivo general de desarrollar una aplicación web que apoye la selección de tecnologías basadas en IIoT para el sector minero, con el propósito de facilitar y estandarizar el procedimiento mediante el cual Hatch desarrolla este tipo de proyectos, se considera cumplido. La memoria presenta una metodología de selección y dimensionamiento sistemática, y una implementación funcional que permite ejecutarla sobre escenarios definidos, preservando trazabilidad de parámetros y resultados.

En relación con los objetivos específicos, se concluye lo siguiente:

- **OE1.** Se realizó una investigación que define el contexto teórico y normativo asociado a la implementación de tecnologías IIoT en minería. Este trabajo se reflejó en el marco teórico y en la síntesis de estándares y regulaciones aplicables, los cuales sustentan la caracterización de tecnologías, servicios y restricciones relevantes para entornos industriales.
- **OE2.** Se evaluaron tecnologías de comunicación inalámbrica y dispositivos IIoT, identificando su aplicabilidad en distintos entornos mineros y su relación con sistemas de control. Esta evaluación se materializó en la caracterización comparativa de familias tecnológicas, en la estructuración de parámetros radioeléctricos y de desempeño, y en la definición de atributos trazables que permiten comparar alternativas de manera consistente.
- **OE3.** Se estableció un procedimiento y criterios técnicos para la selección y el dimensionamiento de tecnologías IIoT en procesos mineros, basado en la investigación realizada. En particular, se formalizó un flujo metodológico que integra el levantamiento de requerimientos, el filtrado por restricciones duras y la priorización por evaluación ponderada, incorporando verificación radioeléctrica mediante presupuesto de enlace, consistencia topológica y criterios de implementación relevantes para servicios industriales.
- **OE4.** Se desarrolló una base de datos estructurada y una aplicación web que facilitan la elección de tecnologías IIoT de acuerdo con criterios definidos y requerimientos por proyecto. La base de datos permite persistencia de proyectos, entorno, inventario, enlaces y resultados de evaluación, mientras que la aplicación implementa el flujo completo desde captura de entradas hasta generación de reportes, habilitando reutilización y continuidad entre sesiones.

Adicionalmente, con el fin de respaldar la validez de los resultados obtenidos por la plataforma, se realiza además una validación parcial del cálculo de presupuesto de enlace, la cual se presenta a continuación.

6.2.1. Validación parcial de resultados del presupuesto de enlace

La validez de los resultados asociados al presupuesto de enlace depende de la comparabilidad de los supuestos entre la plataforma desarrollada y una herramienta externa de referencia. En la práctica, las plataformas comerciales y las herramientas de fabricantes incorporan parámetros internos, modelos de propagación y criterios de evaluación que no siempre son completamente trazables o equivalentes a los utilizados en una herramienta académica orientada al apoyo de la selección tecnológica. Además, la plataforma desarrollada en este trabajo integra variables adicionales asociadas al contexto minero, tales como condiciones ambientales, criterios de visibilidad del enlace y ponderaciones derivadas del perfil de servicio industrial. Por esta razón, no corresponde plantear una validación integral de toda la plataforma frente a una única herramienta externa, sino una **validación parcial** del núcleo determinista del cálculo de presupuesto de enlace.

Con este propósito, se definió primero un *proyecto ideal* en la aplicación, de manera de igualar, en la mayor medida posible, las condiciones que posteriormente pudieran ser replicadas en plataformas externas. El caso de prueba se construyó con dos nodos y un único enlace georreferenciado en el entorno del rajo de Chuquicamata, considerando una distancia de 2.13 km y un requerimiento de servicio de *Monitoreo/Telemetría*. A partir de la evaluación realizada por la plataforma para ese escenario, la tecnología LoRa resultó ser la alternativa mejor posicionada. En consecuencia, la validación parcial del radioenlace se efectuó sobre dicha tecnología, utilizando sus parámetros característicos para contrastar los resultados obtenidos con herramientas externas de referencia.

En función de ese resultado, el enlace validado se configuró con los parámetros asociados a la alternativa LoRa/LoRaWAN, incluyendo frecuencia de 915 MHz, altura de antena de 4 m en ambos extremos, potencia de transmisión de 20 dBm, sensibilidad de recepción de -137 dBm, ganancias de antena nulas y pérdidas de línea nulas. Adicionalmente, se fijó un escenario equivalente a espacio libre mediante visibilidad *LOS*, exponente de pérdidas $n_{LOS} = 2$ y sin términos adicionales de atenuación. Bajo estas hipótesis, el cálculo de la plataforma se reduce al componente determinista del presupuesto de enlace, permitiendo una comparación directa con herramientas externas que operan con supuestos semejantes.

La geometría del caso de validación definido en la aplicación se muestra en la Figura 6.1. En ella se presenta tanto el enlace trazado entre ambos nodos dentro del área de estudio seleccionada como el detalle de las coordenadas y elevaciones asociadas a cada uno de ellos. Este paso es relevante, ya que establece la base geográfica del proyecto ideal y asegura que la misma geometría pueda ser reproducida posteriormente en las plataformas externas utilizadas para la validación.

Una vez definido el proyecto ideal, se verificó además el perfil de terreno del enlace calculado por la propia aplicación, mostrado en la Figura 6.2. En este perfil se observa que la trayectoria entre nodos no presenta obstrucciones relevantes sobre la línea de vista ni sobre la primera zona

▼ Detalle por enlace (Link Budget) — tecnologías candidatas

Tecnología
LoRa / LoRaWAN

Resumen de resultados

Potencia Tx (dBm)	Sensibilidad Rx (dBm)	Pérd. propagación (dB)	Pérd. total (dB)	Frecuencia (MHz)	Presupuesto de Enlace (dB)	Potencia Rx (dBm)	Margen (dB)
20	-137	98.24	98.24	915	157	-78.24	58.756

Figura 6.3: Resultado del presupuesto de enlace obtenido en la aplicación para el caso de validación.

nominal de enlace de 157 dB.

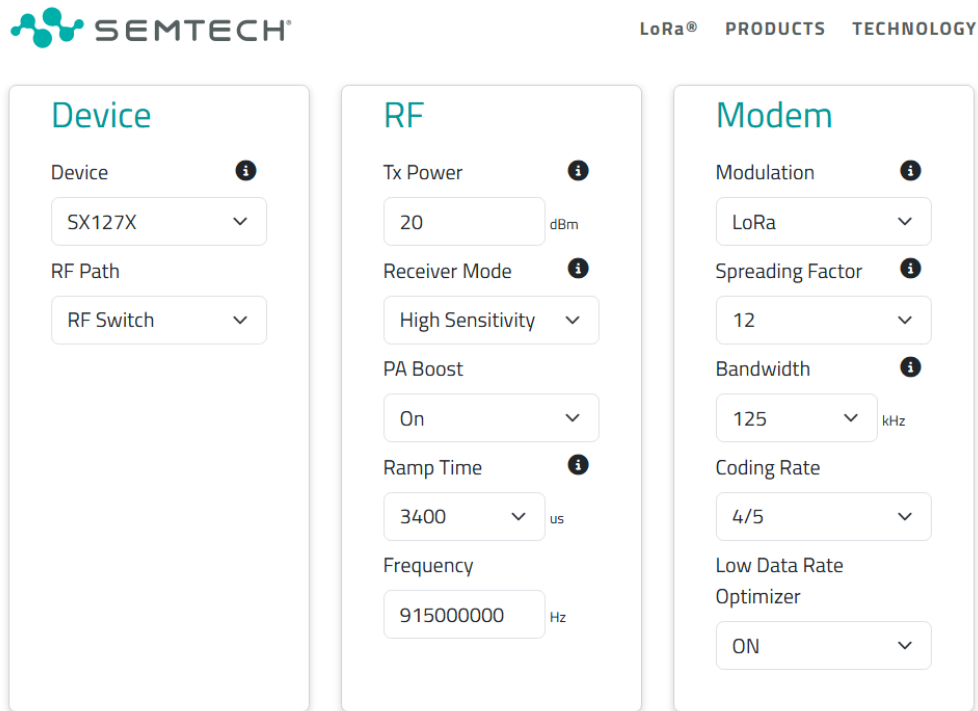


Figura 6.4: Configuración del caso de referencia en la calculadora de Semtech.

La coincidencia exacta entre los valores de sensibilidad y presupuesto nominal obtenidos en Semtech y los utilizados por la aplicación valida la coherencia del núcleo radioeléctrico nominal considerado en el caso de estudio. Esta comparación no pretende validar el catálogo tecnológico por sí mismo, ya que dichos parámetros fueron previamente definidos como entrada según el estudio de tecnología, pero sí verifica que la plataforma desarrolla el cálculo en consistencia con una herramienta oficial del fabricante para ese conjunto de parámetros.

Posteriormente, se replicó el mismo enlace en la plataforma Radio Mobile [73], utilizando la misma geometría entre nodos, frecuencia de 915 MHz, potencia de transmisión de 20 dBm, sensibilidad de -137 dBm, ganancias de antena nulas, pérdidas de línea nulas y altura de antena de 4 m en ambos extremos. La representación espacial del enlace en esta plataforma se muestra en la Figura 6.6, donde se observa la misma trayectoria geográfica definida previamente en la

RF Performance

Radio Consumption: 5.03 uAh

Link Budget: 157.0 dB

Max Crystal Tolerance: 34.2 ppm

Max Crystal Tolerance: 31250.0 Hz

Receiver Sensitivity: -137.0 dBm

Device Tx Consumption: 125000 uA

Device Rx Consumption: 10.8 mA

Figura 6.5: Resultado de sensibilidad y presupuesto nominal de enlace obtenido con la calculadora de Semtech.

aplicación. De este modo, se asegura que la comparación entre ambas herramientas se realice sobre un caso equivalente desde el punto de vista geométrico.

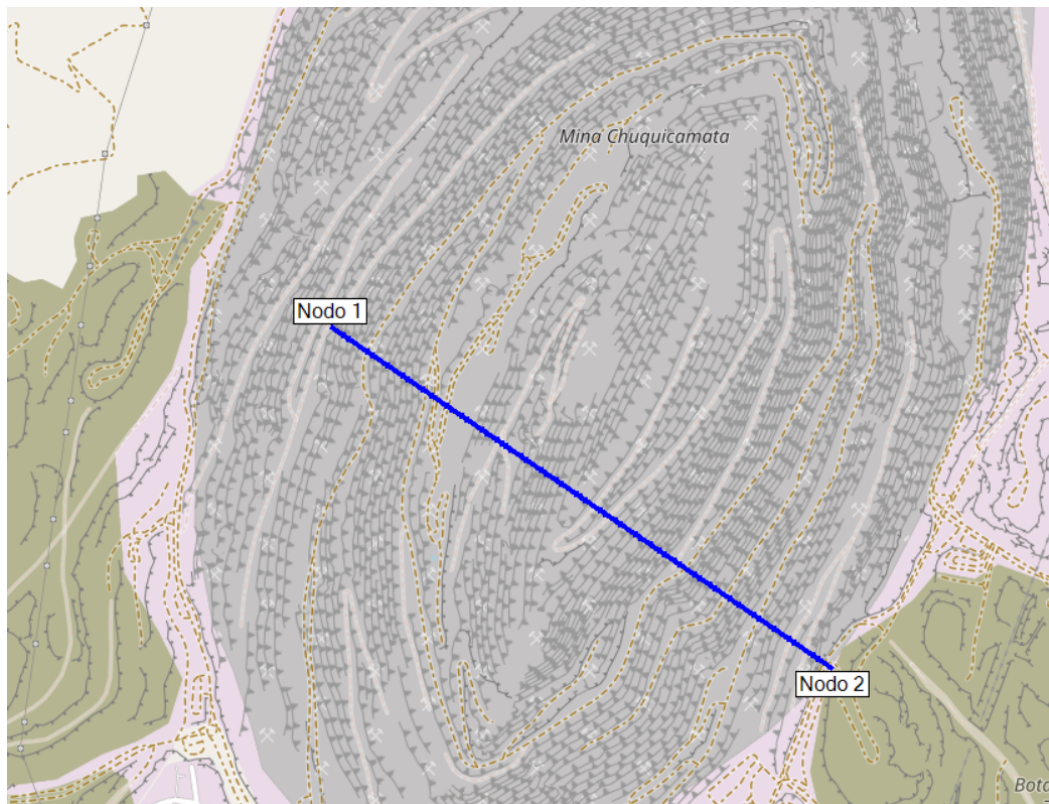


Figura 6.6: Geometría del enlace de validación representada en Radio Mobile.

La configuración del enlace en Radio Mobile se presenta en la Figura 6.7. En esta etapa se ingresaron los mismos parámetros radioeléctricos considerados en la aplicación para el caso ideal, con el fin de contrastar específicamente el componente determinista del presupuesto de enlace bajo condiciones equivalentes.

Como verificación adicional de consistencia geométrica y topográfica, la Figura 6.8 muestra en conjunto la definición de los nodos y el perfil de terreno del enlace obtenido en Radio Mobile. Al igual que en la aplicación, el perfil confirma un caso sin obstrucciones significativas para la trayectoria considerada, por lo que ambas plataformas evalúan un escenario equivalente desde el punto de vista del trazado y de la propagación en espacio libre.

Radio Móvil

Nuevo enlace

Desde: Validación RadioEnlace

De: ▼

Altura de la antena (m sobre el suelo) 13.12 ft

A: ▼

Altura de la antena (m sobre el suelo) 13.12 ft

Descripción:

Frecuencia (MHz):

Potencia Tx(Watts): 20.00 dBm

Pérdida de la línea Tx (dB):

Ganancia de la antena Tx (dBi):

Ganancia de la antena Rx (dBi):

Pérdida de la línea Rx (dB):

Sensibilidad Rx (μ V): -137.00 dBm

Figura 6.7: Parámetros del enlace de validación configurados en Radio Mobile.

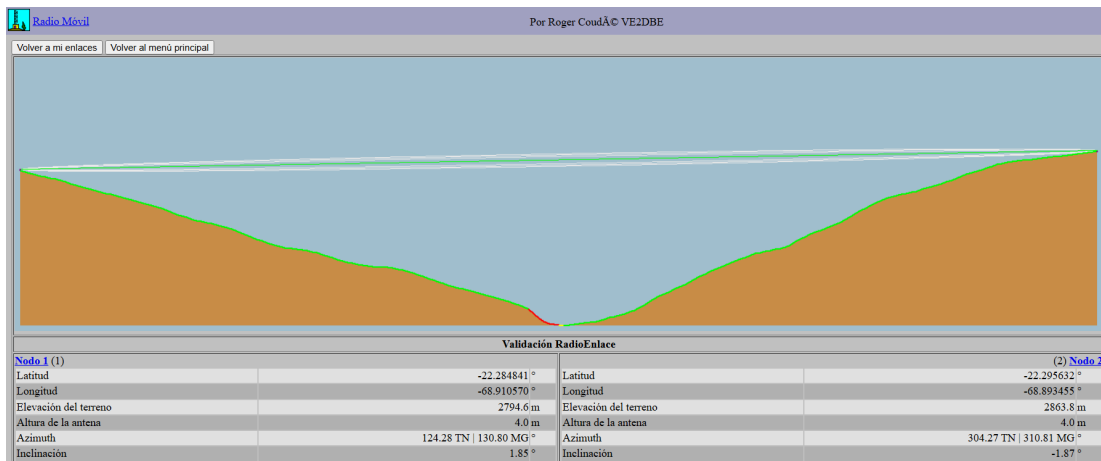


Figura 6.8: Definición de nodos y perfil de terreno del enlace de validación en Radio Mobile.

Bajo estas condiciones, Radio Mobile reportó una pérdida en espacio libre de 98,20 dB y una potencia recibida de $-78,20$ dBm, como se presenta en la Figura 6.9. En comparación con los resultados de la aplicación, las diferencias fueron de solo 0,04 dB en la pérdida de trayecto y 0,04 dB en la potencia recibida, lo que evidencia una coincidencia prácticamente exacta en el cálculo del componente de propagación del enlace idealizado.

Sistema de radio		Propagation	
Potencia TX	20.00 dBm	Pérdida en espacio libre	98.20 dB
Pérdida en cable TX	0.00 dB	Pérdida por obstucción	0.00 dB
Ganancia de antena TX	0.00 dBi	Pérdida por bosque	0.00 dB
Ganancia de antena RX	0.00 dBi	Pérdida por urbanización	0.00 dB
Pérdida en cable RX	0.00 dB	Pérdida estadística	0.00 dB
Sensibilidad RX	-137.00 dBm	Pérdida total	98.20 dB
Performance			
Distancia			2.131 km
Precisión			10.0 m
Frecuencia			915.000 MHz
Potencia de Radiación Isotrópica Equivalente			0.100 W
Ganancia del sistema			153.02 dB
Fiabilidad requerida			50.000 %
Señ recibida			-78.20 dBm
Señ recibida			27.53 μ V
Márgen de escucha			54.82 dB

Figura 6.9: Resultado del enlace de validación obtenido en Radio Mobile.

La comparación global de resultados se resume en la Tabla 6.1. En ella se observa que la coincidencia con Semtech se verifica en la sensibilidad de recepción y en el presupuesto nominal del sistema, mientras que la coincidencia con Radio Mobile se verifica en la pérdida de trayecto, la potencia recibida y el margen reportado por dicha herramienta. De este modo, la validación parcial se estructura en dos niveles complementarios: Semtech permite verificar la consistencia del núcleo radioeléctrico nominal, mientras que Radio Mobile permite contrastar el cálculo de propagación y los indicadores resultantes del enlace bajo un escenario equivalente.

Tabla 6.1: Comparación de resultados del caso de validación parcial del presupuesto de enlace.

Magnitud	Aplicación	Referencia externa	Diferencia
Frecuencia [MHz]	915	915	0
Distancia [km]	2.131	2.131	0
Sensibilidad Rx [dBm]	-137.0	-137.0 (Semtech)	0
Presupuesto nominal [dB]	157.0	157.0 (Semtech)	0
Pérdida de trayecto [dB]	98.24	98.20 (Radio Mobile)	0.04
Potencia recibida [dBm]	-78.24	-78.20 (Radio Mobile)	0.04
Margen [dB]	58.76	54.82 (Radio Mobile)	3.94

Cabe señalar que Radio Mobile reporta adicionalmente una “ganancia del sistema” de 153,02 dB y un “margen de escucha” de 54,82 dB, valores que no coinciden exactamente con el presupuesto nominal de 157 dB empleado en la aplicación y corroborado con Semtech. Esta diferencia no implica una inconsistencia del cálculo implementado, sino que responde a definiciones internas propias de Radio Mobile para el umbral efectivo de recepción y para los márgenes asociados a confiabilidad. En consecuencia, Radio Mobile no se utilizó aquí como referencia directa del margen nominal del sistema, sino específicamente como referencia para validar el cálculo de pérdidas por trayecto y de potencia recibida en un escenario equivalente.

En síntesis, los resultados obtenidos muestran que, cuando se igualan las condiciones de

cálculo mediante un proyecto ideal y se restringe la comparación a un escenario de espacio libre, la plataforma desarrollada reproduce de manera consistente el núcleo determinista del presupuesto de enlace. La coincidencia exacta con Semtech en sensibilidad y presupuesto nominal, junto con la coincidencia prácticamente exacta con Radio Mobile en pérdida de trayecto y potencia recibida, constituye evidencia suficiente de **validez parcial** para el cálculo implementado. No obstante, esta validación no debe interpretarse como una validación integral de la plataforma en escenarios reales de operación minera, ya que el propósito de la herramienta no es reemplazar una calculadora de fabricante ni una plataforma comercial, sino apoyar la evaluación y comparación relativa de alternativas tecnológicas bajo supuestos homogéneos, trazables y coherentes con el contexto minero abordado en este trabajo.

6.3. Trabajo futuro

A partir de los resultados obtenidos, se identifican líneas de extensión que permitirían aumentar precisión metodológica y ampliar aplicabilidad, manteniendo el enfoque de ingeniería aplicado a proyectos mineros.

En primer lugar, se propone la validación de campo de los perfiles radioeléctricos y márgenes de enlace calculados, contrastando el modelo de pérdidas y las penalizaciones ambientales con mediciones in situ. Esta etapa permitiría ajustar exponentes de pérdida, penalizaciones por condición geométrica y supuestos ambientales para rangos de operación típicos, fortaleciendo la confianza en la estimación de factibilidad.

En segundo lugar, se recomienda evolucionar el modelo energético desde una clasificación cualitativa hacia un balance cuantitativo que incorpore consumo por modo de operación y perfiles de transmisión, habilitando la estimación de autonomía en baterías y el dimensionamiento preliminar de soluciones solares. De forma análoga, se sugiere extender el criterio de costo hacia un modelo cuantitativo de CAPEX/OPEX y costo total de propiedad, incorporando insumos trazables de mercado y supuestos explícitos de mantenimiento.

En tercer lugar, se propone ampliar la base de datos del catálogo incorporando, además de la caracterización por familia tecnológica, referencias a productos representativos con rangos de parámetros, fuentes documentales y control de versiones. Esto permitiría capturar variabilidad real entre implementaciones comerciales y mejorar la trazabilidad de las entradas.

Finalmente, como extensión de automatización, se sugiere integrar algoritmos de apoyo para recomendar configuraciones de infraestructura, tales como ubicación de puntos de agregación y ajustes de instalación orientados a maximizar holgura de margen bajo restricciones de despliegue. Asimismo, se considera pertinente expandir servicios y reglas específicas de dimensionamiento para casos más exigentes que telemetría, por ejemplo para teleoperación, manteniendo consistencia con el marco de criticidad y con la estructura metodológica definida en el Capítulo 3.

Referencias

- [1] Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). (2024) Inversión en la minería chilena: Cartera de proyectos 2024–2033. Reporta 51 proyectos y una inversión estimada de US\$ 83.181 millones para 2024–2033. [Online]. Available: <https://www.cochilco.cl/web/inversion-en-la-mineria-chilena-cartera-de-proyectos-2024-2033/>
- [2] A. Aziz, O. Schelén, and U. Bodin, “A study on industrial iot for the mining industry: Synthesized architecture and open research directions,” *IoT*, vol. 1, no. 2, pp. 241–264, 2020.
- [3] R. Candell, M. Kashef, Y. Liu, K. Lee, S. Foufou *et al.*, “Guide to industrial wireless systems deployments,” 2018. [Online]. Available: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ams/NIST.AMS.300-4.pdf>
- [4] C. Scientific, “Line of sight obstruction,” 2016, application Note 3RF-E. [Online]. Available: <https://s.campbellsci.com/documents/us/technical-papers/line-of-sight-obstruction.pdf>
- [5] C. Beard and W. Stallings, *Wireless Communication Networks and Systems*. Pearson, 2016.
- [6] Y. Q. D. Q. Huang, J. Jiang, “Comparative evaluation of three wireless sensor network transceivers in a high radiation environment,” *EPJ Web of Conferences*, vol. 225, p. 08007, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202022508007>
- [7] ISA100 Wireless Committee, “Isa100 wireless: Complete guide/brochure,” 2024, official ISA100 Wireless brochure detailing the ISA100.11a standard. [Online]. Available: <https://www.isa.org/isa100/>
- [8] (2024, Apr.) Wireless rf reference guide (cisco). Cisco. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/9800/technical-reference/wireless-rf-reference-guide.html>
- [9] B. Buurman, J. Kamruzzaman, G. Karmakar, and S. Islam, “Low-power wide-area networks: Design goals, architecture, suitability to use cases and research challenges,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 130 014–130 032, 2020, received December 21, 2019, accepted January 13, 2020, date of publication January 20, 2020, date of current version January 28, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968057>
- [10] S. K. Musonda, M. Ndiaye, H. M. Libati, and A. M. Abu-Mahfouz, “Reliability of lorawan communications in mining environments: A survey on challenges and design requirements,” *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 13, no. 1, p. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2224-2708/13/1/16>

- [11] L. Zheng, “Industrial wireless sensor networks and standardizations: The trend of wireless sensor networks for process automation,” in *Proceedings of the SICE Annual Conference 2010*. Taipei, Taiwan: IEEE, Aug. 2010, pp. 1187–1190, SICE Annual Conference 2010, Aug. 18–21, The Grand Hotel, Taipei, Taiwan. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5602869>
- [12] World Bank. (2024) Gdp (current us\$) - chile. Most recent value shown for 2024: 330.27 (billion current US\$). [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?locations=CL>
- [13] Consejo Minero, “Reporte anual cm 2024: La industria minera en 2024,” 2025, documento publicado en 2025 con resultados y series para 2024 (incluye PIB minero y participación en PIB nacional). [Online]. Available: <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2025/05/Reporte-Anual-CM-2024-La-industria-minera-en-2024.pdf>
- [14] United Nations General Assembly. (2015) Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development (resolution a/res/70/1). [Online]. Available: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf
- [15] Global Mining Guidelines Group (GMG), “Underground mine communications infrastructure guidelines: Part i – positioning and needs analysis,” 2017. [Online]. Available: https://gmgroup.org/wp-content/uploads/2024/07/Underground_Mine-Communications-Guideline-I-REV-2018.pdf
- [16] *Industrial communication networks — Wireless communication network and communication profiles — WirelessHART*, International Electrotechnical Commission (IEC) Std. IEC 62 591, 2016, edición 2.0 (según ficha IEC). [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/24433>
- [17] *Industrial communication networks — Wireless communication network and communication profiles — ISA 100.11a*, International Electrotechnical Commission (IEC) Std. IEC 62 734, 2014. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/en/publication/7409>
- [18] Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL), “Informe final: Estudio relativo al uso de equipos de radiocomunicaciones de baja potencia y a la compatibilidad de uso de las bandas de frecuencias 865–869,2 mhz; 902–928 mhz; 1.910–1.930 mhz y 3.600–3.700 mhz,” 2007, documento fechado Diciembre 2007. [Online]. Available: https://www.subtel.gob.cl/images/stories/articles/subtel/asocfile/informe_final_mod_i.pdf
- [19] G. Ilieva and T. Yankova, “Iot system selection as a fuzzy multi-criteria problem,” *Sensors*, vol. 22, no. 11, p. 4110, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/11/4110>
- [20] Forsk. (2026) Atoll overview. Descripción del software de planificación/optimización RF Atoll. [Online]. Available: <https://www.forsk.com/atoll-overview>

- [21] iBwave Solutions. (2026) ibwave private networks (lte/5g & wi-fi). [Online]. Available: <https://www.ibwave.com/ibwave-private-networks-lte-5g-wi-fi/>
- [22] TECSUD. (2025) Herramientas de ekahau site survey. Página de reseller/integrador con descripción de Ekahau AI Pro y servicios asociados. [Online]. Available: <https://tecsud.cl/configuracion-de-redes/ekahau/>
- [23] Emerson. (2025) Emerson wireless gateway capacity calculator. [Online]. Available: <https://tools.measurementinstrumentation.com/pervasive-sensing/wireless-gateway-capacity-calculator>
- [24] Emerson. (2022) Smart wireless estimator. [Online]. Available: <https://www3.emersonprocess.com/rosemount/wirelessestimator/default.aspx>
- [25] Com4. (2026) Lte-m vs nb-iot: Understanding the differences and choosing the right iot network. [Online]. Available: <https://www.com4.no/en/blog/lte-m-vs-nb-iot-understanding-the-differences-and-choosing-the-right-iot-network>
- [26] Sierra Wireless, “Lte cat-1 or lte-m or nb-iot: Which one is right for your iot deployment?” 2022, white paper con comparaciones de LTE Cat-1, LTE-M y NB-IoT. [Online]. Available: https://23886811.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/23886811/PDF%20Files/Whitepaper/%7B6d0c8eb5-9d75-437a-84d1-d082625816b6%7D_OEM-WP-LTE_CAT-1_or_LTE-M_or_NB-IoT-May2022-F.pdf
- [27] Emerson Automation Solutions, “System engineering guidelines: Iec 62591 wirelesshart,” 2016. [Online]. Available: <https://www.emerson.com/documents/automation/engineering-guide-system-engineering-guidelines-iec-62591-wirelesshart-en-79900.pdf>
- [28] Streamlit. (2026) Streamlit documentation. [Online]. Available: <https://docs.streamlit.io/>
- [29] PostgreSQL Global Development Group. (2026) Postgresql documentation. [Online]. Available: <https://www.postgresql.org/docs/>
- [30] Leaflet. (2026) Leaflet: a javascript library for interactive maps. [Online]. Available: <https://leafletjs.com/>
- [31] S. Sinha. (2025, Oct.) State of iot 2025: Number of connected iot devices growing 14 % to 21.1 billion globally. IoT Analytics. [Online]. Available: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>
- [32] (2025) Iot connections outlook — ericsson mobility report (data forecasts). Ericsson. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/dataforecasts/iot-connections-outlook>
- [33] I. C. Ehie and M. A. Chilton, “Understanding the influence of it/ot convergence on the adoption of internet of things (iot) in manufacturing organizations: An empirical investigation,” *Computers in Industry*, vol. 115, p. 103166, 2020.

- [34] ISA100 Wireless Committee, “Isa100 wireless: The complete brochure, part 2 - wireless functionality,” 2024, incluye información detallada sobre la funcionalidad de WirelessHART y ISA100.11a. [Online]. Available: <https://www.isa.org/isa100/>
- [35] International Telecommunication Union (ITU-R), “Calculation of free-space attenuation,” International Telecommunication Union (ITU-R), Recommendation ITU-R P.525-4, Aug. 2019. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-4-201908-S!!PDF-E.pdf
- [36] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, “914 mhz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 40, no. 2, pp. 207–217, 1992. [Online]. Available: <https://www.ics.uci.edu/~jpd/ubicomp/SeidelRappaport.pdf>
- [37] S. A. B. O. Nassir Abuhamoud, Sana Fadil, “Attenuation of dust and sand storms of microwave signal at sabha city,” *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 17, no. 4, pp. 14–21, 2021.
- [38] C. Beard and W. Stallings, *Wireless Communication Networks and Systems*, 2nd ed. Pearson, 2016, covering wireless network standards and protocols, the authors discuss key aspects of network design and transmission fundamentals.
- [39] J. L. J. C. Galen Koepke, William Young, “Complexities of testing interference and coexistence of wireless systems in critical infrastructure,” National Institute of Standards and Technology (NIST), Tech. Rep. NIST Technical Note 1885, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.TN.1885>
- [40] Y. Zhang, C. Zhou, and M. Girman, “Exploring the performance and reliability of communication links subjected to electromagnetic interference in radio frequency-controlled heavy equipment in an underground coal mine,” *CDC NIOSH*, 2025, 25-035, Pittsburgh, PA. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/niosh>
- [41] L. M. Vicente Guerrero, Ramón L. Yuste, *Comunicaciones Industriales*, primera ed. Alfaomega, 2008, iSBN-10: 84-267-1510-9, iSBN-13: 978-84-267-1510-4.
- [42] A. R. Penin, *Comunicaciones Industriales Guía Práctica*, primera ed. Marcombo, 2008, iSBN: 978-84-267-1510-4.
- [43] FieldComm Group, ODVA and PI. (2019) Joint update on an advanced physical layer for industrial ethernet (incl. profinet). FieldComm Group / ODVA / Profibus & Profinet International. Comunicado conjunto sobre el desarrollo de Ethernet-APL y su soporte para PROFINET. [Online]. Available: <https://www.fieldcommgroup.org/posts/news-release-fieldcomm-group-odva-and-pi-provide-joint-update-advanced-physical-layer>
- [44] *IEEE Standard for Ethernet – Amendment 5: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Mb/s Operation and Associated Power Delivery over a Single Balanced*

- Pair of Conductors (10BASE-T1L)*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Std. IEEE Std 802.3cg-2019, 2019.
- [45] “Iec ts 60079-47: Equipment protection by 2-wire intrinsically safe ethernet (2-wise),” Technical Specification, 2021. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/xxxx>
- [46] FieldComm Group. (2025) Ethernet-apl: advanced physical layer for industrial ethernet. FieldComm Group. Descripción del estándar Ethernet-APL basado en SPE y 10BASE-T1L. [Online]. Available: <https://www.fieldcommgroup.org/technologies/ethernet-apl>
- [47] ISA, *Wireless Networks for Industrial Automation*, ISA, Ed. ISA, 2008, chapter 2: Wireless Network Standards.
- [48] M. Nixon. (2010) A comparison of wirelesshart and isa100.11a. Emerson Process Management. Round Rock, TX, USA. White Paper: Comparison of WirelessHART and ISA100.11a. [Online]. Available: <https://www.emerson.com/documents/automation/white-paper-comparison-of-wirelesshart-and-isa100-11a-en-144731.pdf>
- [49] NXP Semiconductors, “Co-existence of ieee 802.15.4 at 2.4 ghz (application note jn-an-1079),” Tech. Rep., Nov. 2013. [Online]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/JN-AN-1079.pdf>
- [50] IEEE, “Ieee 802.15.4 - clause 6 draft,” 2003.
- [51] J. F. Kurose and K. W. Ross, *Computer Networking: A Top-Down Approach*, 8th ed. Pearson, 2021.
- [52] LoRa Alliance. (2023, Sep.) Rp002-1.0.4 regional parameters. [Online]. Available: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>
- [53] The Things Network. (2026) Frequency plans: Eu868. [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequencies-by-country/>
- [54] GSMA. (2019) Lte-m and nb-iot: Cellular iot (lpwa) overview / guidance (gsma resources). [Online]. Available: <https://www.gsma.com/>
- [55] Electronic Communications Committee (ECC), CEPT, “Ecc report 266: M2M communications in LTE and its evolution,” Electronic Communications Committee (ECC), CEPT, Tech. Rep. ECC Report 266, 2017. [Online]. Available: <https://docdb.cept.org/download/1302>
- [56] H. Pirayesh, S. Zhang, and H. Zeng, “mreader: Concurrent uhf rfid tag reading,” in *Proceedings of the International Symposium on Theory, Algorithmic Foundations, and Protocol Design for Mobile Networks and Mobile Computing (MobiHoc '23)*. ACM, 2023, pp. 280–289.

- [57] LoRa Alliance. (2023, Sep.) Ts001-1.0.4 lorawan® 12 1.0.4 specification. [Online]. Available: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/ts001-1-0-4-lorawan-12-1-0-4-specification>
- [58] *OPC Unified Architecture — Part 1: Overview and Concepts*, International Electrotechnical Commission (IEC) Std. IEC 62 541-1, 2025.
- [59] *Information technology — Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) v3.1.1*, ISO/IEC Std. ISO/IEC 20 922, 2016.
- [60] *Enterprise-control system integration — Part 1: Models and terminology*, International Electrotechnical Commission (IEC) Std. IEC 62 264-1, 2013.
- [61] *Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)*, DIN Std. DIN SPEC 91 345, 2016.
- [62] *Internet of Things (IoT) — Reference Architecture*, ISO/IEC Std. ISO/IEC 30 141, 2024.
- [63] Industrial Internet Consortium (IIC), “Industrial internet reference architecture (iira),” Tech. Rep., 2022.
- [64] *Industrial communication networks — Network and system security — Part 3-3: System security requirements and security levels*, International Electrotechnical Commission (IEC) Std. IEC 62 443-3-3, 2013.
- [65] K. Stouffer, V. Y. Pillitteri, S. Lightman, M. Abrams, and A. Hahn, “Guide to industrial control systems (ics) security,” National Institute of Standards and Technology (NIST), Special Publication NIST SP 800-82 Revision 3, 2023. [Online]. Available: <https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/82/r3/final>
- [66] Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL), “Resolución exenta n 1985 (2017): Fija norma técnica de equipos de alcance reducido,” Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Gobierno de Chile, Tech. Rep., Oct. 2017. [Online]. Available: https://www.subtel.gob.cl/wp-content/uploads/2023/05/Resolucion_1985_EXENTA_17_OCT_2017_Actualizada_al_2021.pdf
- [67] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2025, May) Resolución exenta n 737 (22-may-2025): Modifica resolución exenta n 1985 (equipos de alcance reducido). [Online]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1213556>
- [68] International Telecommunication Union (ITU-R), “Attenuation by atmospheric gases and related effects,” International Telecommunication Union (ITU-R), Tech. Rep. ITU-R P.676-13, 2022. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.676-13-202208-I!!PDF-E.pdf
- [69] International Telecommunication Union (ITU-R), “Attenuation due to clouds and fog,” International Telecommunication Union (ITU-R), Tech. Rep. ITU-R P.840-9, 2023. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.840-9-202308-I!!PDF-E.pdf

- [70] Murata. (2025) Electromagnetic interference from industrial equipment: Effects on wireless communication and modern mitigation strategies. Accessed from Murata's official site. [Online]. Available: <https://article.murata.com/en-us/article/emi-industrial-equipment-impact-wireless-mitigation#:~:text=...%20article.murata.com%20%20Self,These>
- [71] FieldComm Group, "Wirelesshart user case studies," FieldComm Group, Austin, TX, USA, Tech. Rep., Nov. 2019, date of Publication: November 25, 2019. [Online]. Available: https://www.fieldcommgroup.org/sites/default/files/imce_files/technology/documents/WirelessHART%20User%20Case%20Studies%20-%20web%20publishing.pdf
- [72] Semtech Corporation. (n.d.) Lora® calculator. Herramienta web de soporte de diseño. Accedido el 16 de abril de 2026. [Online]. Available: <https://www.semtech.com/design-support/lora-calculator>
- [73] R. Coudé. (n.d.) Radio mobile online. Autor identificado como Roger Coudé VE2DBE en el sitio. Accedido el 16 de abril de 2026. [Online]. Available: https://www.ve2dbe.com/rmonline_s.asp

Anexos

Anexo A

Manual de Usuario — Selector de Tecnologías IIoT para Procesos Mineros

Aplicación web desarrollada para Hatch · Universidad Técnica Federico Santa María

Campo	Detalle
Versión	1.0
Fecha	Febrero 2026
Plataforma	Streamlit (Python) + Leaflet (React)
Persistencia	PostgreSQL
Reporte	PDF ejecutivo (FPDF2)

A.1. Introducción

La aplicación “**Selección de Tecnologías IIoT para Procesos Mineros**” es una herramienta de ingeniería que permite evaluar y seleccionar la tecnología de comunicación inalámbrica industrial más adecuada para un escenario minero específico. El flujo de trabajo guía al usuario a través de cinco secciones secuenciales —desde la caracterización del proyecto hasta la generación de un reporte PDF ejecutivo— integrando modelos de propagación RF, scoring multicriterio basado en perfiles de servicio ponderados, y un mapa interactivo Leaflet para posicionamiento de nodos.

El catálogo incluye tecnologías como **ISA100.11a**, **WirelessHART**, **LoRaWAN**, **Wi-Fi**, **5G NR**, **4G/LTE**, **NB-IoT**, **LTE-M**, **Zigbee**, **Bluetooth/BLE** y **RFID**, cada una con parámetros de enlace trazables (potencia Tx, sensibilidad Rx, ganancia de antena, banda de frecuencia).

Destinatarios: Ingenieros de Control y Automatización de Hatch que requieran una selección preliminar fundamentada de tecnología IIoT en proyectos mineros de superficie.

A.2. Requisitos Previos

A.2.1. Software

Componente	Versión mínima	Notas
Python	3.10+	Entorno virtual recomendado
Node.js	18+	Solo para componente Leaflet en modo desarrollo
PostgreSQL	14+	Base de datos de persistencia
Navegador	Chrome / Edge / Firefox	Actualizado

A.3. Acceso a la Aplicación

1. Asegúrese de estar conectado a la red interna donde la aplicación está alojada.
2. Abra un navegador web.
3. Ingrese la URL proporcionada (por ejemplo, `http://servidor_interno:8501`) en la barra de direcciones del navegador.
4. La aplicación debería cargarse automáticamente, mostrando la interfaz de usuario donde puede acceder a las distintas funcionalidades del sistema.

La interfaz presenta un **panel lateral de navegación** con las siguientes secciones:

- Portada
 - Contexto del Proyecto
 - Dimensionamiento y Servicios
 - Caracterización de Enlaces
 - Análisis y Selección
 - Reporte Ejecutivo
 - Fichas Técnicas
-

A.4. Flujo Completo de Trabajo

El flujo de diseño sigue una secuencia lógica de 5 secciones principales. Cada sección alimenta a las siguientes, por lo que se recomienda completarlas en orden. La sección que da entrada a la aplicación es la *Portada*, como se muestra en la Figura A.1.

Selección de Tecnologías IIoT para Procesos Mineros



Figura A.1: Portada de la aplicación web.

A.4.1. Sección 1 — Contexto del Proyecto

1. Contexto del Proyecto

Seleccionar Proyecto
(Nuevo Proyecto) ▾

Nombre del Proyecto	Aplicación de servicio	
Nuevo Proyecto	Pilas de lixiviación ▾	
Ubicación Mina	Tª Mínima (°C)	Tª Máxima (°C)
(Seleccione) ▾	-5,00 - +	45,00 - +
Latitud (decimal)	Nivel de Polvo (Visibilidad) ⓘ	Interferencia (EMI) ⓘ
0,00 - +	Alto (V = 10m) ▾	Medio (Margen 3 dB) ▾
Longitud (decimal)	Humedad Relativa (RH) ⓘ	
0,00 - +	Baja (20%) ▾	

> [Detalle de cálculo y fuentes \(Polvo, EMI, Humedad\)](#)

Cargar **Guardar/Actualizar** Eliminar

Figura A.2: Sección de Contexto del Proyecto.

Esta sección define las condiciones generales del escenario minero. Los datos ingresados aquí determinan los parámetros ambientales que impactan directamente en el modelo de propagación RF y el scoring de tecnologías.

Pasos

1. **Seleccionar o crear un proyecto.** En el selector superior, elija (Nuevo Proyecto) para crear uno desde cero o seleccione un proyecto existente de la lista desplegable. Al seleccionar un proyecto guardado, todos los datos se cargan automáticamente desde la base de datos.
2. **Nombre del proyecto.** Ingrese un nombre descriptivo (ej: “*Spence — Pilas de Lixiviación Fase 3*”).
3. **Ubicación de la mina.** Seleccione una de las minas predefinidas (Spence, Chuquicamata, Escondida, Ministro Hales, Radomiro Tomic, Los Pelambres, Centinela) o ingrese coordenadas manuales en formato decimal. Las coordenadas (latitud/longitud) se actualizan automáticamente al seleccionar una mina.
4. **Aplicación de servicio.** Seleccione el tipo de aplicación minera:
 - *Pilas de lixiviación* — Presets: polvo alto, EMI medio, humedad baja (20 %), T° 5 °C a 45 °C.
 - *Botadero de ripios* — Presets: polvo alto, EMI medio, humedad baja (20 %), T° 5 °C a 45 °C.
 - *Mineroductos* — Presets: polvo medio, EMI bajo, humedad media (40 %), T° 10 °C a 40 °C. media.
 - *Tranques de relaves* — Presets: polvo medio, EMI medio, humedad baja (20 %), T° 10 °C a 40 °C.
 - También puede agregar aplicaciones personalizadas desde el panel inferior.
5. **Parámetros ambientales.** Configure los valores de entorno que determinan las pérdidas del canal:
 - **Temperatura mínima / máxima (°C):** Rango operacional del sitio.
 - **Nivel de polvo (Visibilidad):** Bajo (V 120 m), Medio (V 40 m), Alto (V 10 m), Extremo (V 4 m). Define la atenuación por polvo γ_{dust} (dB/km) según modelo Abuhamoud et al.
 - **Interferencia EMI:** Bajo (0 dB), Medio (3 dB), Alto (10 dB). Penalización aplicada al margen del enlace.
 - **Humedad relativa:** Baja (20 %), Media (40 %), Alta (60 %). Parámetro del modelo de polvo.

6. Guardar el proyecto. Presione el botón **Guardar/Actualizar** para persistir los datos en PostgreSQL. Si es un proyecto nuevo, se genera un ID automáticamente.

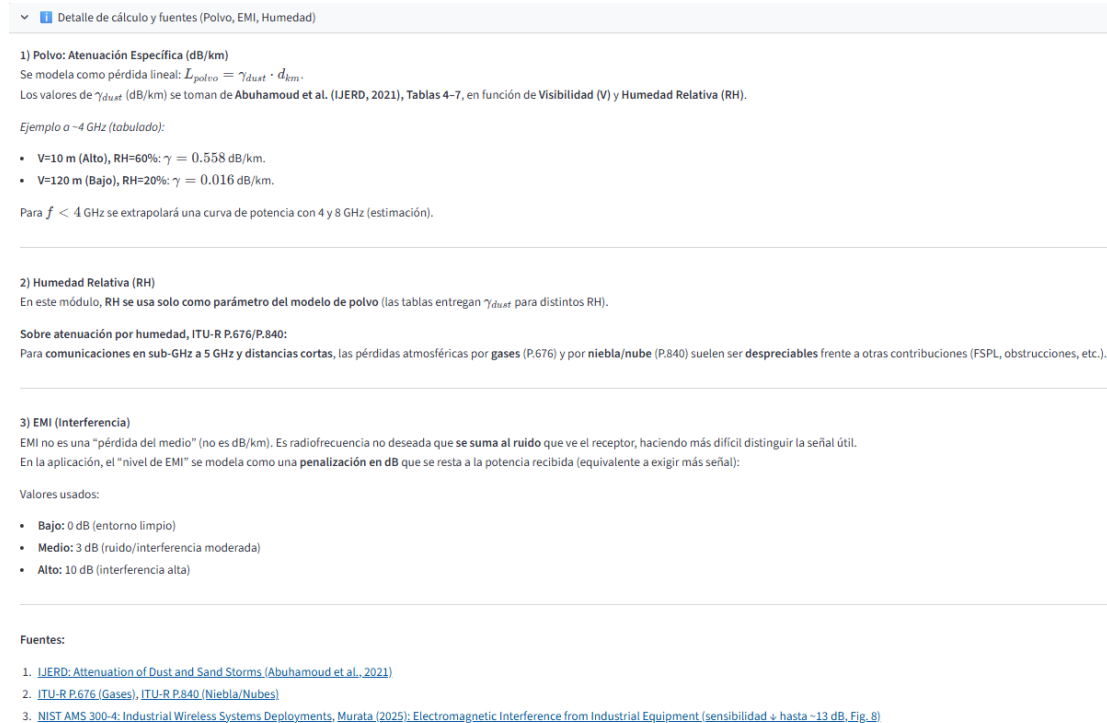


Figura A.3: Detalle del panel de parámetros ambientales con selectores de polvo/EMI/humedad.

Gestión de ubicaciones y aplicaciones personalizadas En la parte inferior de la sección se encuentran dos expansores:

- **Agregar / Eliminar Ubicaciones Mina:** Permite registrar nuevas minas con nombre y coordenadas, que quedan disponibles en el selector para futuros proyectos.
- **Agregar / Eliminar Aplicaciones de Servicio:** Permite registrar aplicaciones personalizadas (ej: “Planta concentradora”). Las aplicaciones personalizadas no tienen presets automáticos de entorno.

A.4.2. Sección 2 — Dimensionamiento y Servicios

Esta sección define la topología de la red, el inventario de dispositivos y los perfiles de servicio requeridos.

Agregar Mina y Aplicación de servicio

▼ **Agregar / Eliminar Ubicaciones Mina**

Las ubicaciones predefinidas no se pueden eliminar. Las ubicaciones personalizadas se almacenan en la BD.

Agregar ubicación

Nombre mina:

Latitud: - +

Longitud: - +

Ubicaciones disponibles

Nombre	Lat	Lon	Origen
Spence	-22.8038	-69.2743	Predefinida
Chuquicamata	-22.3013	-68.902	Predefinida
Escondida	-24.2694	-69.071	Predefinida
Ministro Hales	-22.339	-68.8956	Predefinida
Radomiro Tomic	-22.1821	-68.865	Predefinida
Los Pelambres	-31.7153	-70.4928	Predefinida
Centinela	-23.0097	-69.0988	Predefinida

▼ **Agregar / Eliminar Aplicaciones de Servicio**

Las aplicaciones predefinidas tienen presets de entorno automáticos. Las personalizadas requieren configuración manual de condiciones ambientales.

Agregar aplicación

Nombre aplicación:

Aplicaciones disponibles

Nombre	Origen	Presets
Pilas de lixiviación	Predefinida	Sí
Botadero de rípios	Predefinida	Sí
Mineroductos	Predefinida	Sí
Tranques de relaves	Predefinida	Sí

Figura A.4: Panel de gestión de ubicaciones y aplicaciones personalizadas expandido.

2. Dimensionamiento y Servicios

2.1 Dispositivos

Inventario de Dispositivos

Defina cada sensor, gateway, datalogger, actuador o repetidor.

Roles automáticos en mapa (siguiente sección) según tipo: verde = Gateway, rojo = Dispositivo final, morado = Repetidor.

Agrega al menos un dispositivo para continuar.

Topología: Estrella

Resumen Dimensionamiento

Total nodos 0	Gateways 0	Repetidores 0	Nodos finales 0
-------------------------	----------------------	-------------------------	---------------------------

Estos valores se emplearán para la generación de enlaces y el análisis de tecnologías.

Figura A.5: Sección Dimensionamiento y Servicios: Dispositivos.

4.2.1 Inventario de Dispositivos

1. **Agregar dispositivos.** Expanda el formulario “*Nuevo dispositivo*” y configure:

- **Tipo:** Gateway/AP, Repetidor, Datalogger, Instrumento o Actuador.
- **Prefijo TAG / ID:** Etiqueta de identificación del instrumento (ej: 0041-FT-001).
- **Grupo de servicio:** Asocie el dispositivo a un perfil de servicio (Monitoreo/Telemetría, Alarma, Control Supervisorio/APC, Control Regulatorio, Emergencia, Video).
- **Alimentación:** Batería, Solar o Red. *Este campo impacta directamente en el filtrado de tecnologías: si hay nodos con batería, se descartan tecnologías con consumo energético “Alto”.*

2.2 Datos de uso de servicios

The screenshot shows a web interface for configuring services. It is divided into two main sections:

- 1. Servicios Activos:** A notification states that no services were detected in the inventory. Below this, there is a dropdown menu for adding services, currently showing 'Monitoreo / Telemetría'.
- 2. Configuración de Requerimientos:** This section is for configuring requirements for the selected service. It shows:
 - Selected service: 'Monitoreo / Telemetría'.
 - Configuration: 'Clase ISA / Funcionalidad: Class 5 (Data Logging)' with a reference payload of 64 bytes and a latency of 5000 ms.
 - Four input fields for configuration:
 - Payload:** 80
 - Overhead:** 100
 - Latencia Máx.:** 5,0 s
 - Periodo Reporte:** 1,0 h
 - Tasas calculadas:**
 - L (bits/msg): 1,280 bits
 - R prom: 0.3556 bps
 - R pico: 512 bps

Figura A.6: Sección de Dimensionamiento y Servicios: Datos de uso de servicios.

- **Cantidad:** Permite crear múltiples dispositivos con TAGs numerados secuencialmente.
- **Coordenadas:** Se prellenan con coordenadas aleatorias alrededor de la ubicación de la mina. Se presenta una tabla editable para posicionar el nodo donde se requiera.

2. **Roles automáticos.** El rol del dispositivo en el mapa se asigna automáticamente según su tipo:

- **Gateway/AP** → Gw/AP
- **Repetidor** → Repetidor
- **Instrumento / Datalogger / Actuador** → Final

4.2.2 Datos de Uso de Servicios Para cada grupo de servicio activo, configure los requisitos de comunicación:

Parámetro	Descripción	Ejemplo
Payload (bytes)	Tamaño del paquete útil por lectura	64 bytes
Overhead (%)	Cabecera de protocolo adicional	100 %
Latencia máxima	Tiempo máximo aceptable de entrega	5 s
Periodo de reporte	Intervalo entre reportes consecutivos	1 h

La **tasa pico por enlace** R_{enlace} se calcula automáticamente:

$$R_{enlace} = \frac{P_{payload} \times (1 + OH/100) \times 8}{T_{periodo}} \quad [\text{bps}]$$

2.1 Dispositivos

Inventario de Dispositivos

Define cada sensor, gateway, datalogger, actuador o repetidor.

Roles automáticos en mapa (siguiente sección) según tipo: verde = Gateway, rojo = Dispositivo final, morado = Repetidor.

▼ + Nuevo dispositivo

Tipo	Prefijo TAG	ID		
Instrumento	Ej: 0041-FT	Ej: 001		
Grupo de servicio	Alimentación	Cantidad	Descripción	
N/D	Batería	1 - +		

Notas (opcional)

Agregar dispositivo(s)

Figura A.7: Formulario de creación de dispositivos.

3. **Topología y parámetros RF.** Seleccione la topología objetivo de la red: Punto a punto, Estrella o Malla. Al seleccionar esta última opción se despliega un panel de validación de reglas WirelessHART (Emerson): regla de los cinco mínimos, regla de los tres vecinos, regla de porcentaje y regla de distancia, evaluadas contra el inventario actual.
4. **Asignación a gateways:** Si existen múltiples gateways en el inventario, se presenta una tabla editable para asignar cada dispositivo a un gateway específico.

A.4.3. Sección 3 — Caracterización de Enlaces

Esta sección presenta el **mapa interactivo Leaflet** donde se posicionan los nodos y se definen los enlaces de comunicación. Integra un motor de cálculo de perfil de terreno (Radio Path) con elevaciones reales.

4.3.1 Posicionamiento de Nodos (Drag & Drop)

1. **Visualización.** Los nodos del inventario aparecen automáticamente en el mapa, diferenciados por color según su rol (verde = Gateway, rojo = Final, morado = Repetidor).
2. **Mover nodos.** Arrastre cualquier nodo a su ubicación real sobre la imagen satelital. Las coordenadas se actualizan en tiempo real.
3. **Agregar nodos desde el mapa.** Haga clic en el mapa para agregar nuevos nodos directamente.

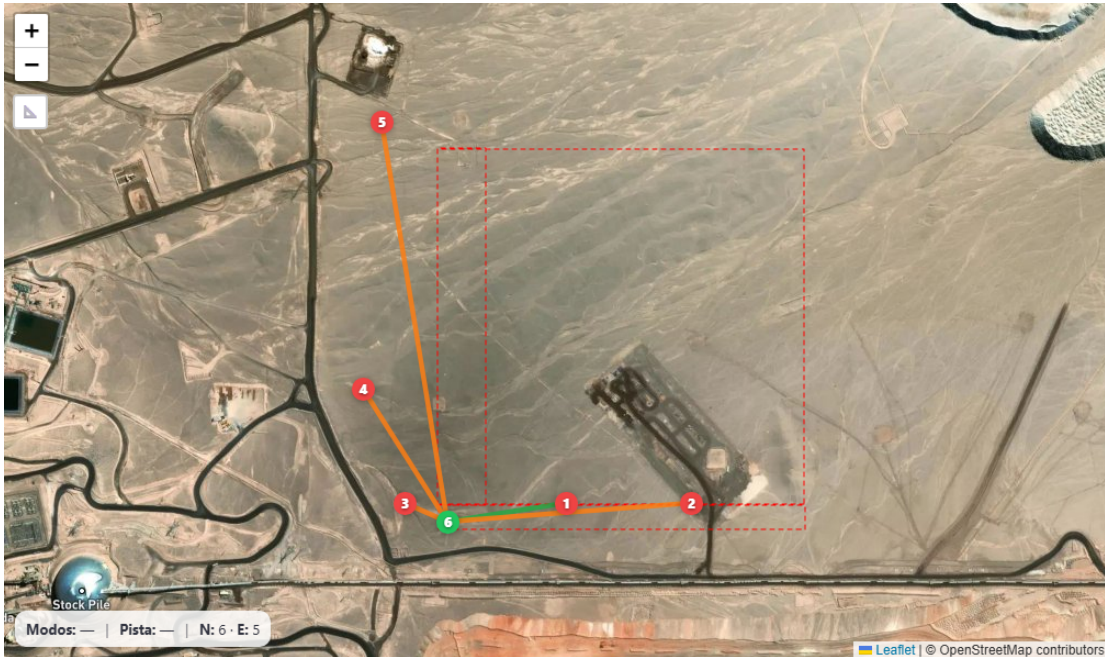


Figura A.8: Mapa Leaflet con nodos preposicionados desde inventario de dispositivos.

4.3.2 Creación de Enlaces

4. **Conectar nodos.** Utilice el panel de conexiones para definir los enlaces entre nodos TX y RX. Los enlaces se visualizan como polilíneas sobre el mapa.
5. **Clasificación LOS automática.** Al definir un enlace, la aplicación calcula automáticamente el perfil de elevación del terreno y clasifica el enlace:
 - **LOS (verde):** Línea de vista despejada con 60 % de la primera zona de Fresnel libre.
 - **LOS* (amarillo):** Línea directa despejada pero zona de Fresnel parcialmente obstruida.
 - **NLOS (rojo):** Obstrucción de la línea directa.
6. **Distancia automática.** La distancia entre nodos se calcula mediante la **fórmula de Haversine**, considerando la curvatura terrestre.

4.3.3 Perfil de Radio Path

7. **Analizar enlace.** Al seleccionar un enlace en la tabla, se despliega el panel de **Radio Path** que muestra:
 - Perfil de elevación del terreno entre TX y RX.
 - Primera zona de Fresnel (60 %).
 - Alturas de antena configurables (TX/RX).

- Sugerencia de elevación de mástil si hay obstrucción.
- Fuente de elevación utilizada (Terrarium/Mapbox/DEM local).



Figura A.9: Panel de Radio Path con perfil de terreno, zona de Fresnel y sugerencia de altura.

4.3.4 Tabla de Nodos y Enlaces

- 8. Editar propiedades.** La tabla inferior permite modificar el perfil de servicio asociado a cada nodo, editar la clasificación LOS/NLOS manualmente y revisar las distancias calculadas.
- 9. Exportar.** Descargue la topología como archivo **KMZ** (compatible con Google Earth) para validación en campo.

A.4.4. Sección 4 — Análisis y Selección de Tecnología

Esta sección ejecuta el motor de scoring multicriterio. Se presenta una pestaña por cada grupo de servicio configurado en la Sección 2.

4.4.1 Requisitos del Grupo de Servicio Al ingresar a cada pestaña, se visualizan los requisitos del servicio como métricas:

- **R pico (enlace):** Tasa de datos mínima requerida.
- **Latencia máx.:** Tiempo máximo aceptable.
- **Periodo de reporte:** Intervalo entre mediciones.

Enlace	LOS	Distancia (m)
1 ↔ 6	LOS	241
2 ↔ 6	LOS*	490
3 ↔ 6	LOS*	92
4 ↔ 6	LOS*	316
5 ↔ 6	LOS*	811

ID	Servicio	Elev. (msnm)
1	Monitoreo / Telemetría	1638.9
2	Monitoreo / Telemetría	1644.0
3	Monitoreo / Telemetría	1638.4
4	Monitoreo / Telemetría	1633.7
5	Monitoreo / Telemetría	1638.1
6	Monitoreo / Telemetría	1635.8

(a) Tabla Enlaces.

(b) Tabla Nodos.

Figura A.10: Tabla de enlaces con columnas de distancia, tipo LOS y servicio asociado.

- **Cantidad de enlaces:** Número de enlaces del grupo.
- **Alimentación:** Restricción energética (Batería / Solar / Red).

4. Analisis y Seleccion de Tecnologia

En esta sección se filtran las tecnologías que no cumplen los requisitos mínimos (hard constraints) y luego se priorizan las candidatas según ponderaciones (soft constraints).

Monitoreo / Telemetría

4.1 Requisitos del grupo de servicios

Perfil base: Monitoreo / Telemetría

Estos requisitos provienen de la sección 2 (Datos de uso de servicios).
Se evaluarán las tecnologías que puedan soportar estos requisitos en todos los enlaces del grupo.

R pico (enlace) 512 bps Latencia máx. 5 s Periodo reporte 1 h Enlaces 5 Alimentación Batería

4.2 Parámetros de evaluación

Configura las restricciones duras y cómo se ponderan los criterios. Las ayudas explican cada parámetro en lenguaje práctico.

Perfil de ponderación sugerido: ISA Clase 5 (Logging y Telemetría) — Derivado de referencias ISA100 / WirelessHART / 3GPP y especialistas.

- > Ajustar ponderaciones (%)
- > Parámetros de Presupuesto de enlace (Link budget)
- > ¿Qué significan estos parámetros?

Figura A.11: Sección de Análisis y Selección: Requisitos del servicio y Parámetros de evaluación.

4.4.2 Parámetros de Evaluación

1. **Perfil de ponderación.** La aplicación sugiere un perfil basado en la clasificación ISA del servicio:

4.2 Parámetros de evaluación

Configura las restricciones duras y cómo se ponderan los criterios. Las ayudas explican cada parámetro en lenguaje práctico.

Perfil de ponderación sugerido: ISA Clase 5 (Logging y Telemetría) — Derivado de referencias ISA100 / WirelessHART / 3GPP y especialistas.

▼ Ajustar ponderaciones (%)

Consumo energético	Cobertura geográfica	Costo implementación	
35	25	20	
-	+	-	+
Confiabilidad/Disponibilidad	Latencia crítica	Ancho banda	
10	5	5	
-	+	-	+

Suma: 100%

▼ Parámetros de Presupuesto de enlace (Link budget)

Margen objetivo M_{obj} (dB)	n (LOS)	n (NLOS)	
8,00	2,70	4,00	
-	+	-	+
Penalización LOS* (dB)	H_{max} (saltos máx. malla)		
6,00	6		
-	+	-	+

> ¿Qué significan estos parámetros?

Figura A.12: Panel de parámetros de evaluación con ponderaciones y link budget expandidos.

- **Crítico (Seguridad/Control):** Prioriza latencia y confiabilidad (35 % cada uno).
- **Control:** Equilibrio entre confiabilidad (30 %) y latencia (25 %).
- **Alarmas:** Confiabilidad (30 %) y cobertura (20 %).
- **Telemetría:** Prioriza consumo energético (35 %) y cobertura (25 %).
- **Multimedia / Video:** Prioriza ancho de banda (45 %).

2. **Ajustar ponderaciones.** Las ponderaciones se pueden modificar manualmente. La aplicación auto-normaliza el total a 100 %.

3. **Parámetros de Link Budget.** Configure:

- **Margen objetivo M_{obj} (dB):** Holgura de diseño sobre la sensibilidad del receptor.
- **Exponente n LOS / NLOS:** Modelo log-distance de pérdida de propagación.
- **Penalización LOS* (dB):** Degradación por obstrucción parcial de Fresnel.
- **H_{max} (saltos máx. malla):** Límite de saltos para tecnologías mesh.

4.4.3 Filtrado (Hard Constraints) La aplicación descarta automáticamente las tecnologías que **no cumplen** los requisitos mínimos:

- **Ancho de banda insuficiente:** Tasa máxima de la tecnología < tasa requerida del servicio.
- **Latencia excesiva:** Latencia típica de la tecnología > latencia máxima requerida.
- **Consumo energético incompatible:** Si hay nodos a batería, se excluyen tecnologías de consumo “Alto”.
- **Cobertura insuficiente:** Margen de enlace mínimo < M_{obj} en algún enlace (considerando pérdidas por polvo, EMI y obstrucciones).

4.3 Tecnologías candidatas y puntaje final

Se muestran solo tecnologías que cumplen los hard constraints (capacidad, latencia, cobertura). Luego se ordenan por el Score ponderado según los criterios definidos.

Recomendación: Se sugiere utilizar LoRa / LoRaWAN para el grupo Monitoreo / Telemetría.

- **Cumplimiento:** Pasa todos los enlaces con margen mínimo de 43.6 dB.
- **Fortaleza:** Mejor desempeño en consumo energético, criterio prioritario para este perfil.
- **Score Global:** 8.8 / 10.0

La tabla resalta la opción con mayor Score ponderado. Un Score alto indica mejor ajuste al perfil de servicio y a los pesos definidos.

	Tecnología	topología	Frecuencia	Puntaje	Margen Min. (dB)	
0	LoRa / LoRaWAN	estrella	470 MHz	8.8	43.6	
1	NB-IoT (3GPP Rel-13)	estrella	900 MHz	7.3	32.9	
2	LTE-M (Cat-M1)	celular	2.6 GHz	6.5	14.6	

> Ajustar frecuencia de operación

> Desglose de puntajes (tecnología recomendada)

> Detalle por enlace (Link Budget) – tecnologías candidatas

Figura A.13: Sección de Análisis y Selección: Tecnologías candidatas y puntaje final.

4.4 Tecnologías descartadas por restricciones duras

Listado de tecnologías que fallan al menos una condición obligatoria (capacidad, latencia o cobertura). Útil para entender por qué se excluyeron.

Se descartaron 8 de 11 tecnologías. Motivo principal: Cobertura: margen insuficiente.

	nombre_tecnologia	Motivo de fallo	Margen Min (dB)
0	RFID (activo/pasivo)	Cobertura: margen insuficiente	-10.7
1	Bluetooth / BLE 5.x	Cobertura: margen insuficiente	-26.0
2	Zigbee (IEEE 802.15.4)	Cobertura: margen insuficiente	-6.3
3	Wi-Fi (802.11ac/ax/ah)	Cobertura: margen insuficiente, Consumo energético incompatible	-3.1
4	5G (NR)	Cobertura: margen insuficiente, Consumo energético incompatible	0.2
8	4G/LTE (Cat-4+)	Cobertura: margen insuficiente, Consumo energético incompatible	-10.4
9	WirelessHART (IEC 62591)	Cobertura: margen insuficiente	-17.7
10	ISA100.11a	Cobertura: margen insuficiente	-15.7

> Detalle por enlace (Link Budget) – tecnologías descartadas

Nota: Los resultados se actualizan automáticamente al cambiar las ponderaciones o los parámetros de Link Budget.

Guardar Resultados para Reporte

Figura A.14: Sección de Análisis y Selección: Tecnologías descartadas por restricciones duras.

4.4.4 Scoring (Soft Constraints) Para las tecnologías que pasan el filtrado, se calculan puntajes normalizados (1–10) en seis criterios:

Criterio	Método de cálculo
Cobertura geográfica	Holgura del margen mínimo (raíz cuadrada, saturación a +10 dB sobre M_{obj})
Latencia crítica	Ratio τ_{req}/τ_{iec} con saturación logarítmica
Confiabilidad/Disponibilidad	Mapeo cualitativo (Baja=1, Media=2, Alta=3, Muy Alta=4)
Ancho de banda	Holgura logarítmica $\log_{10}(R_{max}/R_{req})$
Consumo energético	Mapeo cualitativo inverso (menor consumo = mayor score)

Criterio	Método de cálculo
Costo de implementación	Mapeo cualitativo inverso (menor costo = mayor score)

La **puntuación total** es la suma ponderada:

$$S_{total} = \sum_{i=1}^6 w_i \cdot s_i$$

4.4.5 Ranking y Resultados El ranking final ordena las tecnologías candidatas por puntuación total descendente. Se muestra:

- Tabla con tecnología, puntuación total y puntajes por criterio.
- Gráfico de barras de puntuación ponderada.
- Radar chart comparativo de las tecnologías evaluadas.
- Detalle de tecnologías descartadas y motivo de descarte.
- Detalle por enlace: margen calculado, distancia, tipo LOS, pérdidas (FSPL, polvo, EMI).

4.3 Tecnologías candidatas y puntaje final ⇌

Se muestran solo tecnologías que cumplen los hard constraints (capacidad, latencia, cobertura). Luego se ordenan por el Score ponderado según los criterios definidos.

Recomendación: Se sugiere utilizar **LoRa / LoRaWAN** para el grupo *Monitoreo / Telemetría*.

- **Cumplimiento:** Pasa todos los enlaces con margen mínimo de **43.6 dB**.
- **Fortaleza:** Mejor desempeño en **consumo energético**, criterio prioritario para este perfil.
- **Score Global:** 8.8 / 10.0

La tabla resalta la opción con mayor Score ponderado. Un Score alto indica mejor ajuste al perfil de servicio y a los pesos definidos.

	Tecnología	topologia	Frecuencia	Puntaje	Margen Mín. (dB)
0	📶 LoRa / LoRaWAN	estrella	470 MHz	<div style="width: 88%; background-color: #ff0000;"></div> 8.8	43.6
1	NB-IoT (3GPP Rel-13)	estrella	900 MHz	<div style="width: 73%; background-color: #ff0000;"></div> 7.3	32.9
2	LTE-M (Cat-M1)	celular	2.6 GHz	<div style="width: 65%; background-color: #ff0000;"></div> 6.5	14.6

Figura A.15: Matriz de tecnologías candidatas (Scoring).

A.4.5. Sección 5 — Reporte Ejecutivo

Esta sección genera el informe PDF ejecutivo con todos los resultados del análisis.

5. Reporte Ejecutivo

Esta sección permite generar un informe PDF completo con los resultados del análisis, incluyendo justificación técnica, mapa de topología y presupuesto de enlaces.

Datos del proyecto

Completa los campos para generar la portada del reporte según formato de ingeniería.

Cliente	N° documento HATCH
Cliente	
Proyecto	N° documento cliente
Proyecto Botadero RDC	
Título del documento	Preparado por
Selección tecnología IIoT Proyecto X	S. Salazar
Fase de ingeniería	
Ingeniería de detalle	

[Generar Reporte PDF](#)

Figura A.16: Sección Reporte Ejecutivo.

Pasos

1. **Completar datos del documento.** Configure los campos de portada:
 - **Cliente:** Nombre del mandante (ej: BHP, Codelco).
 - **Proyecto:** Se toma automáticamente del nombre definido en Sección 1.
 - **Título del documento:** Por defecto “*Selección de Tecnología IIoT*”.
 - **Fase de ingeniería:** Ej: Ingeniería Conceptual, Prefactibilidad.
 - **N° documento HATCH / Cliente:** Identificadores de trazabilidad documental.
 - **Preparado por:** Nombre del ingeniero responsable.

Todos los campos se **guardan automáticamente** en la base de datos al modificarlos.
2. **Generar el reporte.** Presione el botón “**Generar Reporte PDF**”. La aplicación:
 - Recupera el ranking de evaluación (desde BD o memoria).
 - Genera un mapa estático de topología (Mapbox satellite).
 - Construye el PDF con formato de ingeniería Hatch (logo, portada, numeración).
3. **Descargar.** Al completarse la generación, aparece el botón “**Descargar Reporte PDF**”.

Contenido del Reporte PDF El documento generado incluye las siguientes secciones:



Figura A.17: Botón de descarga del PDF generado con mensaje de éxito.

Sección del PDF	Contenido
Portada	Logo Hatch, datos del proyecto, fase, fechas
Resumen ejecutivo	Tecnología recomendada, criterios fuertes
Ranking	Tabla de puntuaciones + gráfico de barras
Mapa de topología	Imagen satelital con nodos y enlaces
Detalle de enlaces	Tabla con distancias, márgenes, tipo LOS
Tecnologías descartadas	Tabla con motivos de descarte
Inventario de dispositivos	Lista de equipos con roles y coordenadas
Arquitectura sugerida	Topología, repetidores, observaciones
Parámetros RF	Trazabilidad de parámetros usados
Notas y advertencias	Limitaciones del análisis, recomendaciones

A.5. Funcionalidades Avanzadas

A.5.1. Guardar / Cargar Escenarios

La aplicación persiste **automáticamente** todos los datos del proyecto en PostgreSQL:

1. **Guardar.** Presione **Guardar/Actualizar** en la Sección 1 para crear o actualizar el proyecto. Se persisten: parámetros de entorno, dimensionamiento, servicios, dispositivos (JSON), nodos del mapa, conexiones de enlaces, offsets de terreno y metadatos del reporte.
2. **Cargar.** Seleccione un proyecto existente en el desplegable. Todos los datos se cargan instantáneamente, incluyendo posiciones de nodos en el mapa y clasificaciones LOS.
3. **Eliminar.** El botón **Eliminar** borra el proyecto seleccionado y todas sus tablas asociadas (eliminación en cascada).

1. Contexto del Proyecto

Seleccionar Proyecto

Proyecto B

Nombre del Proyecto

Proyecto B

Ubicación Mina

Spence

Latitud (decimal)

-22,80

Longitud (decimal)

-69,27

> [Detalle de cálculo y fuentes \(Polvo, EMI, Humedad\)](#)

Cargar **Guardar/Actualizar** Eliminar

Figura A.18: Selector de proyecto: Cargar, Guardar/Actualizar, Eliminar.

A.5.2. Gestión de Proyectos

- Los proyectos se ordenan por **fecha de última actualización** (más recientes primero).
- El selector muestra el nombre del proyecto; el ID interno se gestiona automáticamente.
- Al navegar entre secciones, el proyecto activo se mantiene en la sesión.
- Múltiples usuarios pueden trabajar simultáneamente en proyectos distintos (cada sesión Streamlit es independiente).

A.5.3. Fichas Técnicas (Sección 6)

La sección **Fichas Técnicas** ofrece un catálogo interactivo de todas las tecnologías IIoT del sistema, organizado en cinco pestañas:

1. **Catálogo (Fichas):** Fichas descriptivas agrupadas por familia (WPAN Industrial, WLAN Industrial, Celular/Banda Ancha, LPWAN, Proximidad). Cada ficha incluye párrafo técnico y enlace a hoja de datos del fabricante.

2. **Comparativa Gráfica:** Mapa de posicionamiento (Alcance vs. Tasa de datos, escalas logarítmicas) y radar chart multidimensional para comparación personalizada.
3. **Tabla de Datos:** Tabla completa y filtrable con todas las especificaciones técnicas.
4. **Normas y Estándares:** Marco regulatorio aplicable a IIoT en Chile (SUBTEL Res. Ex. 1985, IEC 62591, ISA-100.11a, IEC 62443, DS 132 SERNAGEOMIN).
5. **Cargar Tecnologías:** Permite importar nuevas tecnologías al catálogo JSON.

Fichas Técnicas de Tecnologías IIoT

Catálogo de tecnologías IIoT organizadas por familia, con fichas descriptivas y comparativas.

[Catálogo \(Fichas\)](#) [Comparativa Gráfica](#) [Tabla de Datos](#) [Normas y Estándares](#) [Cargar Tecnologías](#)

Tecnologías Disponibles: 11


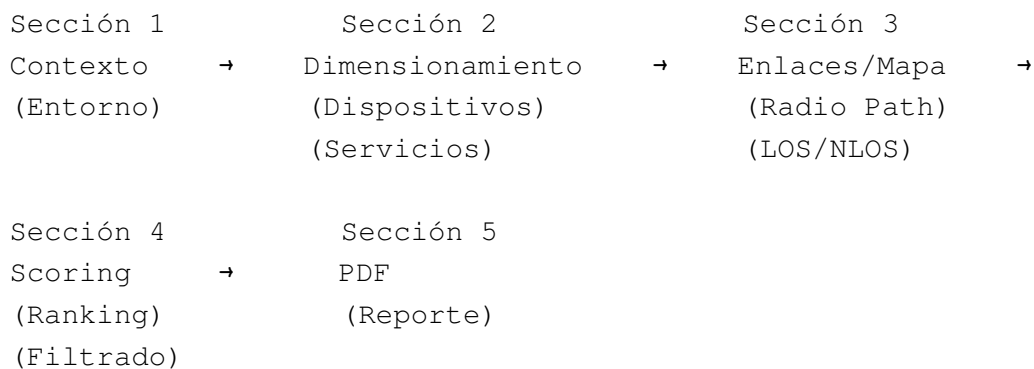
- >  WPAN Industrial (3)
- >  WLAN Industrial (1)
- >  Celular / Banda Ancha (4)
- >  LPWAN (1)
- >  Proximidad (2)

Figura A.19: Catálogo de fichas técnicas con comparativa, matriz de datos, normas/estándares y carga de tecnologías.

A.6. Generación de Reportes

A.6.1. Flujo de Generación



A.6.2. Requisitos para Generación Exitosa

- Proyecto creado y guardado (ID asignado).
- Al menos un grupo de servicio configurado con dispositivos.
- Al menos un enlace definido en el mapa con nodos posicionados.
- Análisis y Selección ejecutado (ranking disponible en memoria o BD).

A.6.3. Formato del PDF

El reporte sigue el formato de documentación de ingeniería Hatch:

- **Fuente:** DejaVu Sans (Unicode completo, incluye caracteres técnicos).
- **Logo:** Logo Hatch en encabezado de cada página.
- **Estructura:** Portada + secciones numeradas + tablas + gráficos embebidos + mapa satelital.
- **Nombre del archivo:** `reporte_iiot_{nombre_proyecto}_ID{id}.pdf`



Figura A.20: Portada del Reporte Ejecutivo.

A.7. Solución de Problemas

A.7.1. Problemas de Conexión

Síntoma	Causa probable	Solución
<i>“Error conectando a la BD”</i> al iniciar	PostgreSQL no está corriendo o credenciales incorrectas	Verificar servicio PostgreSQL y archivo <code>.streamlit/secrets.toml</code>
Datos no se guardan	Conexión perdida durante la sesión	La aplicación reconecta automáticamente; reintentar la operación
Mapa no se muestra	Componente Leaflet no está corriendo	Ejecutar <code>npm run dev</code> en <code>st_leaflet/frontend/</code>

A.7.2. Problemas de Análisis

Síntoma	Causa probable	Solución
<i>“No hay enlaces definidos”</i>	Sección 3 no completada	Navegar a Sección 3 y crear al menos un enlace
<i>“No hay perfiles de servicio”</i>	Sección 2 no completada	Navegar a Sección 2 y configurar al menos un servicio
Todas las tecnologías descartadas	Requisitos demasiado estrictos o distancias excesivas	Revisar distancias entre nodos, parámetros de link budget y requisitos de servicio; considerar agregar repetidores
Ranking vacío en reporte	Análisis no ejecutado	Ejecutar primero la Sección 4 completa antes de generar el reporte

A.7.3. Problemas de Mapa

Síntoma	Causa probable	Solución
Nodos no aparecen en el mapa	Coordenadas fuera de rango o $(0, 0)$	Verificar latitud/longitud en Sección 1 y dispositivos en Sección 2

Síntoma	Causa probable	Solución
Elevaciones no disponibles	Sin conexión a internet o API de Mapbox/Terrarium caída	La aplicación funciona sin elevaciones; la clasificación LOS se puede asignar manualmente
Mapa no se recentra	Cache del componente React	Presionar el botón de recentrar o recargar la página

A.7.4. Problemas de Reporte

Síntoma	Causa probable	Solución
PDF sin mapa	Token Mapbox inválido o sin internet	El reporte se genera sin mapa; verificar conectividad
Caracteres ilegibles	Fuentes TTF no encontradas	Verificar que <code>assets/fonts/DejaVuSans.ttf</code> y <code>DejaVuSans-Bold.ttf</code> existan
Error al generar	Datos incompletos	Completar todas las secciones previas en orden

A.8. Contacto y Soporte

Canal	Detalle
Desarrollo	Memoria de Título — Departamento de Electrónica, UTFSM
Empresa	Hatch — Oficina Santiago, Chile
Repositorio	Contactar al autor para acceso al código fuente
Documentación técnica	Capítulo 3 de la memoria (modelo de scoring) y Capítulo 4 (desarrollo de la aplicación)

Anexo B

Parámetros de ajuste en frecuencia para la atenuación específica por polvo/arena

Este anexo presenta las expresiones utilizadas por la aplicación para estimar la atenuación específica por polvo/arena $\gamma_{\text{dust}}(f; s)$ en función de la frecuencia. Estas expresiones corresponden a ajustes de tipo ley de potencia construidos a partir de los valores tabulados de atenuación específica reportados en [37] para distintas combinaciones de visibilidad y humedad relativa.

Para cada escenario ambiental s , definido por una combinación entre nivel de polvo y nivel de humedad relativa, se utiliza la expresión

$$\gamma_{\text{dust}}(f; s) = a_s f^{b_s} \quad [\text{dB/km}], \quad (\text{B.1})$$

donde f se expresa en GHz. Los parámetros (a_s, b_s) se obtienen a partir de los valores tabulados a 4 GHz y 8 GHz, denotados por $y_1 = \gamma_{\text{dust}}(4 \text{ GHz}; s)$ e $y_2 = \gamma_{\text{dust}}(8 \text{ GHz}; s)$, mediante

$$b_s = \frac{\ln(y_2/y_1)}{\ln(8/4)}, \quad (\text{B.2})$$

$$a_s = \frac{y_1}{4^{b_s}}. \quad (\text{B.3})$$

Bajo esta formulación, la humedad relativa no se modela como una pérdida atmosférica continua e independiente dentro del presupuesto de enlace, sino como una covariable que, junto con la visibilidad, define el escenario s y modifica indirectamente la atenuación específica utilizada en el cálculo. En consecuencia, considerando cuatro niveles discretos de polvo y tres niveles discretos de humedad relativa, la aplicación implementa un total de 12 expresiones distintas de $\gamma_{\text{dust}}(f; s)$.

La Tabla B.1 resume los 12 casos implementados. En ella se incluyen, para cada escenario, los valores tabulados a 4 GHz y 8 GHz extraídos de la fuente, junto con los parámetros (a_s, b_s) obtenidos para la ley de potencia.

En la tabla anterior, los niveles de polvo se asocian a las visibilidades discretizadas en el cuerpo principal del capítulo, es decir: Bajo $\leftrightarrow V \approx 120 \text{ m}$, Medio $\leftrightarrow V \approx 40 \text{ m}$, Alto $\leftrightarrow V \approx 10 \text{ m}$ y Extremo $\leftrightarrow V \approx 4 \text{ m}$. De este modo, cada expresión $\gamma_{\text{dust}}(f; s)$ queda completamente determinada por la combinación entre severidad de polvo y nivel de humedad relativa.

En consecuencia, la aplicación evalúa la atenuación por polvo/arena utilizando la expresión correspondiente al escenario ambiental seleccionado por el usuario, preservando así la dependencia conjunta con frecuencia, visibilidad y humedad relativa observada en los datos de

Tabla B.1: Parámetros (a_s, b_s) de la ley de potencia para $\gamma_{\text{dust}}(f; s)$ en los 12 escenarios discretos implementados.

Nivel de polvo	RH	$y_1 = \gamma(4 \text{ GHz})$ [dB/km]	$y_2 = \gamma(8 \text{ GHz})$ [dB/km]	a_s	b_s
Bajo	Baja (~ 20 %)	0.016	0.042	0.002322	1.392317
Bajo	Media (~ 40 %)	0.020	0.054	0.002743	1.432959
Bajo	Alta (~ 60 %)	0.046	0.062	0.025322	0.430634
Medio	Baja (~ 20 %)	0.048	0.126	0.006966	1.392317
Medio	Media (~ 40 %)	0.061	0.161	0.008757	1.400180
Medio	Alta (~ 60 %)	0.138	0.185	0.076788	0.422857
Alto	Baja (~ 20 %)	0.194	0.502	0.028973	1.371631
Alto	Media (~ 40 %)	0.244	0.643	0.035136	1.397938
Alto	Alta (~ 60 %)	0.558	0.742	0.315569	0.411154
Extremo	Baja (~ 20 %)	0.485	1.256	0.072318	1.372780
Extremo	Media (~ 40 %)	0.609	1.609	0.087245	1.401650
Extremo	Alta (~ 60 %)	0.698	1.856	0.098721	1.410898

referencia, pero en una forma simplificada, reproducible y directamente utilizable dentro del motor de cálculo.

Anexo C

Reporte Ejecutivo de Caso de Estudio



The image shows the first page of an executive report. At the top left is the Hatch logo. Below it, the project title 'Proyecto Botadero RDC' and subtitle 'Ingeniería de detalle' are displayed in red. The main topic is 'SELECCIÓN TECNOLOGÍA IIOT PROYECTO RDC'. Below this, the author 'S. Salazar' and date '23-02-2026' are listed. A table titled 'N° de Documento' provides document identification details.

N° de Documento	
Cliente	Cliente
N° Documento Hatch	-
N° Documento Cliente	-

Figura C.1: Reporte Ejecutivo - Página 1.

HATCH Reporte - Selección tecnología IIoT Proyecto RDC

Tecnología recomendada: LoRa / LoRaWAN

Proyecto: Proyecto Botadero RDC

Contexto del proyecto

Sitio / Proyecto	Centro del mapa	Topología seleccionada
Proyecto Botadero RDC	-22.77000, -69.29000	Estrella

Aplicación: Botadero de rípios

Condiciones ambientales

Temp. mín (°C)	Temp. máx (°C)	Nivel de polvo	Nivel EMI	Humedad
-5.0	33.0	Alto (V ≈ 10m)	Medio (Margen 3 dB)	Baja (20%)



Enlaces por grupo de servicio

Grupo	Enlaces	Distancia media (m)	Distancia máx (m)
Monitoreo / Telemetría	5	390.1	811.1

Ranking de Tecnologías (Top 3)

#	Tecnología	Puntuación
1	LoRa / LoRaWAN (915 MHz)	8.85
2	NB-IoT (3GPP Rel-13) (900 MHz)	7.35
3	LTE-M (Cat-M1) (2.6 GHz)	6.55

Tecnologías Descartadas

Las siguientes tecnologías fueron evaluadas pero no cumplieron con los requisitos mínimos del proyecto (cobertura, ancho de banda o disponibilidad) o fueron filtradas por categoría/aplicación.

Tecnología	Motivo principal de descarte	Margen Mín
RFID (activo/pasivo)	Cobertura: margen insuficiente	-10.7 dB
Bluetooth / BLE 5.x	Cobertura: margen insuficiente	-26.0 dB

Figura C.2: Reporte Ejecutivo - Página 2.

HATCH Reporte - Selección tecnología IIoT Proyecto RDC

Tecnología	Motivo principal de descarte	Margen Mín
Zigbee (IEEE 802.15.4)	Cobertura: margen insuficiente	-6.3 dB
Wi-Fi (802.11ac/ax/ah)	Cobertura: margen insuficiente, Consumo energético incompatible	-3.1 dB
5G (NR)	Cobertura: margen insuficiente, Consumo energético incompatible	0.2 dB
4G/LTE (Cat-4+)	Cobertura: margen insuficiente, Consumo energético incompatible	-10.4 dB
WirelessHART (IEC 62591)	Cobertura: margen insuficiente	-17.7 dB
ISA100.11a	Cobertura: margen insuficiente	-15.7 dB

Hipótesis y parámetros del presupuesto de enlace

- Margen objetivo: 8.0 dB.
- Exponente de propagación LOS: 2.7
- Exponente de propagación NLOS: 4.0
- Penalización por obstrucción parcial de Fresnel (LOS*): 6.0 dB
- Penalización por EMI: 3.0 dB

Nota: La penalización LOS* es una degradación fija conservadora. Idealmente debería basarse en el porcentaje de obstrucción de la zona de Fresnel.

Verificación de interferencias por banda de frecuencia

- Banda ISM 915 MHz — Uso compartido. Coexiste con dispositivos ISM. Recomendación: verificar ocupación espectral y duty-cycle regulatorio.
- Banda Sub-GHz (470-510 / 863-928 MHz) — Riesgo moderado. Mejor penetración, verificar duty-cycle y regulación local (SUBTEL).
- Banda licenciada (700-2600 MHz) — Bajo riesgo de interferencia. Espectro protegido por operador. Verificar cobertura y SLA del operador en el sitio minero.

Nota: Esta verificación es orientativa. Para un estudio definitivo se requiere un site survey espectral in-situ.

Inventario de dispositivos

Nodo	TAG	Tipo	Descripción	Grupo de servicio	Alimentación	Notas
1	010-PR-01	Datalogger	Reg. datos Nivel Freático	Monitoreo / Telemetría	Batería	TBC
2	010-PR-02	Datalogger	Reg. datos Nivel Freático	Monitoreo / Telemetría	Batería	TBC
3	010-PR-03	Datalogger	Reg. datos Nivel Freático	Monitoreo / Telemetría	Batería	TBC
4	010-PR-04	Datalogger	Reg. datos Nivel Freático	Monitoreo / Telemetría	Batería	TBC
5	010-PR-05	Datalogger	Reg. datos Nivel Freático	Monitoreo / Telemetría	Batería	TBC
6	010-GW-01	Gateway / AP	Puerta de enlace Backbone	Monitoreo / Telemetría	Red	TBC

Enlaces: 5 · Cobertura: 5/5

Detalle por Enlace (tecnología seleccionada)

Servicio	Orig.	Dest.	Dist (m)	LOS	L_path	L_polvo	L_emi	L_LOS*	Margen
Monitoreo / Telemetría	1	6	240.6	LOS	96.0	0.0	3.0	0.0	58.0

HATCH Reporte - Selección tecnología IIoT Proyecto RDC

Monitoreo / Telemetría	2	6	489.8	LOS*	104.3	0.0	3.0	6.0	43.7
Monitoreo / Telemetría	3	6	92.4	LOS*	84.8	0.0	3.0	6.0	63.3
Monitoreo / Telemetría	4	6	316.4	LOS*	99.2	0.0	3.0	6.0	48.8
Monitoreo / Telemetría	5	6	811.1	LOS*	110.2	0.0	3.0	6.0	37.7

Arquitectura sugerida

- Topología objetivo: Estrella con tecnología LoRa / LoRaWAN.
- Gateways ubicados en nodos hub/estrella o puntos con energía y backhaul disponible.

Notas y consideraciones

- Este análisis constituye una selección preliminar de tecnología candidata. Los resultados deben ser validados con el proveedor de la tecnología mediante su plataforma de simulación o herramientas de planificación RF propias.
- Verificar el cumplimiento de la normativa local vigente antes de la implementación definitiva.
- Los parámetros de propagación utilizados corresponden a modelos teóricos simplificados; la ingeniería de detalle debe considerar las condiciones reales del sitio y las especificaciones técnicas del fabricante.

Este reporte constituye una evaluación preliminar de selección tecnológica basada en requisitos de alto nivel y modelos teóricos de propagación. No reemplaza la ingeniería ni la validación por parte del proveedor de la tecnología seleccionada. La factibilidad definitiva debe confirmarse mediante herramientas de planificación RF del fabricante, considerando las condiciones reales del sitio, la disposición final de equipos y la normativa aplicable.

Anexo D

Hojas de Datos de dispositivos IIoT

**EJX110B
EJX310B
EJX430B**

**EJX510B
EJX530B**

EJX210B

EJX118B EJX438B

Wireless Pressure Transmitter

EJX-B series measure differential pressure, absolute pressure or gauge pressure of liquid, gas, steam flow, as well as flow and liquid level. The accuracy of these products is the same as wired transmitters. The low power consumption design achieves long battery life. Extension coaxial cables allow flexible antenna installation.

EJX Series		Mount type	Input	Model
Input	Differential pressure Absolute pressure Gauge pressure	Traditional -mount	Differential pressure	EJX110B
			Absolute pressure	EJX310B
			Gauge pressure	EJX430B
Update period	0.5 - 3600 seconds	In-Line Mount	Absolute pressure	EJX510B
			Gauge pressure	EJX530B
Battery life	10 years (30 seconds update time)	Flange Mounted	Differential Pressure	EJX210B
Ambient temp. limit	-40 to 85°C (-40 to 185°F)*3	Diaphragm Sealed	Differential Pressure	EJX118B
			Gauge Pressure	EJX438B

*3: -40 to 60°C (-40 to 140°F) for EJX118B/438B

FN510

Field Wireless Multi-Function Module

FN510 and FN120 convert a variety of I/O to a wireless device. Batteries are included and power the FN120. External power may be required for some I/O. Extension cables allow flexible FN120 installation.

IO function	FN510 (+FN120)				FN510-C (+FN120)
	AI (4-20 mA)	DI	PULSE input	DO	AI (vibration)
IO channels	1	2	1	1	1
Update period	1 - 3600 seconds			2 - 3600 seconds	10 - 3600 seconds
Battery life	10 years (10 sec. update time)		3 years (30 sec. update time) with continuous DO=ON		10 years (60 sec. update time)
Power supply to external device	N/A				Available (for LN01 sensor)
Ambient temp. limit	-40 to 85°C (-40 to 185°F)				

Figura D.1: Hoja de datos instrumentación Yokogawa ISA100.11a.

Specifications	High performance sensor
Temperature measurement (machine skin temperature)	
Measurement range	-40° C to +85° C
Resolution	0.1° C
Accuracy	+/-0.5° C
Vibration measurement	
Acceleration, low frequency (x, y, z direction)	
Amplitude range	0.03 - 157 m/s2 (16g)
Frequency bandwidth	0.1 Hz – 1.5 kHz
Acceleration, high frequency (z direction)	
Amplitude range	0.1 - 450 m/s2 (50g)
Frequency bandwidth	100 Hz - 20 kHz
Magnetic field measurement	
Magnetic field (x, y, z direction)	
Amplitude range	1 – 1600 µT
Frequency bandwidth	0.1 – 250 Hz
Ultrasonic sound measurement	
Microphone	
Amplitude range	0.6 mN/m2 – 20 N/m2
Frequency bandwidth	100 Hz – 80 kHz
Wireless communication	
Communication standards	Bluetooth 5.0, Bluetooth Low Energy
Radio standard	IEEE 802.15.4
Frequency	2.4 GHz, license free ISM band
Range (nominal)	>200 m @ line of sight
Security	
Encryption	128-bit AES encryption
Authentication	IEC 62351 (role-based access control)
Power	
Battery type (not replaceable)	C-type
Battery design life	Up to 15 years operation under standard conditions
Environmental	
Temperature	Operation: -40° C to +85° C Storage: <30° C
IP class	IP66/67 (dust-tight and resistant to powerful water jetting and submersion)
Chemical tolerance	See chemical tolerance sheet for PBT (Polybutylene terephthalate)
Certifications	
Hazardous areas	Ex ia I Ma -40 oC ≤ Tamb ≤ +85 °C (Mining) Ex ia IIC T4 Ga -40 oC ≤ Tamb ≤ +85 oC (Gas) Ex ia IIIC T157 Da -40 oC ≤ Tamb ≤ +85 oC (Dust) CI I, Div 1, Gr A, B, C and D T4 CI II, Div 1, Gr E, F and G T4 CI III, Div 1
Radio	EN 300 328 v.2.1.1 EN 301 330 v.2.1.1 FCC/IC
EMC	
Immunity	EN/IEC 61000-6-2
Emission	EN/IEC 61000-6-3
Physical	
Dimensions (W x D x H)	82 mm x 69 mm x 45 mm
Weight	185 g
Case material	Stainless steel/reinforced PBT
Mounting	On equipment housing or frame. Please consult installation manuals. M6 or UNF ¼" / 28 screw

Figura D.2: Hoja de datos instrumentación ABB BLE, monitoreo de motores.

Product Data Sheet

00813-0600-4410, Rev AJ
June 2025

Emerson Wireless 1410S Gateway with 781S Smart Antenna



- Gateway connects the *WirelessHART*® self-organizing networks with any host system.
- Easy configuration and management of self-organizing networks.
- Easy integration into control systems and data applications through serial and Ethernet connections.
- Greater than 99 percent data reliability with industry proven security.
- Ability to leverage sensor data from critical assets to eliminate blind spots and improve productivity and safety of operations.

ROSEMOUNT™


EMERSON

Figura D.3: Hoja de datos gateway Emerson WirelessHART.

Technical Specifications

RADIO AND NETWORK SPECIFICATIONS			
Radio Band	ISM Sub GHz		
Sensitivity	Down to -137 dBm (SF11)		
Antenna ¹	Integrated internal antennas GPS, 4G, LoRa (peak gain=2.6dBi)		
SUPPORTED UNLICENSED RADIO BANDS			
ISM frequencies	Region	Rx	Tx
863-874.4 MHz	EMEA, India	863- 873MHz	863-873MHz
902-928 MHz	North America	902-915MHz	922-928MHz
915-928MHz	APAC, Latin America	915-928 MHz	915-928MHz
NETWORK INTERFACES			
Ethernet	10/100 Ethernet WAN (RJ45 PoE).		
WWAN	Integrated 4G modem & antenna with worldwide LTE, UMTS/HSPA+ and GSM/GPRS/EDGE coverage.		
WWAN CAPABILITIES			
Technologies	Band	Data rate	
LTE	Band 1 (2100)	LTE FDD: - Max 150Mbps (DL) - Max 50Mbps (UL) LTE TDD: - Max 130Mbps (DL) - Max 35Mbps (UL)	
	Band 2 (1900 PCS)		
	Band 3 (1800+)		
	Band 4 (1700/2100 AWS-1)		
	Band 5 (850)		
	Band 7 (2600)		
	Band 8 (900)		
	Band 12 (700 ac)		
	Band 13 (700 c)		
	Band 18 (800 lower)		
	Band 19 (800 upper)		
	Band 20 (800 DD)		
	Band 25 (1900+)		
	Band 26 (850+)		
Band 28 (700 APT)			
Band 38 (TD 2600)			
Band 39 (TD 1900+)			
Band 40 (TD 2300)			
Band 41 (TD 2600+)			
WCDMA	Band 1 (2100)	DC-HSDPA: Max 42Mbps (DL) HSUPA: Max 5.7Mbps (UL) WCDMA: - Max 384Kbps (DL) - Max 384Kbps (UL)	
	Band 2 (1900 PCS)		
	Band 4 (1700/2100 AWS-1)		
	Band 5 (850)		
	Band 6 (850 Japan)		
	Band 19 (800 upper)		
GSM	B2 (1900 PCS)	EDGE: - Max 296Kbps (DL) - Max 236.8Kbps (UL) GPRS: - Max 107Kbps (DL) - Max 85.6Kbps (UL)	
	B3 (1800 dcs)		
	B5 (850)		
	B8 (900)		

DEVICE INTERFACES	
Leds	GREEN - power RED - system status
Connector	UBS Type C Port
SIM Card	Mini-SIM card slot
Buttons	Multifunction button for On/Off/Reset
MECHANICAL SPECIFICATIONS	
Weight	265 x 165 x 100 mm (without external LoRa antenna)
Size	1.4 kg (including mounting kit)
Weather protection	IP67
Material	Aluminum (back), polycarbonate (front), Stainless steel (mounting kit)
Operating range	-40° to 60°C
SOFTWARE AND FIRMWARE	
Firmware	CMT Edge
Data and network management	CMT Edge
Configuration/firmware updates	Through web user interface remotely or via local access
Mobile App	Node configuration Online and offline coverage test feature
NETWORK MONITORING	
Local Access	Data collection about network performance for troubleshooting
CMT Edge Level	<ul style="list-style-type: none"> Real-time availability status (on/off) Uptime Power input Health parameters
POWER REQUIREMENTS	
Power source	<ul style="list-style-type: none"> PoE¹ both mode A and mode B (802.3af specifications) 5V through USB C
Mean power consumption ²	4.5 W ³

Figura D.4: Hoja de datos gateway WorldSensing LoRaWAN.