



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño del Sistema de Telecontrol y Comunicaciones
en la ETAP La Lleda e instalaciones asociadas

Autor: Paula Díez Navarro

Director: Ignacio del Río Álvarez

Madrid

Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título **Diseño del Sistema de Telecontrol y Comunicaciones en la ETAP La Lleda e instalaciones asociadas** de la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso **2025/2026** es de mi autoría y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Uso de Inteligencia Artificial¹

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.


He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): *“La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”*. En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

En este Proyecto se ha utilizado inteligencia artificial únicamente en las fases previas al desarrollo del trabajo. En concreto, ha servido de apoyo para organizar las ideas iniciales y plantear una posible estructura del documento, así como para la búsqueda y localización de fuentes bibliográficas y la síntesis de parte de la documentación técnica de partida. A partir de ahí, el desarrollo del contenido, el diseño del sistema, los cálculos de los radioenlaces, la redacción y las conclusiones son íntegramente de elaboración propia.

Firmado (alumno): Paula Díez Navarro

Fecha: 25/06/2026

Autorización para la entrega del Proyecto

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto (si aplica)
32883953W IGNACIO DEL RIO (R: A66141201)	
 Firmado digitalmente por 32883953W IGNACIO DEL RIO (R: A66141201) Fecha: 2026.06.26 17:06:03 +02'00'	

¹ Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)

Fdo:	Fdo:
Fecha:	Fecha:



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño del Sistema de Telecontrol y Comunicaciones
en la ETAP La Lleda e instalaciones asociadas

Autor: Paula Díez Navarro

Director: Ignacio del Río Álvarez

Madrid

Agradecimientos

A mi familia, por ser el pilar fundamental en mi vida, y en especial a mi madre, por siempre creer en mí, incluso en los momentos más difíciles.

DISEÑO DEL SISTEMA DE TELECONTROL Y COMUNICACIONES EN LA ETAP LA LLEDA E INSTALACIONES ASOCIADAS

Autor: Díez Navarro, Paula.

Director: del Río Álvarez, Ignacio.

Entidad Colaboradora: Aguas de Avilés - Asturagua.

RESUMEN DEL PROYECTO

Se diseña el sistema de telecontrol y comunicaciones de la ETAP La Lleda (Avilés) y sus instalaciones asociadas, mediante una arquitectura centralizada en estrella con enlaces radio UHF, autómatas y SCADA. Un estudio de cobertura radioeléctrica confirma la viabilidad de los tres enlaces diseñados.

Palabras clave: telecontrol, SCADA, comunicaciones radio UHF, PLC, ETAP, abastecimiento de agua.

1. Introducción

El agua potable es un servicio público esencial cuya gestión exige fiabilidad, continuidad del suministro y respuesta rápida ante incidencias. La digitalización del ciclo integral del agua, mediante sistemas de telecontrol, permite supervisar y operar a distancia infraestructuras dispersas geográficamente, reduciendo los tiempos de reacción y optimizando la explotación de la red [1]. La ETAP La Lleda, gestionada por Aguas de Avilés, dependía hasta ahora de sistemas de control locales aislados, sin telecontrol unificado ni supervisión en tiempo real. Este proyecto, desarrollado en colaboración con Asturagua, aplica conocimientos de redes y comunicaciones industriales al diseño de un sistema de telecontrol para dicha planta y sus instalaciones asociadas: el bombeo de la Magdalena y los depósitos de La Carriona y La Lleda 2.

2. Definición del proyecto

El objetivo general es diseñar un sistema de telecontrol y comunicaciones técnicamente viable, escalable y coherente. Para ello se define la arquitectura del sistema y la topología de comunicaciones entre las estaciones remotas y el Centro de Control, se seleccionan y justifican los equipos de control y comunicación (autómatas, radio-módems y sistemas radiantes) y se validan los enlaces radioeléctricos mediante simulación. El alcance se centra en el diseño técnico y su validación, sin abordar la ejecución constructiva, y se apoya en información técnica no confidencial facilitada por la entidad colaboradora [2].

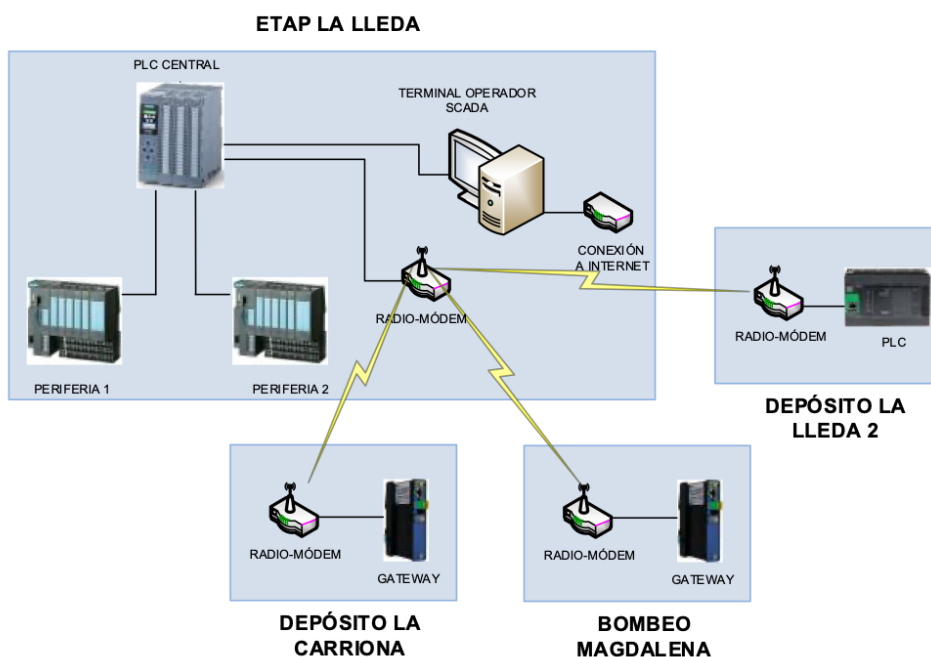


Figura 1 Arquitectura general del sistema de telecontrol (Fuente: Elaboración propia).

3. Descripción del sistema

El sistema se organiza en los tres elementos básicos de todo sistema de telemando. El **Centro de Control**, ubicado en la ETAP, aloja la aplicación SCADA, que interroga cíclicamente a las estaciones remotas, presenta la información al operador mediante sinópticos gráficos y permite enviar órdenes y consignas de funcionamiento. El **sistema de comunicaciones** emplea una topología en estrella, con enlaces Ethernet internos en la ETAP y enlaces radio en banda licenciada UHF (403–470 MHz) hacia las estaciones remotas; el uso de frecuencias legalizadas garantiza el uso del espectro, minimiza interferencias y permite mayores potencias de emisión. Las **estaciones remotas** se basan en autómatas programables Siemens con lógica local, que aseguran el funcionamiento autónomo de cada instalación incluso ante

la pérdida de comunicación. El subsistema software adopta una plataforma SCADA de explotación centralizada con acceso web multiplataforma, cuadros de mando, gestión de alarmas y un entorno orientado a la ciberseguridad.

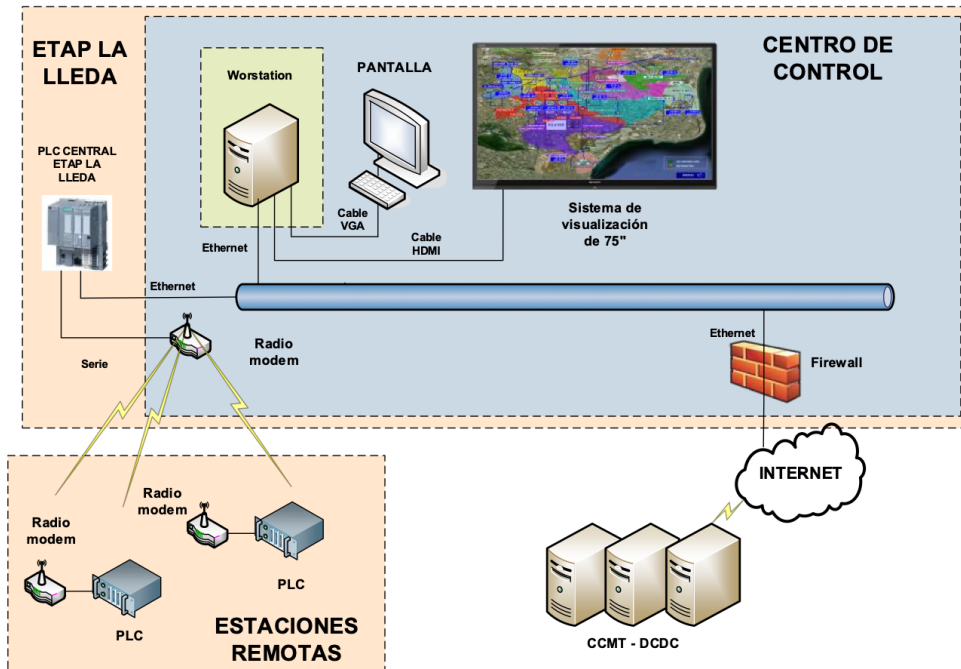


Figura 2 Esquema del sistema de comunicaciones (Fuente: Elaboración propia).

4. Resultados

El principal resultado, desde la perspectiva de las comunicaciones, es la validación de los enlaces radioeléctricos mediante el software Radio Mobile [3], a partir de los parámetros de los equipos (banda 403–470 MHz, antenas omnidireccionales de 4,5 dBi, potencia de 10 W y sensibilidad de -103 dBm) y de datos topográficos públicos. El estudio determina el nivel de campo mediano admisible en recepción, aplicando correcciones por propagación multitrayecto y desvanecimiento, y un coeficiente de seguridad del 20 %. Los resultados confirman que la comunicación es teóricamente viable entre la ETAP y las tres estaciones remotas, con niveles de campo recibido por encima del umbral de sensibilidad y márgenes suficientes en todos los enlaces.

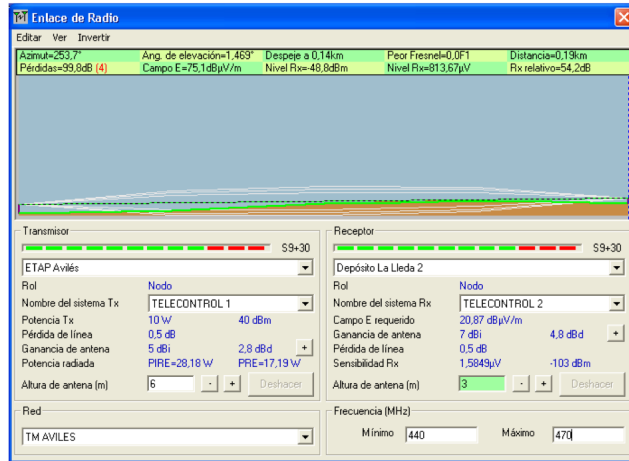


Figura 3 Resultado del estudio de cobertura del enlace ETAP – La Lleda 2 (Fuente: Elaboración propia mediante uso de RadioMobile).

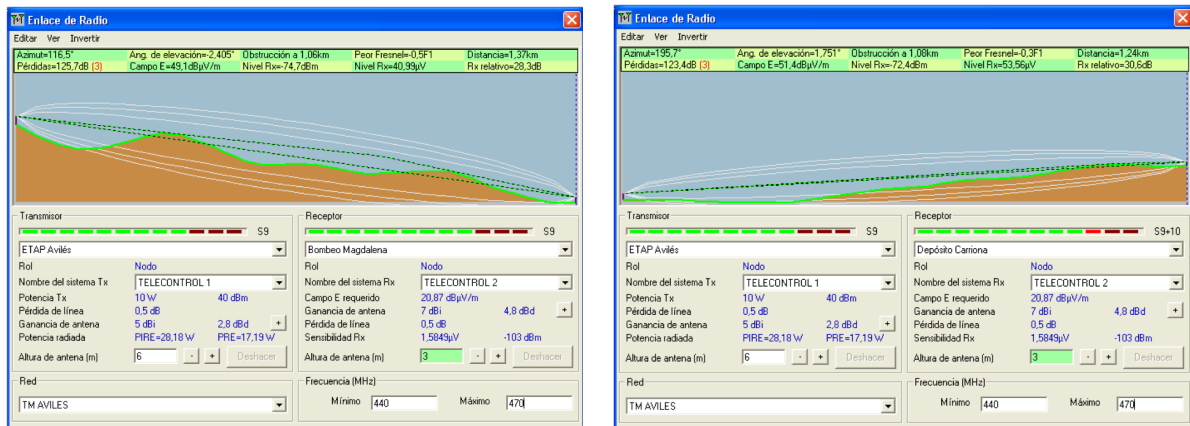


Figura 4 Resultado del estudio de cobertura enlace ETAP - La Magdalena y Carriona (Fuente: Elaboración propia mediante uso de RadioMobile)

5. Conclusiones

Se obtiene una arquitectura de telecontrol técnicamente fundamentada, escalable y replicable a otras instalaciones del servicio, que mejora la supervisión, la operación y el mantenimiento de la red de abastecimiento de Avilés. El estudio de cobertura valida la elección de la banda licenciada UHF y de la topología en estrella, confirmando la robustez de la solución. El proyecto contribuye además a los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6, 9 y 11 [4].

6. Referencias

- [1] Retema, «El viaje del dato del agua. Cómo la digitalización mejora la gestión hídrica en España,» Diciembre 2025. [En línea]. Available: <https://www.retema.es/articulos-reportajes/el-viaje-del-dato-del-agua-como-la-digitalizacion-mejora-la-gestion-hidrica-en>. [Último acceso: Abril 2026].
- [2] Asturagua - Aguas de Avilés, «Información técnica general sobre la ETAP La Lleda y sus instalaciones asociadas,» Avilés, 2024.
- [3] Coudé, Roger, «Radio Mobile – Software de simulación de radiopropagación,» 1998. [En línea]. Available: <http://www.ipellejero.es/radiomobile/>. [Último acceso: Enero 2026].
- [4] United Nations, «Sustainable Development Goals (SDGs) – Agenda 2030,» 2015. [En línea]. Available: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. [Último acceso: Noviembre 2025].

DESIGN OF THE TELECONTROL AND COMMUNICATIONS SYSTEM FOR THE LA LLEDA WATER TREATMENT PLANT (WTP) AND ASSOCIATED FACILITIES.

Author: Díez Navarro, Paula.

Supervisor: del Río Álvarez, Ignacio.

Collaborating Entity: Aguas de Avilés - Asturagua.

ABSTRACT

A telecontrol and communications system is designed for the La Lleda Drinking Water Treatment Plant (DWTP, Avilés) and its associated facilities, based on a centralised star architecture with UHF radio links, programmable controllers and SCADA. A radio-coverage study confirms the feasibility of the three designed links

Keywords: Telecontrol, SCADA, UHF radio communications, PLC, DWTP, water supply

1. Introduction

Drinking water is an essential public service whose management demands reliability, continuity of supply and fast response to incidents. The digitalisation of the integral water cycle, through telecontrol systems, makes it possible to remotely supervise and operate geographically dispersed infrastructures, reducing response times and optimising network operation [1]. The La Lleda DWTP, managed by Aguas de Avilés, had until now relied on isolated local control systems, without unified telecontrol or real-time supervision. This project, developed in collaboration with Asturagua, applies networking and industrial communications knowledge to the design of a telecontrol system for this plant and its associated facilities: the Magdalena pumping station and the La Carriona and La Lleda 2 reservoirs.

2. Project definition

The general objective is to design a technically feasible, scalable and coherent telecontrol and communications system. To this end, the system architecture and the communications topology between the remote stations and the Control Centre are defined, the control and communication equipment (controllers, radio modems and radiating systems) is selected and justified, and the radio links are validated through simulation. The scope focuses on the technical design and its validation, without addressing the construction phase, and relies on non-confidential technical information provided by the collaborating entity [2].

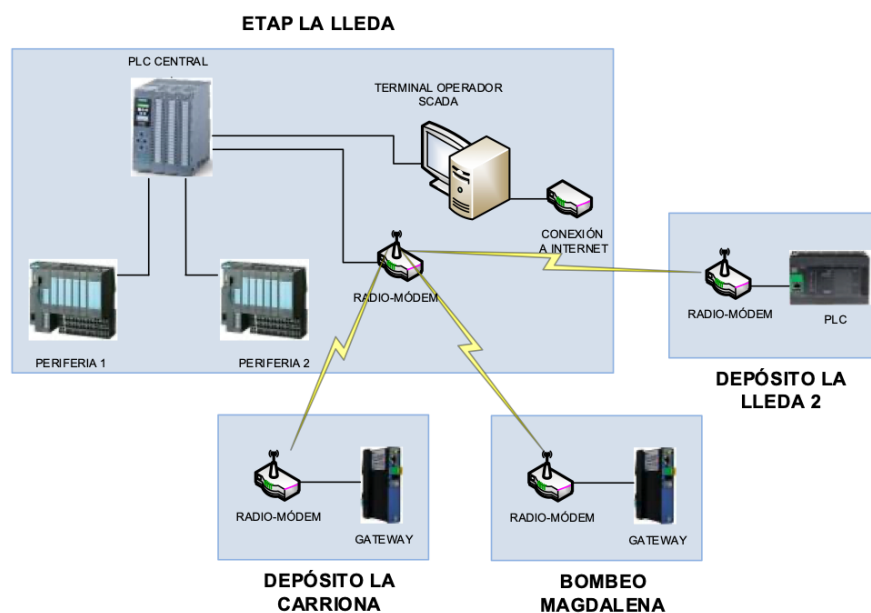


Figura 5 General Architecture of the Telecontrol System (Source: Prepared by the author).

3. System description

The system is organised into the three basic elements of any telecontrol system. The Control Centre, located at the DWTP, hosts the SCADA application, which cyclically polls the remote stations, presents information to the operator through graphical mimic diagrams and allows commands and operating setpoints to be sent. The communications system uses a star topology, with internal Ethernet links at the DWTP and licensed UHF radio links (403–470 MHz) to the remote stations; the use of licensed frequencies guarantees spectrum usage, minimises interference and allows higher transmission power. The remote stations are based on Siemens programmable logic controllers with local logic, ensuring the autonomous operation of each facility even upon

communication loss. The software subsystem adopts a centralised SCADA platform with multi-platform web access, dashboards, alarm management and a cybersecurity-oriented environment.

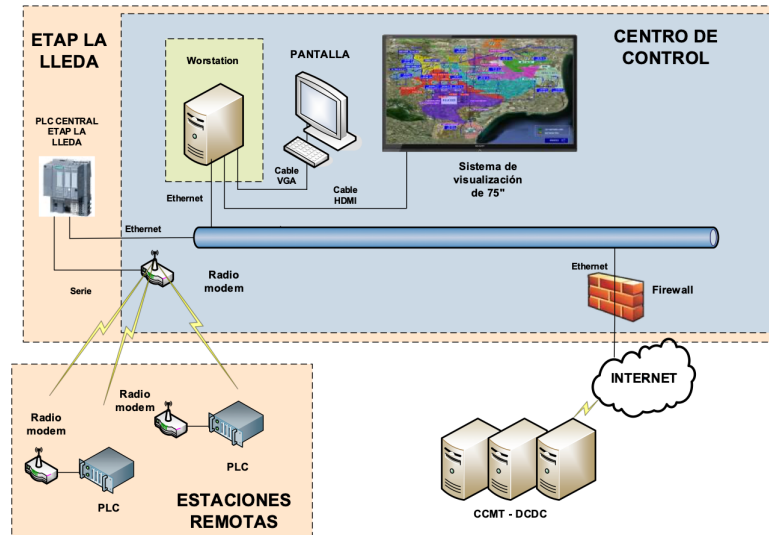


Figura 6 Communications system diagram (Source: prepared by the author)

4. Results

The main result, from a communications perspective, is the validation of the radio links using Radio Mobile software [3], based on the equipment parameters (403–470 MHz band, omnidirectional antennas of 4.5 dBi, 10 W transmission power and –103 dBm receiver sensitivity) and public topographic data. The study determines the admissible median field level at reception, applying corrections for multipath propagation and fading, and a 20 % safety margin. The results confirm that communication is theoretically feasible between the DWTP and the three remote stations, with received field levels above the sensitivity threshold and sufficient margins in all links.

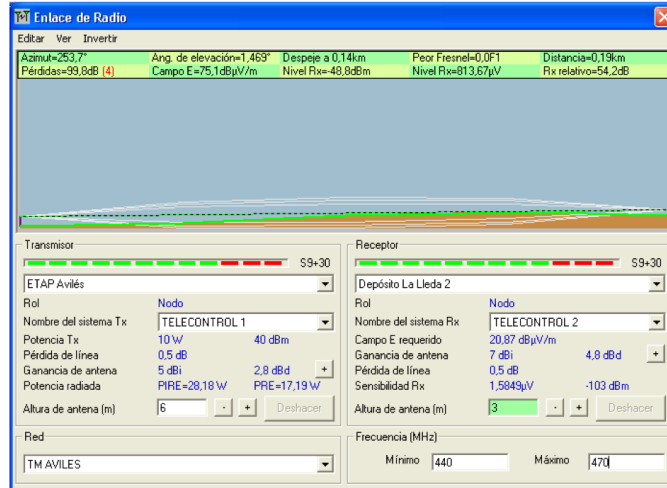
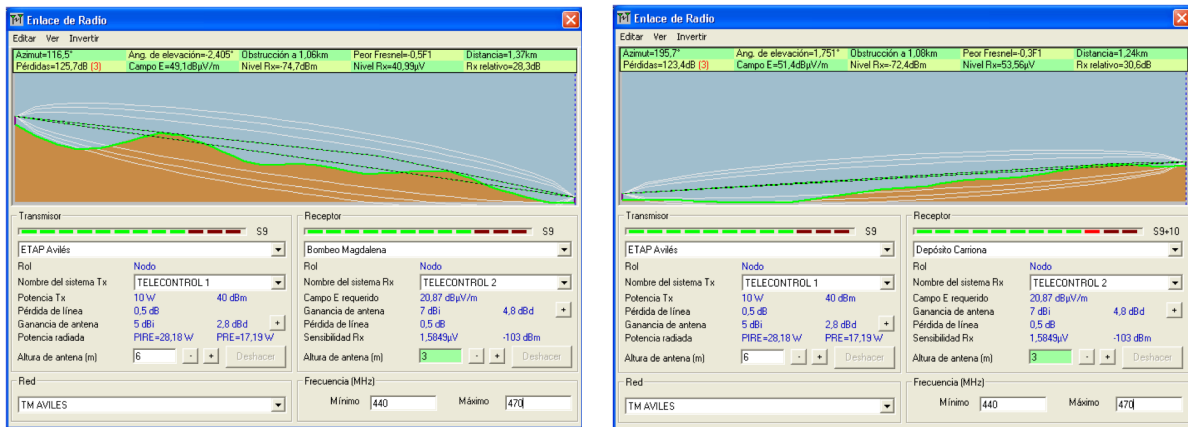


Figura 7 Result of the coverage study for the DWTP – La Lleda 2 (Source: prepared by the autor using RadioMobile).



a) Magdalena

b) Carriona

Figura 8 Result of the coverage study for the DWTP – La Magdalena and Carriona (Source: prepared by the autor using RadioMobile).

5. Conclusion

A technically sound, scalable and replicable telecontrol architecture is obtained, improving the supervision, operation and maintenance of the Avilés water supply network. The coverage study validates the choice of the licensed UHF band and the star topology, confirming the robustness of the solution. The project also contributes to Sustainable Development Goals 6, 9 and 11 [4].

6. References

- [1] Retema, «El viaje del dato del agua. Cómo la digitalización mejora la gestión hídrica en España,» December 2025. [Online]. Available: <https://www.retema.es/articulos-reportajes/el-viaje-del-dato-del-agua-como-la-digitalizacion-mejora-la-gestion-hidrica-en>. [Accesed: April 2026].
- [2] Asturagua - Aguas de Avilés, «Información técnica general sobre la ETAP La Lleda y sus instalaciones asociadas,» Avilés, 2024.
- [3] Coudé, Roger, «Radio Mobile – Software de simulación de radiopropagación,» 1998. [Online]. Available: <http://www.ipellejero.es/radiomobile/>. [Accesed: January 2026].
- [4] United Nations, «Sustainable Development Goals (SDGs) – Agenda 2030,» 2015. [Online]. Available: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. [Accesed: November 2025].

Índice de la memoria

<i>Índice de la memoria</i>	<i>XVII</i>
<i>Índice de figuras</i>	<i>XXII</i>
<i>Índice de tablas</i>	<i>XXIV</i>
Capítulo 1. Introducción	25
1.1 Motivación del proyecto	25
1.2 Entidad colaboradora	26
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías	28
2.1. Sistemas de telecontrol y telemando	28
2.2. Sistemas SCADA	28
2.3. Autómatas programables (PLC)	30
2.4. Comunicaciones industriales y protocolos	31
2.5. Comunicaciones radio en banda licenciada UHF	32
2.6. Herramienta de simulación: Radio Mobile	33
Capítulo 3: Estado de la Cuestión	35
3.1. Soluciones existentes en el mercado	35
3.2. Trabajos académicos y proyectos de referencia	36
3.3. Identificación del vacío y conclusión	38
Capítulo 4. Definición del Trabajo	39
4.1 Justificación	39
4.1.1 Análisis crítico de las soluciones existentes	39
4.1.2 Propuesta de valor	40

4.2 Objetivos.....	41
Objetivo general	41
Objetivos específicos.....	41
4.3 Metodología.....	42
4.4 Planificación y Estimación Económica	45
4.4.1 Planificación temporal.....	45
4.4.2. Estimación del coste de desarrollo	46
4.4.3 Presupuesto de ejecución del proyecto.....	47
4.5 Requisitos del sistema.....	49
4.5.1. Requisitos funcionales.....	49
4.5.2. Requisitos no funcionales.....	50
Capítulo 5. Sistema Desarrollado.....	52
5.1 Análisis del Sistema	52
5.1.1. Instalaciones objeto del proyecto	52
5.1.2. Identificación de señales y elementos	53
5.1.2. Necesidades de comunicación.....	53
5.2. Arquitectura general del sistema	54
5.2.1. Topología en estrella	54
5.2.2. Elementos de la arquitectura	55
5.2.3. Flujo de información	56
5.3 Diseño del sistema de comunicaciones	56
5.3.1. Elección de la tecnología de transmisión	56
5.3.2. Banda de frecuencias y topología de la red.....	58
5.3.3. Equipos de comunicaciones	59
5.3.4. Legalización de la red radioeléctrica.....	60
5.4. Diseño del Centro de Control	61
5.4.1. Subsistema hardware del puesto de operador	61
5.4.2. Armario de control central	63
5.4.3. Integración y funcionamiento del conjunto.....	64
5.5. Diseño de las estaciones remotas	65
5.5.1. ETAP La Lleda.....	65
5.5.2. Bombeo de la Magdalena	66
5.5.3. Depósito de La Carriona	67

5.5.4. Depósito de La Lleda 2	67
5.5.5. Síntesis comparativa de las estaciones remotas	68
5.6. Diseño del subsistema software (SCADA).....	69
5.6.1. Plataforma de explotación centralizada.....	69
5.6.2. Modelado de la información: el concepto de activo.....	72
5.6.3. Supervisión y visualización.....	72
5.6.4. Gestión de alarmas y notificaciones.....	73
5.6.5. Control y envío de consignas	73
5.7 Consideraciones para la implantación del sistema.....	74
5.7.1. Despliegue del equipamiento de campo.....	74
5.7.2. Configuración de la red de comunicaciones	75
5.7.3. Programación de la lógica de control.....	75
5.7.4. Configuración del subsistema SCADA.....	76
5.7.5. Legalización, pruebas y puesta en servicio	76
Capítulo 6. Análisis de Resultados.....	78
6.1. Planteamiento del estudio de cobertura	78
6.1.1. Localización de las estaciones.....	78
6.1.2. Modelo de propagación y herramienta.....	80
6.2. Parámetros de la simulación.....	80
6.3. Cálculo del nivel de campo mediano.....	81
6.4. Balance de enlace analítico	82
6.4.1. Metodología de cálculo	82
6.4.2. Resultados del balance de enlace	82
6.5. Resultados de la simulación	84
6.6. Análisis crítico de los resultados.....	87
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	89
7.1. Conclusiones generales.....	89
7.2. Grado de cumplimiento de los objetivos.....	90
7.3. Aportaciones del trabajo.....	92
7.4. Trabajos futuros	93

<i>Bibliografía</i>	95
<i>ANEXO I: Alineación del proyecto con los ODS</i>	99
Introducción	99
I.2. ODS 6. Agua limpia y saneamiento	99
I.3. ODS 9. Industria, innovación e infraestructura	100
I.4. ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles	101
I.5. Contribuciones secundarias: ODS 7 y ODS 12	101
I.6. Síntesis	102
<i>ANEXO II: Cálculos del balance de enlace radioeléctrico</i>	103
II.1. Introducción y objeto del anexo	103
II.2. Datos de partida	103
II.3. Cálculo de las distancias entre estaciones	104
II.4. Cálculo de las pérdidas de propagación en espacio libre	105
II.5. Balance de potencia y margen de enlace	105
II.6. Estimación de la primera zona de Fresnel	107
II.7. Conclusión del anexo	108
<i>ANEXO III: Desglose de señales por instalación</i>	109
III.1. Objeto del anexo	109
III.2. Señales de la ETAP La Lleda	109
III.3. Señales del depósito de La Lleda 2	110
III.4. Señales del bombeo de la Magdalena y del depósito de La Carriona	110
III.5. Síntesis	111
<i>ANEXO IV: Características técnicas de los equipos principales</i>	113
IV.1. Objeto del anexo	113
IV.2. Equipos de control: autómatas programables	113
IV.3. Equipos de comunicaciones: radio-módems	114
IV.4. Sistemas radiantes: antenas	115

IV.5. Síntesis.....	116
<i>ANEXO V: Esquemas eléctricos y de comunicaciones del proyecto.....</i>	<i>117</i>
V.1. Objeto del anexo	117
V.2. Esquemas seleccionados	117
V.3. Observaciones	125

Índice de figuras

Figura 1 Esquema del sistema de comunicaciones (Fuente: Elaboración propia).	9
Figura 2 Resultado del estudio de cobertura del enlace ETAP – La Lleda 2 (Fuente: Elaboración propia mediante uso de RadioMobile).	10
Figura 3 Resultado del estudio de cobertura enlace ETAP - La Magdalena y Carriona (Fuente: Elaboración propia mediante uso de RadioMobile).....	10
Figura 4 General Architecture of the Telecontrol System (Source: Prepared by the author).	13
Figura 5 Communications system diagram (Source: prepared by the author)	14
Figura 6 Result of the coverage study for the DWTP – La Lleda 2 (Source: prepared by the autor using RadioMobile).....	15
Figura 7 Result of the coverage study for the DWTP – La Magdalena and Carriona (Source: prepared by the autor using RadioMobile).....	15
Figura 8 Logotipo de Aguas de Avilés. (Fuente: Aguas de Avilés).....	27
Figura 9 Localización de la ETAP La Lleda (Fuente: elaboración propia a partir de Google Earth).	27
Figura 10 Cuadro de mando general de un sistema SCADA [2].....	29
Figura 11 Sinóptico de procesos de la línea de agua de un sistema SCADA [2].....	30
Figura 12 Estructura del autómatas programable Siemens SIMATIC ET200SP empleado en el sistema: CPU y módulos de entradas/salidas digitales y analógicas [8]	31
Figura 13 Ubicación de la banda UHF en el espectro radioelétrico (Fuente: Elaboración propia).....	33
Figura 14 Esquema de la metodología seguida en el proyecto (Fuente: Elaboración propia).	44
Figura 15 Diagrama de Gantt de la planificación del proyecto. (Fuente: Elaboración propia).	46
Figura 16 Arquitectura funcional general del sistema de telecontrol (Fuente: Elaboración propia).....	55

Figura 17 Arquitectura de red del sistema de telecontrol de la ETAP la Lleda (Fuente: Elaboración propia).	63
Figura 18 Arquitectura de red segmentada IT/OT del centro de control CCMT (Fuente: Elaboración propia a partir de IEC 62443 [11]).	71
Figura 19 Ubicación de las estaciones en el entorno de Avilés (Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth).	79
Figura 20 Perfil del enlace ETAP - Depósito La Lleda 2. (Fuente: Elaboración propia mediante RadioMobile)	85
Figura 21 Perfil del enlace ETAP - Depósito Carriona (Fuente: Elaboración propia mediante RadioMobile).	85
Figura 22 Perfil del enlace ETAP - Bombeo Magdalena (Fuente: Elaboración propia mediante RadioMobile).	86

Índice de tablas

Tabla 1 Comparativa de los trabajos de referencia frente al presente proyecto (Elaboración propia a partir de [15] [16] [17])	37
Tabla 2 Estimación del coste de desarrollo del proyecto.	47
Tabla 3 Resumen del presupuesto de ejecución del proyecto. Fuente: Asturagua [18]	48
Tabla 4 Comparativa de tecnologías de comunicación para las estaciones remotas.....	58
Tabla 5 Equipos de comunicación de cada estación.....	60
Tabla 6 Síntesis comparativa de las estaciones del sistema	68
Tabla 7 Localización de las estaciones (WGS84).	79
Tabla 8 Distancia de cada enlace al centro de control.....	79
Tabla 9 Parámetros de transmisión y recepción	81
Tabla 10 Resultados del balance de enlace para cada radioenlace.....	83
Tabla 11 Radio de la primera zona de Fresnel en el punto medio de cada enlace	84
Tabla 12 . Síntesis de la contribución del proyecto a los ODS	102
Tabla 13 Parámetros de los equipos empleados en el balance de enlace	103
Tabla 14 Distancias de los enlaces calculadas mediante la fórmula del semiverseno	104
Tabla 15 Resultados del balance de enlace para cada radioenlace.....	106
Tabla 16 Radio de la primera zona de Fresnel en el punto medio de cada enlace	107
Tabla 17 Desglose de señales de los armarios de la ETAP La Lleda.....	109
Tabla 18 Desglose de señales del depósito la Lleda 2 (Elaboración propia a partir de [18])	110
Tabla 19 Síntesis del desglose de señales por instalación (Fuente: Elaboración propia a partir de [18])	111
Tabla 20 Principales módulos de control empleados. Fuente: [18].....	114
Tabla 21 Síntesis de los equipos principales del sistema. Fuente: [18].....	116

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

El agua potable constituye un servicio público esencial cuya gestión exige garantías de calidad, continuidad del suministro y capacidad de respuesta rápida ante cualquier incidencia. En las últimas décadas, además, las entidades gestoras del ciclo integral del agua afrontan una presión creciente sobre los recursos hídricos y unas exigencias regulatorias cada vez mayores, lo que las obliga a operar infraestructuras complejas y dispersas geográficamente con criterios de eficiencia, fiabilidad y sostenibilidad [5]. En este contexto, la modernización tecnológica de las instalaciones se ha convertido en una necesidad estratégica más que en una simple mejora opcional.

Como respuesta a este reto, la digitalización del ciclo integral del agua se ha consolidado como una de las herramientas más eficaces. En concreto, los sistemas de telecontrol permiten supervisar y operar a distancia captaciones, estaciones de tratamiento, bombes y depósitos, ya que integran en tiempo real la información procedente del campo y posibilitan la actuación remota sobre los elementos electromecánicos de la red [1]. De este modo, se reducen los tiempos de reacción ante las incidencias, se optimiza la explotación de las instalaciones y se habilitan estrategias de mantenimiento predictivo, frente al modelo tradicional, que era reactivo y dependía en gran medida de la supervisión manual.

El presente Trabajo de Fin de Grado se enmarca precisamente en esta tendencia y aborda el diseño del sistema de telecontrol y comunicaciones de la Estación de Tratamiento de Agua Potable (ETAP) de La Lleda y de sus instalaciones asociadas. Para ello, el trabajo se ha desarrollado en colaboración con Asturagua, entidad que ha facilitado la información técnica y el contexto necesarios para abordar el proyecto desde una perspectiva realista.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Hasta la fecha, las instalaciones dependientes de la ETAP La Lleda contaban con sistemas de control locales, que operaban de forma independiente y sin comunicación entre las distintas plantas. Esta situación de partida presentaba varias limitaciones de calado. En

primer lugar, los tiempos de reacción ante los incidentes resultaban elevados, puesto que no existía una supervisión remota que permitiera detectarlos de forma temprana. En segundo lugar, la ausencia de una visión global en tiempo real dificultaba la optimización del conjunto de la red. Por último, el mantenimiento era fundamentalmente correctivo, lo que incrementaba los costes y elevaba el riesgo de fallos no detectados a tiempo [1].

Frente a este escenario, la tendencia actual en el sector del agua se orienta de forma decidida hacia la digitalización y la integración de las instalaciones en plataformas de telecontrol unificadas, que combinan autómatas programables (PLC) con sistemas SCADA y comunicaciones industriales [3]. De hecho, diversas entidades gestoras en España han acometido recientemente proyectos de unificación de sus sistemas de supervisión, con los que han integrado en una única plataforma instalaciones que antes funcionaban de manera aislada y han obtenido mejoras notables tanto en la coordinación operativa como en la capacidad de respuesta. Estos precedentes confirman que la modernización del telecontrol no es solo una mejora deseable, sino una línea de actuación consolidada en el sector [1].

Por todo ello, la modernización del sistema de la ETAP La Lleda responde a una doble motivación. Por una parte, atiende a una necesidad operativa concreta, ya que permite superar las limitaciones del control local aislado y dotar a la entidad de una herramienta de supervisión y operación centralizada. Por otra parte, constituye una oportunidad de mejora del servicio público con un impacto social y ambiental significativo, en la medida en que contribuye a una gestión más eficiente y sostenible de un recurso tan esencial como el agua. A estos motivos se suma, finalmente, una motivación de carácter académico, pues el proyecto ofrece la ocasión de aplicar a un entorno real los conocimientos de redes, control y comunicaciones industriales adquiridos a lo largo del Grado, integrando el diseño de arquitecturas de comunicación con la simulación de enlaces radioeléctricos.

1.2 ENTIDAD COLABORADORA

Aguas de Avilés es una sociedad de economía mixta constituida por el Ayuntamiento de Avilés y Asturagua, que tiene encomendada la prestación del servicio de captación,

transporte, potabilización y distribución de agua potable en el concejo de Avilés, en el Principado de Asturias. En consecuencia, la entidad gestiona el conjunto de infraestructuras que componen el ciclo del agua en su ámbito de actuación, desde las captaciones iniciales hasta la red de distribución que llega a los abonados. En la Figura 8 se muestra el logotipo corporativo de la entidad.



Figura 1 Logotipo de Aguas de Avilés. (Fuente: Aguas de Avilés).

En coherencia con su compromiso con una gestión eficiente basada en la innovación tecnológica, Aguas de Avilés ha impulsado en los últimos años la modernización de la supervisión y el control remoto de sus instalaciones. El propósito de esta iniciativa es doble: por un lado, mejorar la fiabilidad del servicio y optimizar la operación diaria; por otro, avanzar en la digitalización del ciclo integral del agua en línea con las tendencias del sector. Es en este marco donde se inscribe el presente proyecto, que ha contado con la colaboración técnica de Asturagua como entidad responsable de la explotación de las instalaciones. A continuación, la Figura 9 muestra la localización de la ETAP La Lleda y de sus instalaciones asociadas en el concejo de Avilés.

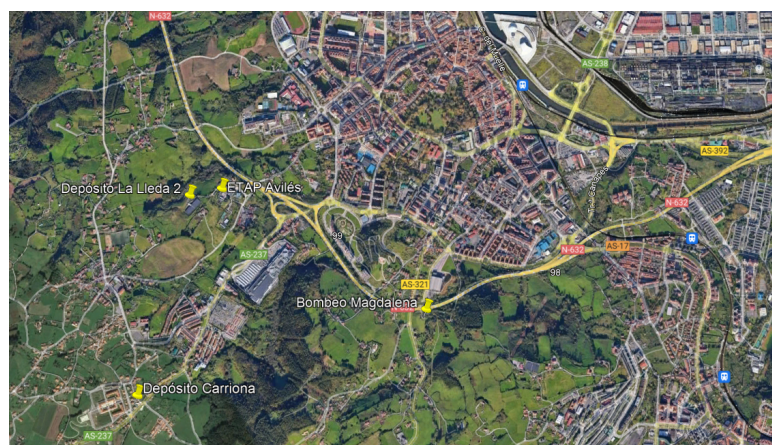


Figura 2 Localización de la ETAP La Lleda (Fuente: elaboración propia a partir de Google Earth).

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

Antes de abordar el diseño del sistema, en este capítulo se describen las principales tecnologías, conceptos y herramientas en los que se apoya el proyecto. El objetivo es proporcionar la base conceptual necesaria para comprender las decisiones de diseño que se justifican en los capítulos posteriores, abarcando desde los sistemas de telecontrol y supervisión hasta las tecnologías de comunicación y las herramientas de simulación empleadas.

2.1. SISTEMAS DE TELECONTROL Y TELEMANDO

Un sistema de telecontrol aplicado al ciclo integral del agua permite supervisar y operar a distancia las instalaciones que componen la red, integrando la información procedente del campo y posibilitando la actuación remota sobre los elementos electromecánicos [1]. Mediante estos sistemas es posible conocer en tiempo real parámetros como la presión, los niveles, los caudales o el estado de funcionamiento de los equipos en bombeos y depósitos. Asimismo, permiten actuar a distancia sobre determinados elementos maniobrables, como válvulas o bombas, ya sea de forma manual o programada.

La información que proporciona el telecontrol contribuye a mejorar la explotación y la gestión diaria de la red, puesto que facilita trabajar cerca del punto óptimo de funcionamiento. Además, el análisis posterior de los datos históricos permite detectar tendencias y adoptar medidas correctoras de manera anticipada. Desde un punto de vista estructural, un sistema de telemando se compone de tres elementos básicos que trabajan de forma coordinada: un Centro de Control encargado de la supervisión y el mando, un conjunto de estaciones remotas distribuidas geográficamente, y un sistema de comunicaciones que interconecta ambos extremos [6].

2.2. SISTEMAS SCADA

El término SCADA (del inglés *Supervisory Control And Data Acquisition*, es decir, Supervisión, Control y Adquisición de Datos) designa la aplicación informática que, residente en el Centro de Control, realiza la supervisión y el control del proceso [7]. El

sistema SCADA interroga cíclicamente a las estaciones remotas mediante un protocolo de comunicaciones, accede a los datos adquiridos por sus autómatas y los presenta al operador de forma comprensible [1].

La interfaz del SCADA se materializa en diferentes elementos de visualización. Entre ellos destacan los sinópticos gráficos, que representan esquemáticamente la red hidráulica; las listas de señales y de alarmas, que informan del estado de los equipos; y las curvas de tendencia e históricos, que permiten analizar la evolución de las variables a lo largo del tiempo [6]. Por otra parte, el sistema gestiona distintos niveles de seguridad de acceso, de manera que cada usuario dispone únicamente de los permisos correspondientes a su perfil. Conviene precisar que, mientras el SCADA se encarga principalmente de la supervisión y la visualización, el control directo de los procesos recae en los autómatas programables instalados en cada estación [7]. En la Figura 10 se muestra un ejemplo de cuadro de mando general, en el que se presentan de forma sintética los principales indicadores de la explotación.

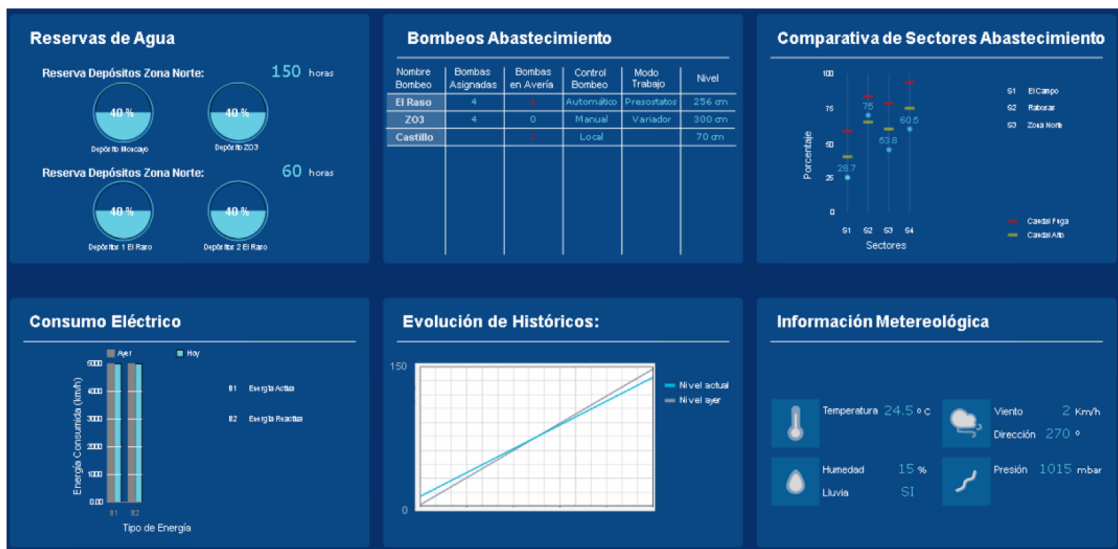


Figura 3 Cuadro de mando general de un sistema SCADA [2].

La Figura 11, por su parte, recoge un sinóptico de procesos de la línea de agua, donde la red hidráulica se representa de manera esquemática junto al estado de sus elementos.

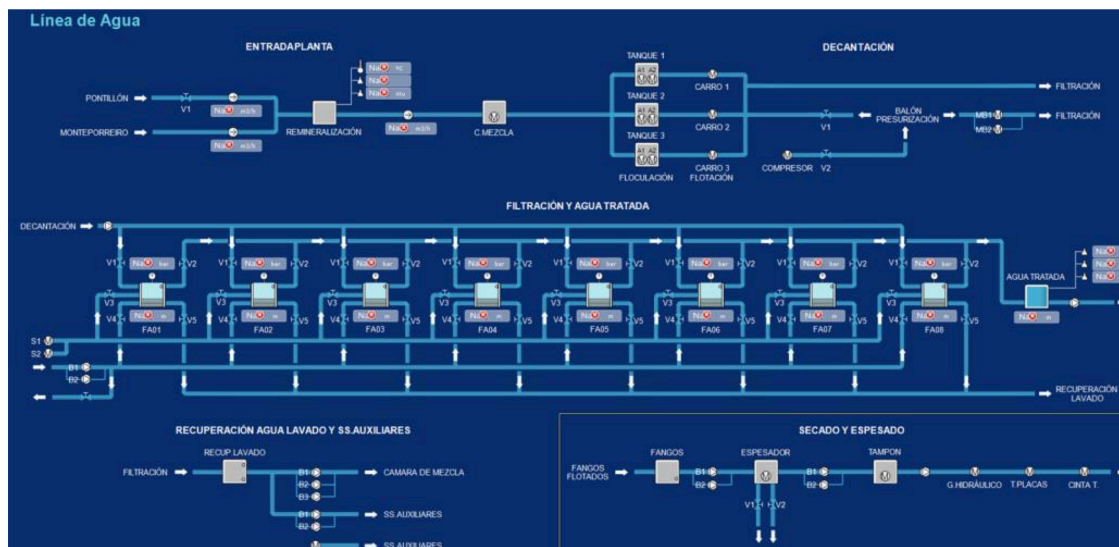


Figura 4 Sinóptico de procesos de la línea de agua de un sistema SCADA [2].

2.3. AUTÓMATAS PROGRAMABLES (PLC)

Las estaciones remotas se basan en autómatas programables o PLC (del inglés *Programmable Logic Controller*), dispositivos electrónicos diseñados para controlar procesos industriales mediante un programa almacenado en su memoria [8]. A diferencia de los sistemas de control tradicionales basados en relés y cableado fijo, un PLC permite modificar su comportamiento simplemente reprogramándolo, sin necesidad de alterar el hardware. Esta flexibilidad, unida a su robustez frente a condiciones ambientales adversas, los ha convertido en el elemento de control de referencia en la automatización industrial.

El funcionamiento de un PLC se basa en un ciclo repetitivo conocido como ciclo de *scan*, que comprende la lectura de las entradas, la ejecución del programa de control y la actualización de las salidas [9]. Estructuralmente, un autómata se compone de una unidad central de proceso (CPU), módulos de entradas y salidas (digitales y analógicas), una fuente

de alimentación e interfaces de comunicación [9]. En función de su arquitectura, los PLC pueden ser compactos, que integran todos los elementos en un único cuerpo, o modulares, que permiten añadir módulos según las necesidades del proceso [9]. Esta última característica resulta especialmente relevante en sistemas de telecontrol, ya que facilita la ampliación de las estaciones ante la incorporación de nueva instrumentación.

En el sistema diseñado se emplea periferia de control de la familia Siemens, lo que condiciona la compatibilidad de protocolos con el equipamiento preexistente [2]. La lógica local implementada en estos autómatas es la que garantiza el funcionamiento autónomo de cada instalación, incluso ante una eventual pérdida de comunicación con el Centro de Control. En la Figura 12 se muestra la estructura del autómata programable empleado, basado en la periferia Siemens SIMATIC ET200SP, con su CPU y los módulos de entradas y salidas digitales y analógicas.

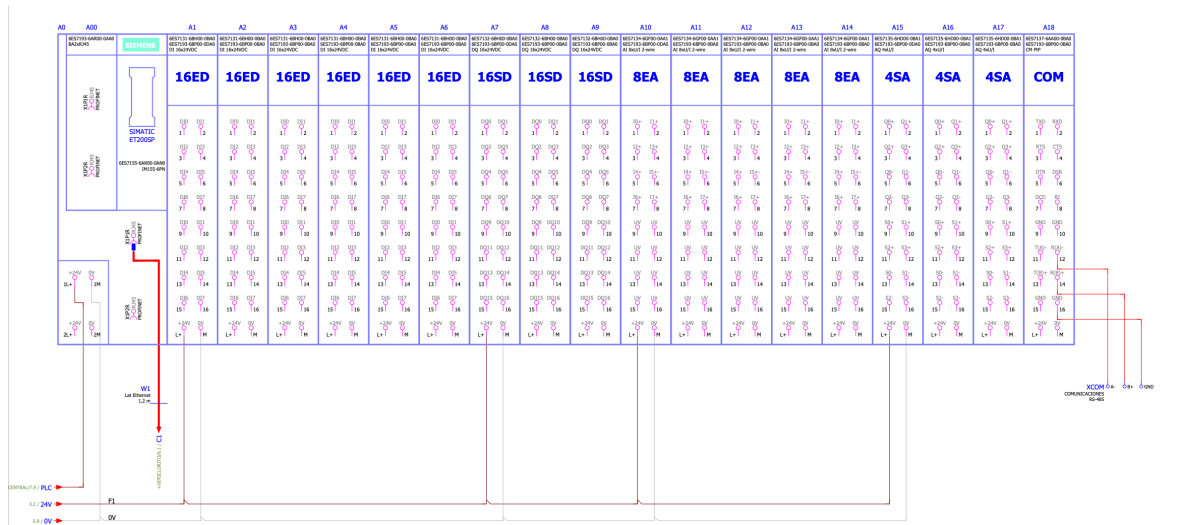


Figura 5 Estructura del autómata programable Siemens SIMATIC ET200SP empleado en el sistema: CPU y módulos de entradas/salidas digitales y analógicas [8]

2.4. COMUNICACIONES INDUSTRIALES Y PROTOCOLOS

La interconexión entre el centro de control y las estaciones remotas, así como entre los distintos equipos de una misma instalación, se apoya en redes de comunicaciones industriales [10]. Dentro de la ETAP, los equipos de control se interconectan mediante redes Ethernet cableadas, que ofrecen alta velocidad y fiabilidad en distancias cortas. Para la

comunicación con las estaciones remotas dispersas geográficamente se recurre, en cambio, a enlaces radio, que se describen en el apartado siguiente.

A nivel de protocolos, los sistemas de telecontrol emplean estándares ampliamente extendidos en el ámbito industrial [11]. Entre ellos destacan Modbus [12], Profinet o, especialmente en la comunicación entre el SCADA y los autómatas, el estándar OPC [13] (*OLE for Process Control*), que permite el intercambio de datos en tiempo real entre equipos de distintos fabricantes [7]. El uso de protocolos estandarizados resulta fundamental, ya que facilita la integración de elementos heterogéneos y garantiza la escalabilidad del sistema.

2.5. COMUNICACIONES RADIO EN BANDA LICENCIADA UHF

Dado que las estaciones remotas se encuentran alejadas de la ETAP, la comunicación entre ellas y el Centro de Control se resuelve mediante enlaces radio. En concreto, el sistema emplea la banda UHF (*Ultra High Frequency*), que abarca el rango de 300 MHz a 3 GHz dentro del espectro radioeléctrico [14] [15]. Esta banda ofrece un buen equilibrio entre alcance y capacidad de transmisión, además de permitir el uso de antenas de tamaño reducido y una buena penetración frente a obstáculos, lo que la hace especialmente adecuada para la radio móvil terrestre y los sistemas de telemetría [14].

Una decisión de diseño relevante es el uso de frecuencias en banda licenciada, en contraposición a las bandas de uso libre. Una banda licenciada es un rango de frecuencias asignado y regulado por la autoridad competente, cuyo uso requiere una autorización previa [14]. Frente a las bandas libres, en las que cualquier dispositivo puede operar sin restricciones, las bandas licenciadas garantizan el uso exclusivo del espectro a su titular. De este modo, se evita su utilización por parte de terceros, se minimiza la aparición de interferencias y cortes en los enlaces, y se permiten mayores potencias de emisión, lo que maximiza la cobertura desde las estaciones base. Por ello, la red radioeléctrica del proyecto debe ser legalizada ante la Dirección General de Telecomunicaciones antes de su puesta en servicio definitiva. En la Figura 13 se sitúa la banda UHF empleada dentro del espectro radioeléctrico.

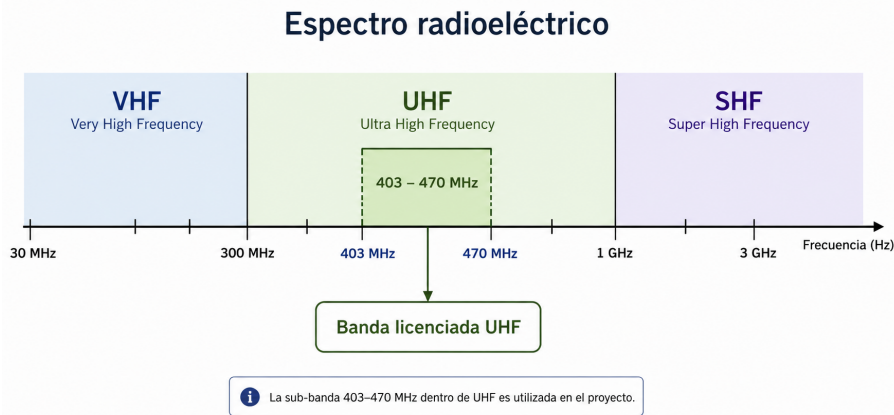


Figura 6 Ubicación de la banda UHF en el espectro radioeléctrico (Fuente: Elaboración propia).

2.6. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN: RADIO MOBILE

Para validar la viabilidad de los enlaces radioeléctricos se ha empleado el software Radio Mobile. Se trata de un programa de simulación de radiopropagación gratuito, desarrollado por el ingeniero Roger Coudé, que permite predecir el comportamiento de los sistemas radio y representar el área de cobertura de una red de radiocomunicaciones [3]. El software implementa el modelo de propagación Longley-Rice, también conocido como modelo de terreno irregular (ITM), adecuado para la predicción de la propagación sobre terreno irregular en enlaces de medio y largo alcance.

Para realizar las simulaciones, Radio Mobile utiliza el perfil geográfico de la zona de trabajo, obtenido a partir de modelos digitales del terreno descargados de fuentes públicas. A partir de este perfil y de los parámetros de los equipos, como la frecuencia, la potencia de emisión, la ganancia de las antenas y la sensibilidad de los receptores. El programa calcula el nivel de señal recibido en cada enlace y determina si la comunicación es viable. Los resultados obtenidos con esta herramienta se presentan y analizan en el Capítulo 6. Una vez presentadas las tecnologías que sustentan el sistema, desde los principios del telecontrol y los sistemas SCADA hasta los autómatas programables, las comunicaciones industriales y la radio en banda licenciada UHF, se dispone del marco conceptual necesario para abordar el problema. Conviene ahora situar este trabajo en su contexto: conocer qué soluciones existen ya en el

mercado, qué se ha desarrollado en el ámbito académico y qué carencias justifican la aportación de este proyecto. A ello se dedica el capítulo siguiente.

CAPITULO 3: ESTADO DE LA CUESTIÓN

Al plantear cualquier proyecto de ingeniería, conviene empezar mirando alrededor: ¿Qué soluciones y trabajos existen ya en este ámbito? Responder a esa pregunta evita reinventar lo que otros han resuelto y, sobre todo, ayuda a situar el trabajo en su contexto. Por eso, este capítulo se ocupa de dos cuestiones; La primera, si en el mercado existen soluciones tecnológicas parecidas a la que se quiere diseñar y la segunda, si hay trabajos previos que hayan afrontado problemas equivalentes y alcanzado resultados comparables a los que aquí se persiguen. El análisis de ambas permite, finalmente, identificar el hueco que este proyecto viene a cubrir, lo que da pie a la justificación del capítulo siguiente.

3.1. SOLUCIONES EXISTENTES EN EL MERCADO

El telecontrol de infraestructuras hidráulicas es un terreno tecnológicamente maduro, en el que abundan las soluciones comerciales. La mayoría se construyen sobre una misma base: la combinación de autómatas programables y plataformas SCADA, a la que se añaden distintas tecnologías de comunicación [1]. En los últimos años, además, los SCADA convencionales han ido evolucionando hacia plataformas de explotación centralizada, capaces de ofrecer acceso web multiplataforma, cuadros de mando que agrupan varias instalaciones y entornos pensados desde el principio para la ciberseguridad.

En este mercado conviven soluciones de varios fabricantes consolidados en el control industrial, que suministran tanto los autómatas como las plataformas de supervisión. Por lo general son modulares y escalables, lo que permite adaptarlas a instalaciones de muy distinto tamaño. Ahora bien, precisamente por su carácter genérico, ninguna constituye una respuesta "llave en mano" para un caso concreto. Cada instalación tiene sus particularidades: la topografía del terreno, el equipamiento que ya existe, la distribución geográfica de las estaciones etc. Y todas ellas obligan a un trabajo específico de diseño, dimensionamiento e integración. Dicho de otro modo: el mercado pone a disposición los componentes y las plataformas, pero no el diseño particular que cada sistema necesita.

Algo parecido ocurre con las comunicaciones. Para conectar las estaciones remotas con el centro de control existen varias alternativas: las redes de telefonía móvil, la radio en banda libre o la radio en banda licenciada y la elección entre ellas dista de ser trivial. Depende de factores como la distancia, la fiabilidad que se exige, la cobertura disponible o los requisitos regulatorios. Es, en sí misma, una decisión de diseño que debe justificarse caso por caso.

3.2. TRABAJOS ACADÉMICOS Y PROYECTOS DE REFERENCIA

Más allá de las soluciones comerciales, el telecontrol de infraestructuras hidráulicas ha sido objeto de numerosos trabajos académicos. Revisarlos resulta útil, porque permite contrastar el enfoque de este proyecto con desarrollos anteriores y comprobar qué resultados se han alcanzado realmente.

Buena parte de ellos se centra en el diseño de sistemas SCADA para redes de agua potable. Un ejemplo representativo es el diseño de un sistema de telemetría y telecontrol SCADA para la red de distribución de la ciudad de Loja, que parte de un diagnóstico del estado de la red para definir, nivel a nivel, la instrumentación, la automatización y las comunicaciones necesarias, siguiendo el modelo de referencia CIM, y cierra con un análisis económico de la solución [15]. Su planteamiento, ir del diagnóstico inicial al diseño por niveles, se parece al que aquí se sigue, con la diferencia de que se aplica a una red de distribución urbana y no a una ETAP con estaciones remotas.

En el terreno más específico de las comunicaciones, resultan especialmente interesantes los trabajos que recurren a la radio UHF para el telecontrol de infraestructuras hidráulicas. En esta línea, un proyecto de modernización de las comunicaciones para el telecontrol y la automatización de un canal de distribución de aguas estudia el uso de enlaces UHF gestionados mediante autómatas que actúan como frontal de comunicaciones con el centro de control SCADA [16]. Ese trabajo pone de relieve una característica de la tecnología que también condiciona el presente proyecto: la capacidad de los enlaces UHF es limitada, del orden de unos pocos kbps. Lejos de ser un inconveniente, esa limitación la hace idónea para transmitir información de telecontrol (estados, medidas y órdenes), aunque no grandes

volúmenes de datos. Y eso es exactamente lo que confirma su idoneidad para una red como la de la ETAP La Lleda, donde el volumen de información que se intercambia es reducido.

Por último, otros trabajos se ocupan del desarrollo eléctrico y de control de sistemas de abastecimiento de agua potable mediante SCADA y HMI, prestando atención a aspectos como la eficiencia energética o la forma de representar la instalación de cara al operario [17]. Comparten con este proyecto el uso de autómatas y SCADA como núcleo del control, si bien su foco está puesto en el diseño eléctrico y no en el dimensionamiento de las comunicaciones radio.

Para sintetizar esta comparación y apreciar de un vistazo en qué se distingue el presente trabajo de los desarrollos previos, la Tabla 1 recoge los aspectos fundamentales de cada uno frente a la propuesta de este proyecto.

<i>Trabajo</i>	<i>Ámbito de aplicación</i>	<i>Sistema de control</i>	<i>Comunicaciones</i>	<i>Validación de cobertura</i>
Loja [15]	Red de distribución urbana	SCADA	Genéricas	No
Sevilla [16]	Canal de distribución de aguas	Autómatas	Radio UHF	Parcial
EHU [17]	Abastecimiento de agua potable	SCADA + HMI	No (foco eléctrico)	No
Este trabajo	ETAP + estaciones remotas	SCADA	Radio UHF (banda licenciada)	Sí (balance analítico + simulación)

Tabla 1 Comparativa de los trabajos de referencia frente al presente proyecto (Elaboración propia a partir de [15] [16] [17])

Como se observa en la tabla, cada uno de los trabajos previos cubre solo una parte de los aspectos que aquí se abordan, mientras que el presente proyecto es el único que integra el diseño del control, las comunicaciones radio en banda licenciada y la validación de la cobertura mediante un doble enfoque.

3.3. IDENTIFICACIÓN DEL VACÍO Y CONCLUSIÓN

Del repaso a las soluciones de mercado y a los trabajos previos se desprenden dos conclusiones. La primera es que existen tecnologías maduras (autómatas, plataformas SCADA y equipos de radio UHF) y trabajos que demuestran que los objetivos perseguidos son perfectamente alcanzables. El proyecto se apoya, por tanto, en un marco contrastado y no pretende reinventar lo ya existente. La segunda es que, pese a esa abundancia de referencias, se detecta un vacío concreto, que la Tabla 1 pone de manifiesto: los trabajos revisados, o bien se centran en redes de distribución urbana, o bien tratan las comunicaciones y el control por separado, o bien aplican la solución a infraestructuras distintas de una ETAP con estaciones remotas dispersas.

Ninguno de ellos aborda, de forma integrada, el caso que aquí se plantea: el diseño conjunto del sistema de telecontrol y de comunicaciones radio para una ETAP y sus instalaciones asociadas, acompañado de la validación de la cobertura de los enlaces mediante simulación radioeléctrica. Es justo en ese vacío donde se sitúa este trabajo, lo que justifica su necesidad y su originalidad. Las razones concretas que motivan su desarrollo se detallan en la justificación del capítulo siguiente.

CAPÍTULO 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

El estado de la cuestión ha dejado claro que existen tecnologías maduras y trabajos previos en el ámbito del telecontrol de aguas. Ahora bien, al analizar esas soluciones con detenimiento se comprueba que ninguna resuelve, por sí sola, el problema concreto que afronta Aguas de Avilés. Es precisamente esa carencia la que justifica, desde un punto de vista técnico, el desarrollo de este proyecto.

4.1.1 ANÁLISIS CRÍTICO DE LAS SOLUCIONES EXISTENTES

Las plataformas comerciales de telecontrol (los autómatas y los SCADA de los fabricantes consolidados) proporcionan los componentes necesarios, pero no constituyen una solución directamente aplicable. Son productos genéricos, pensados para adaptarse a multitud de escenarios, y precisamente por ello exigen un trabajo específico de diseño, dimensionamiento e integración en cada instalación. Adquirir una plataforma SCADA no responde, por sí mismo, a preguntas como de qué manera conectar tres estaciones remotas dispersas con un centro de control, qué tecnología de comunicación conviene emplear o si esa comunicación será viable sobre el terreno real de Avilés. Ese trabajo de ingeniería es, justamente, el que aporta el verdadero valor, y es el que este proyecto desarrolla.

Los trabajos académicos revisados, por su parte, resultan valiosos como referencia, pero muestran sus límites en cuanto se contrastan con las necesidades de este caso concreto. Los centrados en redes de distribución urbana [7] no contemplan el escenario de una ETAP con estaciones remotas alejadas, que es el que aquí concurre. Los que se ocupan de las comunicaciones radio UHF [16] confirman la idoneidad de esta tecnología para el telecontrol, pero la aplican a otros contextos y no llegan a integrar el diseño completo del sistema de control. Y los que abordan el desarrollo eléctrico y de control [15] resuelven bien la automatización, pero dejan fuera el dimensionamiento y la validación de las comunicaciones. En conjunto, ninguno ofrece de forma integrada lo que este proyecto

plantea: el diseño conjunto del telecontrol y de las comunicaciones radio para una ETAP y sus instalaciones asociadas, con la cobertura de los enlaces validada mediante simulación.

4.1.2 PROPUESTA DE VALOR

A la vista de este análisis la propuesta de este proyecto se sostiene sobre cinco razones, de carácter técnico y también de mercado:

1. **Resuelve un problema real y concreto.** No se trata de un estudio teórico, sino del diseño de un sistema para unas instalaciones existentes con una necesidad operativa identificada, lo que lo hace directamente aprovechable por la entidad gestora.
2. **Integra control y comunicaciones en una única solución.** Frente a los enfoques parciales, este trabajo aborda de forma conjunta la arquitectura de telecontrol y el diseño de los enlaces radio, garantizando que ambos subsistemas son coherentes entre sí.
3. **Aporta la validación de viabilidad.** El estudio de cobertura radioeléctrica mediante simulación demuestra, antes de cualquier inversión en equipos, que la comunicación propuesta es viable sobre el terreno real, lo que reduce el riesgo técnico del despliegue.
4. **Es escalable y replicable.** La arquitectura propuesta puede ampliarse a nuevas instalaciones del servicio, por lo que el proyecto no resuelve solo el caso actual, sino que sienta las bases para fases posteriores.
5. **Optimiza costes mediante el uso de banda licenciada y software libre.** La elección de la radio UHF en banda licenciada minimiza interferencias y costes recurrentes de comunicación, mientras que la validación con software gratuito (Radio Mobile) reduce el coste del propio estudio [3].

4.2 OBJETIVOS

En este apartado se concreta qué es lo que se va a desarrollar a lo largo del proyecto. Se distingue entre un objetivo general, que expresa la meta global del trabajo, y un conjunto de objetivos específicos, que detallan las tareas concretas necesarias para alcanzarla.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este Trabajo de Fin de Grado es **diseñar el sistema de telecontrol y comunicaciones de la ETAP La Lleda y sus instalaciones asociadas**, de modo que sea técnicamente viable, escalable y coherente, y que permita la supervisión y la operación remota de todas las instalaciones desde un centro de control centralizado.

Dicho de otro modo, el trabajo consiste en definir, sobre una situación de partida de control local aislado, cómo debe ser el sistema que conecte el bombeo de la Magdalena y los depósitos de La Carriona y La Lleda 2 con un Centro de Control situado en la ETAP, y en demostrar que la solución propuesta es realizable.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos, que delimitan las tareas concretas que se van a realizar:

1. **Analizar la situación de partida y los requisitos del sistema**, a partir de la documentación técnica de las instalaciones, identificando las señales a supervisar, los elementos a telemandar y las necesidades de comunicación de cada estación.
2. **Diseñar la arquitectura del sistema de telecontrol**, identificando sus tres elementos básicos —Centro de Control, estaciones remotas y sistema de comunicaciones— y definiendo la relación entre ellos.
3. **Definir la topología de comunicaciones** entre las estaciones remotas y el Centro de Control, seleccionando y justificando la tecnología de transmisión más adecuada a las distancias y a las características del entorno.
4. **Seleccionar y justificar los equipos de control y comunicación** necesarios, incluyendo autómatas programables, radio-módems, sistemas radiantes y elementos de red.

5. **Diseñar los subsistemas hardware y software** del Centro de Control, definiendo el equipamiento del puesto de operador y las funciones de la plataforma SCADA.
6. **Validar la viabilidad de los enlaces radioeléctricos** mediante un estudio de cobertura realizado con software de simulación, comprobando que el nivel de señal recibido en cada estación supera el umbral necesario para establecer la comunicación.
7. **Documentar la propuesta técnica** de forma estructurada, mediante esquemas, tablas y justificaciones, y analizar su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

4.3 METODOLOGÍA

Definidos ya los objetivos, conviene explicar el camino seguido para alcanzarlos. El proyecto se ha abordado siguiendo una metodología propia del diseño de ingeniería, organizada en fases sucesivas que parten del análisis del problema y avanzan, paso a paso, hasta la validación de la solución. Cada fase se apoya en los resultados de la anterior, de manera que el trabajo progresa de lo general a lo concreto: primero se comprende el problema, después se diseña la solución y, por último, se verifica que es viable. Este enfoque escalonado garantiza que ninguna decisión de diseño se tome sin antes haber entendido bien el contexto, y que ninguna conclusión se dé por buena sin haberla contrastado. No tendría sentido, por ejemplo, seleccionar los equipos de comunicación antes de conocer las distancias entre estaciones, ni dar por válidos los enlaces sin haberlos simulado sobre el terreno real.

Durante todo el proceso, el trabajo académico no se ha desarrollado de manera aislada, sino que se ha combinado con la colaboración técnica de Asturagua, que ha desempeñado un doble papel: por un lado, ha facilitado la información de partida sobre las instalaciones; por otro, ha validado las decisiones adoptadas en los momentos clave, aportando el criterio realista de quien explota a diario este tipo de infraestructuras. Esta interacción ha permitido que el diseño no se quede en un plano puramente teórico, sino que se ajuste a las restricciones y necesidades reales del entorno.

El trabajo se ha organizado en cinco fases, que se describen a continuación.

Fase 1. Análisis del problema y recopilación de información. El punto de partida ha sido entender el sistema existente y, sobre todo, sus carencias. Para ello se ha revisado en profundidad la documentación técnica facilitada por la entidad colaboradora y se ha estudiado la situación de control local de cada instalación, caracterizada por funcionar de forma aislada y sin comunicación entre plantas. A partir de ahí, se han identificado las señales que es necesario supervisar, los elementos sobre los que se debe poder actuar a distancia y los requisitos de comunicación de cada estación. El resultado de esta fase es una imagen clara del punto de partida y de las necesidades a cubrir, lo que da respuesta al primer objetivo específico y sienta las bases del diseño posterior.

Fase 2. Diseño de la arquitectura del sistema. Con el análisis anterior como cimiento, se ha definido la arquitectura general del sistema de telecontrol. En esta fase se han identificado los tres elementos básicos sobre los que se articula cualquier sistema de telemando: el centro de control, las estaciones remotas y el sistema de comunicaciones, estableciéndose una relación entre ellos. Este punto se trata de una fase especialmente determinante, ya que las decisiones que aquí se toman, como la elección de una topología en estrella o la opción por la radio en banda licenciada, condicionan todo el desarrollo posterior. Por ese motivo, esta fase aborda los objetivos relativos a la arquitectura del sistema y a la topología de comunicaciones.

Fase 3. Diseño de los subsistemas y selección de equipos. Una vez fijada la arquitectura a grandes rasgos, se ha descendido al detalle de cada uno de sus subsistemas: el hardware del centro de control, la plataforma software SCADA y el equipamiento de cada una de las estaciones remotas. En este punto el diseño deja de ser conceptual para concretarse en equipos reales, por lo que se han seleccionado y justificado los componentes de control y comunicación necesarios (autómatas programables, radio-módems, sistemas radiantes y elementos de red), atendiendo tanto a las prestaciones requeridas como a las particularidades de cada instalación. Por tanto, esta fase cubre los objetivos correspondientes a la selección de equipos y al diseño de los subsistemas hardware y software.

Fase 4. Simulación y validación de las comunicaciones. Diseñado el sistema, quedaba por demostrar que las comunicaciones, que son su elemento más crítico, funcionarían en la

práctica. Para ello se han identificado los nodos de comunicación y se han recopilado los parámetros de transmisión y recepción de los equipos: frecuencia, potencia, ganancia de las antenas y sensibilidad de los receptores. Con estos datos, y a partir del perfil real del terreno, se han simulado los enlaces radioeléctricos mediante el software Radio Mobile, obteniendo el nivel de señal recibido en cada estación. Este nivel del proyecto corresponde al objetivo de validar la viabilidad de los enlaces y constituye, por su relevancia, el núcleo de los resultados del trabajo.

Fase 5. Consolidación y documentación. En la fase final, los resultados del diseño y de la simulación se han contrastado con los técnicos de Asturagua, lo que ha permitido ajustar los elementos necesarios y consolidar el diseño definitivo. Cerrado el diseño, el trabajo ha culminado con la redacción de la presente memoria, en la que se documenta de forma estructurada toda la propuesta y se analiza, además, su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Esta fase da respuesta al objetivo de documentación y cierra el ciclo metodológico.

Como puede apreciarse, las cinco fases no son compartimentos estancos, sino eslabones de una misma cadena, en la que cada uno alimenta al siguiente y contribuye, en su medida, a la consecución de los objetivos planteados. Este encadenamiento se representa de manera esquemática en la Figura 14.

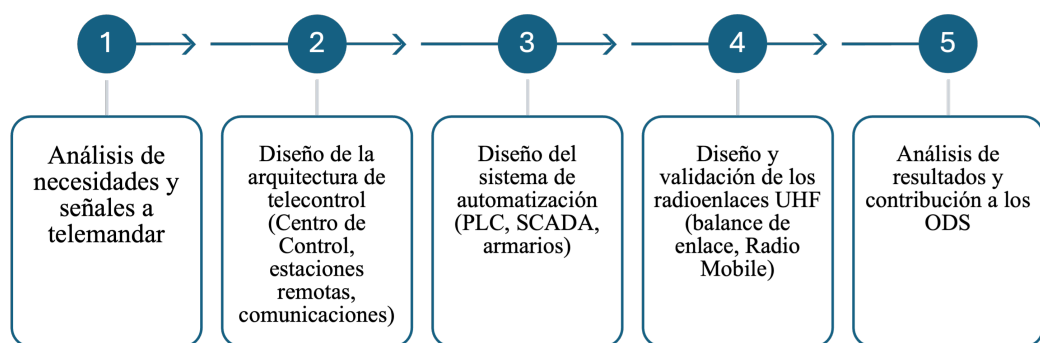


Figura 7 Esquema de la metodología seguida en el proyecto (Fuente: Elaboración propia).

4.4 PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA

Una vez definidos los objetivos y la metodología, toca abordar la dimensión temporal y económica del proyecto. En este subcapítulo se van a tratar tres cuestiones. En primer lugar, se presenta la planificación de las actividades realizadas a lo largo del desarrollo del trabajo. A continuación, se estima el coste de desarrollo del propio Trabajo de Fin de Grado, entendido como el esfuerzo de ingeniería necesario para su elaboración, y por último y a modo de referencia, se incluye el presupuesto de ejecución del sistema facilitado por la entidad colaboradora, que permite dimensionar el alcance económico real de la solución diseñada. Conviene distinguir desde el inicio estos dos conceptos: una cosa es el coste de **desarrollar** el estudio y el diseño, que es el objeto propio de este trabajo, y otra muy distinta el coste de **ejecutar** e implantar físicamente el sistema, que correspondería a una fase de obra posterior y ajena al alcance de este proyecto.

4.4.1 PLANIFICACIÓN TEMPORAL

El desarrollo del proyecto se ha distribuido a lo largo del curso académico 2025/2026, siguiendo las cinco fases descritas en la metodología. La planificación se ha concebido de forma incremental, de modo que cada fase parte de los resultados de la anterior, aunque en la práctica algunas se han solapado parcialmente en el tiempo. Así, por ejemplo, la recopilación de información se prolongó durante las primeras etapas del diseño, y la redacción de la memoria comenzó antes de cerrar la fase de simulación, avanzando en paralelo a ella.

En cuanto al reparto temporal, la fase inicial de análisis y recopilación de información se concentró en los primeros meses, por constituir la base sobre la que se apoya todo lo demás. Las fases de diseño de la arquitectura y de los subsistemas ocuparon la parte central del calendario, al tratarse del núcleo técnico del trabajo. La simulación y validación de las comunicaciones llegó a continuación, una vez definidos los equipos y sus parámetros. Y, finalmente, la consolidación del diseño y la redacción de la memoria se extendieron hasta la entrega. Esta distribución se representa de forma detallada en el diagrama de Gantt de la Figura 15.

Meses curso académico 2025/2026

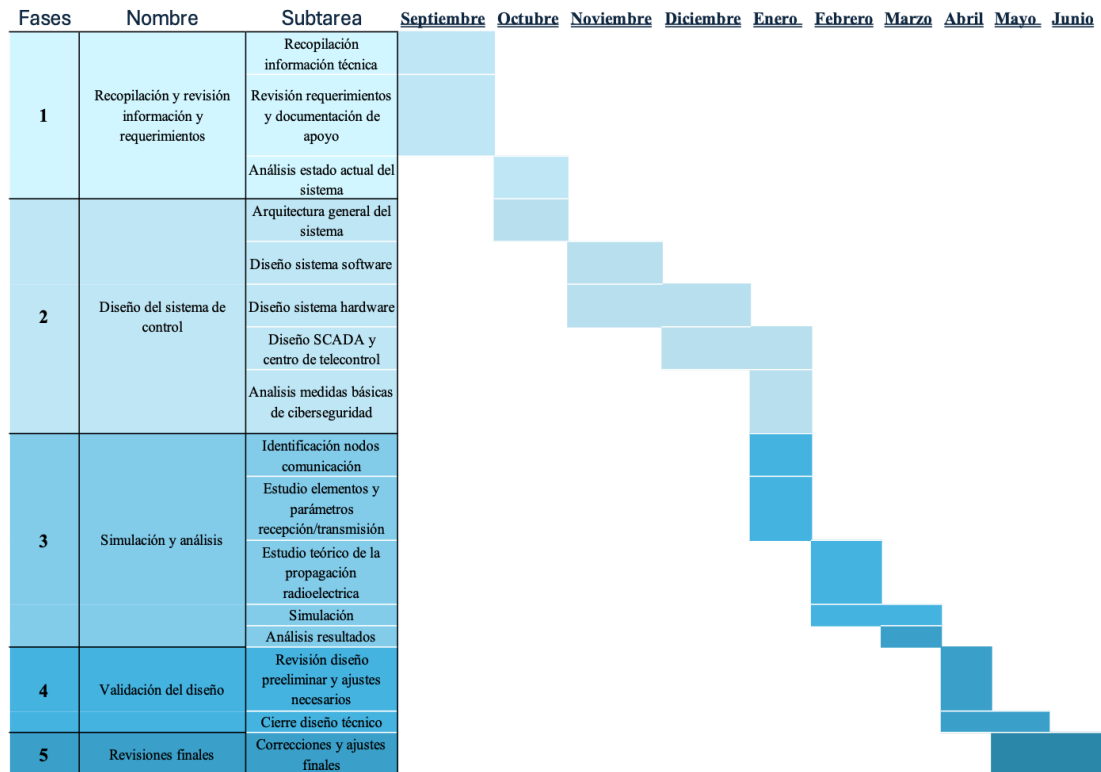


Figura 8 Diagrama de Gantt de la planificación del proyecto. (Fuente: Elaboración propia).

4.4.2. ESTIMACIÓN DEL COSTE DE DESARROLLO

Como este Trabajo de Fin de Grado tiene un carácter de estudio y diseño, y no contempla la fase de ejecución material, su coste de desarrollo se corresponde fundamentalmente con el esfuerzo de ingeniería dedicado a elaborarlo. Dicho esfuerzo se cuantifica a partir de las horas invertidas en cada fase de la metodología, valoradas según una tarifa horaria propia de un ingeniero junior. A este coste de personal se suman los recursos materiales y de software empleados, aunque su peso es reducido, ya que la herramienta principal de simulación, Radio Mobile, es de uso gratuito.

La estimación se ha realizado considerando una dedicación acorde con la carga de trabajo asignada a la asignatura. La Tabla 2 recoge el desglose del coste de desarrollo por fases.

<i>Concepto</i>	<i>Horas</i>	<i>Coste unitario</i>	<i>Total</i>
Fase 1. Análisis y recopilación de información	40 h	25 €/h	1.000 €
Fase 2. Diseño de la arquitectura del sistema	80 h	25 €/h	2.000 €
Fase 3. Diseño de subsistemas y selección de equipos	70 h	25 €/h	1.750 €
Fase 4. Simulación y validación de las comunicaciones	90 h	25 €/h	2.250 €
Fase 5. Consolidación y documentación	60 h	25 €/h	1.500 €
Subtotal mano de obra de ingeniería	340 h		8.500 €
Licencia de software Radio Mobile	1	0 €	0 €
Amortización de equipo informático y software ofimático	—	—	150 €
TOTAL coste de desarrollo			8.650 €

Tabla 2 Estimación del coste de desarrollo del proyecto.

Como se observa, el coste de desarrollo está dominado casi por completo por las horas de ingeniería, mientras que el coste material es prácticamente despreciable. Esta circunstancia es característica de los proyectos de diseño y estudio, en los que el valor reside en el trabajo intelectual de análisis, diseño y validación, y no en la adquisición de equipos. Debe insistirse, por tanto, en que esta cifra refleja el coste de elaboración del estudio, y en ningún caso el coste de implantación del sistema, que se aborda por separado en el apartado siguiente.

4.4.3 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO

Para dimensionar el alcance económico real de la solución diseñada, resulta ilustrativo tomar como referencia el presupuesto de ejecución elaborado por la entidad colaboradora para la

implantación del sistema [18]. A diferencia del coste de desarrollo, este presupuesto recoge la totalidad de los costes necesarios para llevar el diseño a la realidad: el suministro de la instrumentación de campo, los armarios de control, los equipos de comunicaciones con sus sistemas radiantes, la mano de obra de instalación, la legalización radioeléctrica y la integración en la plataforma SCADA, sin olvidar las partidas habituales de gestión de residuos, seguridad y salud e imprevistos. A continuación, la Tabla 3 resume y muestra sus principales capítulos.

<i>Capítulo</i>	<i>Importe</i>
Instrumentación y control – ETAP	224.099,91 €
Depósito La Lleda 2	7.404,88 €
Depósito La Carriona	5.755,05 €
Bombeo Magdalena	5.720,58 €
Legalización de frecuencias	1.290,00 €
Imprevistos, gestión de residuos y seguridad y salud	14.064,75 €
Integración en SCADA DCDC	68.125,17 €
Presupuesto de ejecución material	326.460,34 €
Gastos generales (10%) y beneficio industrial (9%)	62.027,46 €
Presupuesto de ejecución por contrata (sin IVA)	388.487,80 €
IVA (21%)	81.582,44 €
PRESUPUESTO TOTAL	470.070,24 €

Tabla 3 Resumen del presupuesto de ejecución del proyecto. Fuente: Asturagua [18]

Del análisis de este presupuesto se extraen varias conclusiones de interés. La primera de ellas es que, el grueso de la inversión se concentra en la instrumentación y el control de la ETAP, que por sí sola representa más de dos terceras partes del presupuesto de ejecución

material, lo que resulta coherente con el hecho de que la planta es la instalación más compleja y la que concentra el mayor número de señales y equipos. Frente a ello, las tres estaciones remotas suponen, en conjunto, una fracción reducida del total, ya que en ellas el trabajo se limita esencialmente a la integración del equipo de control y de comunicaciones.

La segunda conclusión guarda relación directa con el foco de este trabajo y, dado que el estudio de este se centra en el telecontrol y las comunicaciones, resulta especialmente relevante destacar el peso de las partidas directamente asociadas a este ámbito. Si se suman el armario central de control de la ETAP, los equipos de control y comunicaciones de las tres estaciones remotas con sus sistemas radiantes, la antena de la ETAP, la legalización radioeléctrica y la integración completa en la plataforma SCADA el resultado se encuentra alrededor de unos 115.000 €. Esto pone de manifiesto que el telecontrol y las comunicaciones representan una parte importante de la inversión total, lo que justifica el interés de dedicar este trabajo a su diseño y validación.

Por último, merece la pena subrayar que la partida de legalización radioeléctrica, pese a ser modesta en términos económicos (1.290 €), tiene un carácter crítico, ya que sin ella la red de comunicaciones no podría entrar legalmente en servicio. Este matiz ilustra cómo, en un proyecto de telecontrol, el coste de un elemento no siempre es proporcional a su importancia funcional.

4.5 REQUISITOS DEL SISTEMA

Del análisis de la situación de partida y de las necesidades de la entidad colaboradora se derivan los requisitos que debe satisfacer el sistema diseñado. Siguiendo una práctica habitual en ingeniería, conviene clasificarlos en dos grupos: los requisitos funcionales, que describen las funciones que el sistema debe ser capaz de realizar, y los no funcionales, que establecen las cualidades y restricciones que debe cumplir en su comportamiento.

4.5.1. REQUISITOS FUNCIONALES

Los requisitos funcionales definen qué debe hacer el sistema de telecontrol. Para el caso de la ETAP La Lleda y sus instalaciones asociadas, se identifican los siguientes:

- 1. Supervisión remota en tiempo real.** El sistema debe permitir al operador conocer, desde el centro de control, el estado de las instalaciones: niveles de depósitos y decantadores, caudales de entrada y salida, presiones, parámetros de calidad del agua (pH, cloro, turbidez, conductividad) y estado de funcionamiento de los equipos electromecánicos.
- 2. Telemando de elementos electromecánicos.** El sistema debe permitir actuar a distancia sobre los elementos maniobrables de las instalaciones, como bombas y válvulas, ya sea mediante órdenes directas (marcha/paro, apertura/cierre) o mediante consignas de funcionamiento procesadas por el autómatas [19].
- 3. Interrogación cíclica de las estaciones remotas.** El centro de control debe interrogar de forma cíclica a cada una de las tres estaciones remotas (Magdalena, La Carriona y La Lleda 2) para adquirir los datos registrados por su instrumentación.
- 4. Presentación de la información al operador.** El sistema debe presentar la información mediante sinópticos gráficos de la red hidráulica, listas de señales, curvas de tendencia e históricos, accesibles desde el puesto de operador y representables en el sistema de visualización de gran formato [20].
- 5. Gestión de alarmas.** El sistema debe detectar situaciones anómalas y generar las alarmas correspondientes, notificándolas al operador mediante señalización visual y, cuando proceda, mediante el envío de avisos.
- 6. Funcionamiento autónomo local.** Cada estación remota debe disponer de lógica local en su autómatas que le permita seguir operando de forma autónoma ante la pérdida de comunicación con el Centro de Control.
- 7. Registro histórico.** El sistema debe almacenar el histórico de las variables supervisadas para permitir su consulta y análisis posterior.

4.5.2. REQUISITOS NO FUNCIONALES

Los requisitos no funcionales establecen cómo debe comportarse el sistema y qué restricciones debe respetar. Para este proyecto se identifican los siguientes:

- 1. Fiabilidad de las comunicaciones.** Los enlaces entre el Centro de Control y las estaciones remotas deben presentar una probabilidad de caída muy baja y operar libres de errores, garantizando la integridad de la información transmitida y recibida.
- 2. Disponibilidad del espectro radioeléctrico.** Las comunicaciones radio deben emplear frecuencias en banda licenciada UHF, debidamente legalizadas ante la Dirección General de Telecomunicaciones, lo que asegura el uso exclusivo del espectro y minimiza las interferencias.
- 3. Escalabilidad.** El sistema debe ser fácilmente ampliable, tanto para incorporar nueva instrumentación en las instalaciones existentes como para integrar nuevas estaciones en futuras fases del proyecto.
- 4. Ciberseguridad.** El sistema debe incorporar medidas de seguridad acordes a la normativa de protección de infraestructuras críticas, así como una gestión de los accesos por niveles de usuario según su perfil.
- 5. Interoperabilidad.** El sistema debe soportar protocolos de comunicación industriales estándar, como OPC o Modbus, que permitan la integración de equipos de distintos fabricantes.
- 6. Autonomía energética.** Las estaciones deben disponer de sistemas de alimentación con respaldo (baterías) que garanticen su funcionamiento ante un fallo temporal del suministro eléctrico.

CAPITULO 5. SISTEMA DESARROLLADO

En este capítulo se describe en detalle el sistema de telecontrol y comunicaciones diseñado para la ETAP La Lleda y sus instalaciones asociadas. El recorrido parte del análisis de las necesidades y de los elementos a integrar en cada instalación, se presenta a continuación la arquitectura general de la solución, y se detallan después el sistema de comunicaciones, el centro de control, las estaciones remotas y el subsistema software. Conviene precisar que los datos técnicos de equipamiento recogidos a lo largo del capítulo proceden de la documentación del proyecto facilitada por la entidad colaboradora [18], con el objetivo de justificar, de forma fundamentada, cada una de las decisiones de diseño adoptadas.

5.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA

Antes de abordar el diseño, es necesario analizar el punto de partida y las necesidades concretas que el sistema debe cubrir. Como se ha expuesto, las instalaciones objeto del proyecto operaban con control local e independiente [15], por lo que el primer paso ha consistido en identificar, para cada una de ellas, qué información debe adquirirse, sobre qué elementos debe poder actuarse y qué tipo de comunicación requieren.

5.1.1. INSTALACIONES OBJETO DEL PROYECTO

El sistema integra cuatro instalaciones, cada una con un papel diferenciado dentro del ciclo del agua gestionado por la entidad:

- **La ETAP La Lleda**, donde se realiza el tratamiento y la potabilización del agua, y que alberga el Centro de Control del sistema. Es la instalación más compleja, ya que concentra el mayor número de procesos, señales y equipos.
- **El bombeo de la Magdalena**, que actúa como captación y suministro de agua bruta a la ETAP. Dispone de un telemando preexistente sobre el que se amplían funcionalidades.
- **El depósito de La Carriona**, instalación de almacenamiento y regulación de la red de distribución, sobre la que se amplía el telemando existente.

- **El depósito de La Lleda 2**, instalación de almacenamiento con la que se establece la comunicación con el Centro de Control.

5.1.2. IDENTIFICACIÓN DE SEÑALES Y ELEMENTOS

Del análisis de cada instalación se desprende la necesidad de gestionar un volumen considerable de señales de distinta naturaleza, que pueden agruparse en cuatro categorías:

- **Entradas digitales (ED):** señales de estado de los equipos (marcha/paro, abierto/cerrado, alarmas, fallos), procedentes de los cuadros eléctricos existentes.
- **Salidas digitales (SD):** órdenes de telemando sobre los elementos maniobrables (arranque de bombas, apertura de válvulas, etc.).
- **Entradas analógicas (EA):** medidas de la instrumentación de campo, como niveles, caudales, presiones y parámetros de calidad del agua (pH, cloro, turbidez, conductividad).
- **Salidas analógicas (SA):** consignas hacia los elementos que admiten regulación, como posicionadores de válvulas o variadores.

A modo de ejemplo del volumen gestionado, solo el armario de periferia de la zona de filtros de la ETAP contempla capacidad para 96 entradas digitales, 48 salidas digitales, 40 entradas analógicas y 12 salidas analógicas, lo que da idea de la densidad de instrumentación de la planta. La identificación detallada de estas señales constituye la base para el dimensionamiento de los autómatas y de los armarios de control de cada instalación.

5.1.2. NECESIDADES DE COMUNICACIÓN

Del análisis se concluye que la ETAP, al ser la sede del Centro de Control, concentra la comunicación interna mediante red Ethernet cableada, mientras que las tres instalaciones restantes, alejadas geográficamente, requieren un medio de comunicación a distancia. Esta necesidad, unida a la exigencia de fiabilidad y de bajo coste recurrente, es la que orienta la elección de la tecnología de comunicación hacia los enlaces radio en banda licenciada, como se justificará más adelante.

5.2. ARQUITECTURA GENERAL DEL SISTEMA

A partir del análisis anterior, se ha definido una arquitectura de telecontrol centralizada, organizada en torno a los tres elementos básicos de todo sistema de telemando: un Centro de Control, un conjunto de estaciones remotas y un sistema de comunicaciones que los interconecta.

5.2.1. TOPOLOGÍA EN ESTRELLA

La arquitectura adoptada responde a una topología en estrella, en la que el centro de control, ubicado en la ETAP, ocupa el nodo central y se comunica de forma directa con cada una de las tres estaciones remotas [16]. Esta topología es la más adecuada para el caso, ya que las estaciones remotas no necesitan comunicarse entre sí, sino únicamente con el Centro de Control, que centraliza toda la supervisión y el mando. Además, simplifica la gestión de la red y facilita la incorporación de nuevas estaciones en el futuro, que se sumarían como nuevos radios de la estrella sin alterar las existentes. En la Figura 16 se representa la arquitectura general del sistema, que adopta una topología en estrella en torno al Centro de Control de la ETAP.



Figura 9 Arquitectura funcional general del sistema de telecontrol (Fuente: Elaboración propia).

5.2.2. ELEMENTOS DE LA ARQUITECTURA

Cada uno de los tres elementos de la arquitectura cumple una función específica:

- **El Centro de Control** constituye el elemento supervisor. Aloja la plataforma SCADA, interroga cíclicamente a las estaciones, presenta la información al operador y permite el envío de órdenes y consignas. Se ubica en la ETAP y se apoya en una red Ethernet local que interconecta los equipos de la planta.
- **El sistema de comunicaciones** interconecta el Centro de Control con las estaciones remotas. Combina los enlaces Ethernet internos de la ETAP con los enlaces radio en banda licenciada UHF hacia las tres instalaciones externas, conformando la topología en estrella.
- **Las estaciones remotas** adquieren las señales de campo de cada instalación y ejecutan la lógica local de control mediante sus autómatas, garantizando el funcionamiento autónomo ante una pérdida de comunicación. Envían la información al Centro de Control y reciben de él las órdenes y consignas.

5.2.3. FLUJO DE INFORMACIÓN

El funcionamiento del sistema se basa en un flujo de información bidireccional. En sentido ascendente, desde las estaciones remotas hacia el Centro de Control, viajan los datos adquiridos por la instrumentación y los estados de los equipos. En sentido descendente, desde el Centro de Control hacia las estaciones, se transmiten las órdenes de telemando y las consignas de funcionamiento. El Centro de Control interroga cíclicamente a cada estación, de modo que la información se actualiza de forma continua, y el conjunto queda integrado en la plataforma SCADA, que constituye la interfaz única de explotación del sistema.

5.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES

El sistema de comunicaciones es el elemento que hace posible el telecontrol, al interconectar el centro de control con las estaciones remotas. Su diseño parte de las necesidades identificadas en el análisis y se concreta en la elección de la tecnología de transmisión, la definición de la topología, la selección de los equipos y la tramitación de la legalización radioeléctrica [19].

5.3.1. ELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE TRANSMISIÓN

La comunicación del sistema presenta dos ámbitos claramente diferenciados, que exigen soluciones distintas. Por un lado, la comunicación interna dentro de la ETAP, donde los equipos se encuentran próximos entre sí; por otro, la comunicación con las tres instalaciones externas, separadas geográficamente de la planta.

Para el ámbito interno de la ETAP se han adoptado redes Ethernet cableadas conforme al estándar IEEE 802.3 [20]. Esta tecnología resulta idónea en distancias cortas, ya que ofrece un elevado ancho de banda, alta fiabilidad y una integración sencilla con los equipos de control y con la plataforma SCADA, además de no estar sujeta a las limitaciones de la comunicación inalámbrica. De este modo, los distintos armarios de la planta (filtros, dosificación, sala de cuadros, etc.) se conectan al armario central mediante cableado Ethernet.

Para el ámbito externo, en cambio, la distancia entre las instalaciones obliga a recurrir a un medio de comunicación a distancia. Las principales alternativas disponibles son tres: las

redes de telefonía móvil (GPRS/3G/4G), la radio en banda libre y la radio en banda licenciada. Cada una presenta ventajas e inconvenientes que conviene analizar:

- **Telefonía móvil.** Ofrece una cobertura amplia y no requiere infraestructura propia, pero implica una dependencia de un operador externo y unos costes recurrentes (tarifas de datos) que se prolongan durante toda la vida útil del sistema. Además, su disponibilidad queda condicionada a la cobertura del operador en cada emplazamiento, que no siempre está garantizada en instalaciones hidráulicas aisladas.
- **Radio en banda libre.** No conlleva costes de licencia ni cuotas, pero al operar en bandas de uso compartido está expuesta a interferencias de otros dispositivos, lo que compromete la fiabilidad del enlace. Asimismo, la normativa limita la potencia de emisión, reduciendo el alcance.
- **Radio en banda licenciada.** Requiere una autorización administrativa y el pago de las tasas correspondientes, pero garantiza el uso exclusivo de la frecuencia asignada, lo que se traduce en una alta inmunidad frente a interferencias y en la posibilidad de emplear mayores potencias de emisión.

Tras valorar estas alternativas, se ha optado por la **radio en banda licenciada UHF**. La decisión se fundamenta en que el telecontrol de infraestructuras críticas, como las del ciclo del agua, exige una comunicación altamente fiable y con una probabilidad de caída muy baja, requisito que la banda licenciada satisface mejor que las demás opciones. Además, frente a la telefonía móvil, evita los costes recurrentes y la dependencia de terceros, lo que resulta ventajoso a largo plazo. Por último, conviene señalar que el volumen de datos que maneja un sistema de telecontrol es reducido, por lo que la capacidad limitada de los enlaces UHF no constituye una restricción: la información intercambiada se compone de estados, medidas y órdenes, que requieren un ancho de banda muy inferior al que ofrecen otras tecnologías. A continuación, la Tabla 5 resume y muestra esta comparación.

<i>Criterio</i>	<i>Telefonía móvil</i>	<i>Radio banda libre</i>	<i>Radio banda licenciada UHF</i>
Coste inicial	Bajo	Medio	Medio

Coste recurrente	Alto/medio	Bajo	Bajo
Dependencia de terceros	Alta	Baja	Baja
Riesgo de interferencias	Medio	Alto	Bajo
Control sobre la red	Bajo	Medio	Alto
Adecuación a telecontrol crítico	Media	Media-baja	Alta
Necesidad de legalización	No específica de frecuencia propia	No habitual	Sí

Tabla 4 Comparativa de tecnologías de comunicación para las estaciones remotas

5.3.2. BANDA DE FRECUENCIAS Y TOPOLOGÍA DE LA RED

La red diseñada opera en la banda UHF, en el rango comprendido entre 403 y 470 MHz. Esta banda resulta especialmente adecuada para el telecontrol de instalaciones dispersas, ya que ofrece un buen equilibrio entre el alcance y la capacidad de penetración frente a obstáculos [14], lo que la hace idónea para enlaces de medio alcance sobre terreno irregular, como el que caracteriza el entorno de las instalaciones.

La red presenta una topología en estrella, compuesta por una estación base situada en el centro de control de la ETAP y tres estaciones remotas, una en cada instalación externa. La estación base constituye el nodo central de la estrella y se comunica de forma directa e independiente con cada una de las tres remotas. Esta configuración es la más adecuada para el caso, ya que las estaciones remotas no necesitan intercambiar información entre sí, sino únicamente con el centro de control, que centraliza toda la supervisión y el mando.

La elección de los sistemas radiantes es coherente con esta topología. La estación base se equipa con una antena omnidireccional, que radia por igual en todas las direcciones del plano horizontal y permite, por tanto, dar cobertura simultánea a las tres remotas, situadas en distintas direcciones respecto a la ETAP. Las estaciones remotas, en cambio, se equipan con antenas directivas, orientadas hacia la ETAP, que concentran la potencia radiada en la

dirección del enlace con la base [14]. De este modo se maximiza la ganancia en el sentido del enlace y se mejora tanto el alcance como la relación señal-ruido, lo que contribuye a la fiabilidad de la comunicación.

5.3.3. EQUIPOS DE COMUNICACIONES

Cada nodo de la red incorpora los equipos necesarios para establecer y mantener el enlace radio. El elemento central de cada nodo es el radio-módem, un equipo que integra el módem y el transmisor-receptor de radio, y que se encarga de modular la información de telecontrol para su transmisión por el medio radioeléctrico y de demodular la señal recibida. Los radio-módems empleados son digitales, de tipo half-dúplex y transparente, y disponen de puerto RS-232 para su conexión con el equipo de control.

El carácter half-dúplex implica que la comunicación es bidireccional pero no simultánea: en un mismo instante, el enlace transmite en un único sentido, alternando entre transmisión y recepción. Esta característica es perfectamente adecuada para un sistema de telecontrol basado en interrogación cíclica, en el que el Centro de Control pregunta y la estación responde de forma secuencial, sin necesidad de comunicación simultánea en ambos sentidos. El carácter transparente, por su parte, significa que el radio-módem transmite la información sin alterarla, comportándose como un simple sustituto inalámbrico de una conexión cableada, lo que simplifica su integración con los equipos de control.

En el lado del centro de control, el armario central integra el radio-módem de la estación base junto con la antena omnidireccional en banda UHF [14], instalada con su sistema de sujeción a pared y su cable conectorizado. En el lado de cada estación remota, se dispone igualmente de un radio-módem del mismo tipo y de un sistema radiante con antena directiva. Adicionalmente, cada nodo incorpora un regulador de tensión específico para la alimentación del equipo de radio, que adapta la tensión de la fuente de alimentación a la requerida por el radio-módem [12].

Un aspecto relevante del diseño es la inclusión de protecciones contra sobretensiones en los circuitos de comunicaciones, mediante protecciones coaxiales instaladas en la línea de antena. Estas protecciones resultan especialmente importantes en este tipo de instalaciones, ya que las antenas, situadas en el exterior y a cierta altura, están expuestas a descargas atmosféricas que podrían dañar los radio-módems. Su inclusión contribuye, por tanto, a la

fiabilidad y la durabilidad del sistema. A continuación, en la Tabla 5 se resumen los equipos de comunicación que integra cada estación de la red, atendiendo al tipo de radio-módem y de antena empleados

<i>Estación</i>	<i>Función en la red</i>	<i>Radio-módem</i>	<i>Antena</i>	<i>Interfaz con el equipo de control</i>
ETAP La Lleda (estación base)	Estación base / centro de la estrella	Farell T-MOD C48+ (half-dúplex)	Omnidireccional, 4,5 dBi	RS-232 / RS-485
Bombeo de la Magdalena	Estación remota	Farell T-MOD C48+ (half-dúplex)	Directiva, orientada a la ETAP	RS-232 / RS-485
Depósito de La Carriona	Estación remota	Farell T-MOD C48+ (half-dúplex)	Directiva, orientada a la ETAP	RS-232 / RS-485
Depósito de La Lleda 2	Estación remota	Farell T-MOD C48+ (half-dúplex)	Directiva, orientada a la ETAP	RS-232 / RS-485

Tabla 5 Equipos de comunicación de cada estación

5.3.4. LEGALIZACIÓN DE LA RED RADIOELÉCTRICA

Como consecuencia directa de la elección de la banda licenciada, la puesta en servicio de la red exige su legalización ante la Dirección General de Telecomunicaciones, organismo competente en la gestión del espectro radioeléctrico [21]. Este proceso comprende la redacción de un proyecto técnico de legalización y la posterior certificación de las estaciones, e incluye la asignación de las frecuencias concretas de trabajo dentro de la banda UHF, se rige por el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias [22].

El proyecto contempla la legalización de las cuatro estaciones fijas que componen la red: la estación base de la ETAP y las tres estaciones remotas (Magdalena, La Carriona y La Lleda 2). Conviene destacar que este trámite, pese a representar un coste económico reducido en el conjunto del presupuesto, tiene un carácter crítico: sin la correspondiente autorización administrativa, la red de comunicaciones no puede entrar legalmente en funcionamiento, lo que condiciona la puesta en marcha de todo el sistema de telecontrol. Esta circunstancia ilustra cómo, en un proyecto de comunicaciones, un elemento de bajo coste puede resultar determinante para la viabilidad del conjunto.

5.4. DISEÑO DEL CENTRO DE CONTROL

El Centro de Control, ubicado en la ETAP La Lleda, constituye el elemento supervisor del sistema y el punto desde el que se opera el conjunto de las instalaciones. Es, por tanto, el nodo central de la arquitectura, donde converge toda la información procedente de las estaciones remotas y desde donde se emiten las órdenes y consignas hacia ellas. Su diseño abarca dos partes diferenciadas: el subsistema hardware del puesto de operador, orientado a la interacción con el usuario, y el armario de control central, que concentra la adquisición de datos de la planta y la gestión de las comunicaciones con las remotas.

5.4.1. SUBSISTEMA HARDWARE DEL PUESTO DE OPERADOR

El puesto de operador es el entorno físico desde el que el personal de explotación supervisa y opera el sistema. Su diseño se ha concebido en torno a una red local Ethernet, que interconecta los distintos elementos del Centro de Control y los integra con la plataforma SCADA. Los componentes principales son los siguientes:

- La **workstation** constituye el equipo central del puesto de operador. Se trata de un ordenador de altas prestaciones, en formato torre, encargado de ejecutar la conexión con la plataforma de explotación centralizada y de mostrar la aplicación SCADA. Dispone de los interfaces necesarios para comunicarse con sus periféricos: una salida de vídeo para el monitor del puesto de operador, una segunda salida de vídeo para el sistema de visualización de gran formato y un puerto Ethernet para la conexión a la red local de la ETAP. Se complementa con un sistema de alimentación

ininterrumpida (SAI) que protege el equipo frente a cortes del suministro eléctrico, evitando la pérdida de información y la interrupción de la supervisión.

- El **sistema de visualización de gran formato** consiste en un monitor profesional de 75 pulgadas, de alto brillo y resolución 4K, instalado en pared. Su función es permitir la supervisión en paralelo de la información mostrada en el puesto de operador, ofreciendo una visión global y permanente del estado del sistema. Este tipo de visualización resulta especialmente útil en un centro de control, ya que facilita que el operador, o varios operadores simultáneamente, mantengan una visión de conjunto de las instalaciones, con la representación de los sinópticos y la señalización de alarmas mediante cambios de color.
- Los **elementos de red y la conectividad** completan el subsistema. La red local Ethernet, articulada mediante switches, interconecta la workstation con el resto de equipos del Centro de Control, en particular con el armario de control central. Asimismo, el Centro de Control requiere conexión a Internet, necesaria para el funcionamiento de la plataforma de explotación centralizada y para los servicios de acceso remoto y movilidad web.

En la Figura 17 se detalla la arquitectura de red del sistema, con el autómata central, el puesto de operador y los enlaces radio hacia cada estación remota.

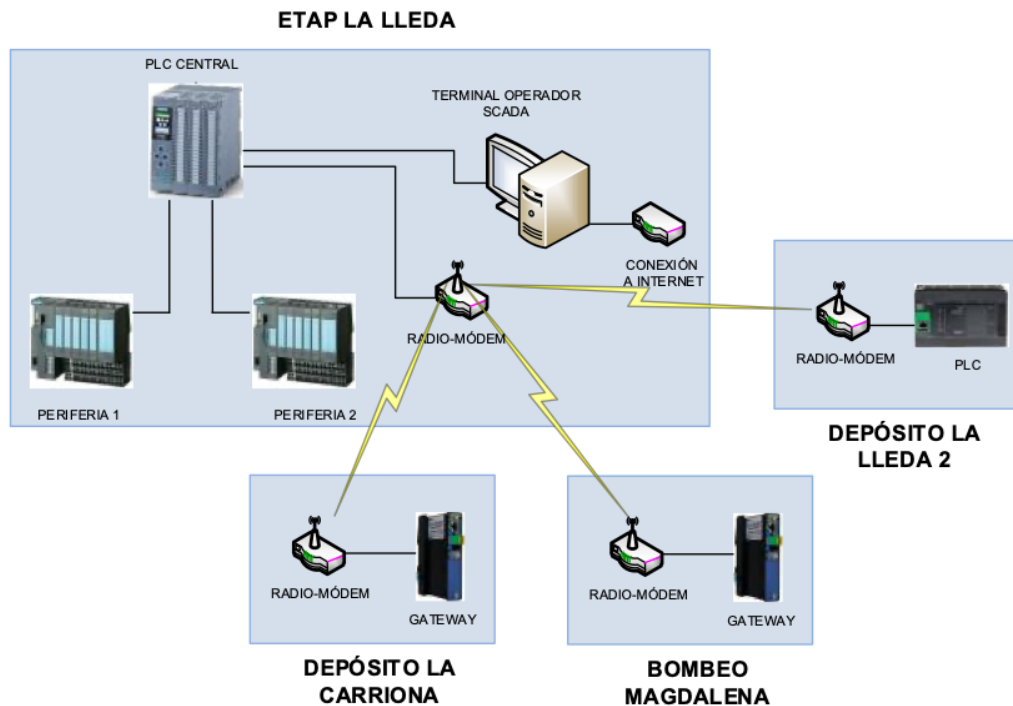


Figura 10 Arquitectura de red del sistema de telecontrol de la ETAP la Lleda (Fuente: Elaboración propia).

5.4.2. ARMARIO DE CONTROL CENTRAL

Si el puesto de operador es la cara visible del centro de control, el armario de control central es su núcleo funcional. En él se concentran los equipos encargados de adquirir las señales de la propia ETAP y de gestionar la comunicación con las estaciones remotas, actuando como punto de unión entre el proceso físico de la planta y la plataforma de supervisión. El armario se ha diseñado como un armario metálico individual, dotado de ventilación forzada y termostato para garantizar unas condiciones de funcionamiento adecuadas, y de las protecciones eléctricas correspondientes. Sus componentes principales son los siguientes:

- Un **equipo de control (autómata) para la adquisición de señales de la planta** [8], con interfaz Ethernet y capacidad para gestionar 96 entradas digitales, 16 salidas digitales, 16 entradas analógicas y 4 salidas analógicas. Este autómata recoge las señales procedentes de los distintos cuadros de la ETAP y las pone a disposición de la plataforma SCADA.

- Un **equipo de control específico para la gestión de la comunicación con las estaciones remotas**, dotado de interfaces Ethernet, RS-232 y RS-485. Este equipo actúa como frontal de comunicaciones, gestionando el intercambio de información con las remotas a través del radio-módem y realizando, cuando es necesario, la conversión entre los distintos protocolos e interfaces serie.
- El **equipo de comunicaciones**, compuesto por el radio-módem digital half-dúplex que da servicio a la estación base, conectado a la antena omnidireccional descrita en el apartado de comunicaciones.
- Un **analizador de red**, que supervisa los parámetros eléctricos de la instalación, y los switches no gestionados que articulan las conexiones Ethernet internas del armario y su enlace con el puesto de operador.
- Un **equipo de alimentación con respaldo**, compuesto por una fuente de alimentación, reguladores de carga y un conjunto de baterías, que garantiza la continuidad del funcionamiento del sistema ante un fallo del suministro eléctrico. Este respaldo es esencial en un centro de control, ya que asegura que la supervisión no se interrumpa en caso de corte de energía, precisamente en los momentos en que la información puede resultar más crítica.
- Las **protecciones contra sobretensiones**, tanto en la alimentación (protección de nivel II para la línea monofásica de 230 V y para la línea de 24 V) como en los circuitos de comunicaciones (protecciones coaxiales en la línea de antena), que protegen los equipos frente a descargas y sobretensiones.

5.4.3. INTEGRACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL CONJUNTO

El funcionamiento conjunto del centro de control se basa en la coordinación de estos dos subsistemas. El armario de control central adquiere de forma continua las señales de la planta y, a través del frontal de comunicaciones y el radio-módem, interroga cíclicamente a las estaciones remotas para recabar su información. Todos estos datos se integran en la plataforma SCADA, que se ejecuta sobre la workstation y se presenta al operador en el monitor del puesto y en el sistema de visualización de gran formato. Desde ese mismo entorno, el operador puede emitir órdenes de telemando y consignas, que siguen el camino inverso hasta llegar a los elementos electromecánicos de cada instalación. De este modo, el

Centro de Control integra en un único punto la supervisión y el mando de todo el sistema, cumpliendo su función de elemento central de la arquitectura.

5.5. DISEÑO DE LAS ESTACIONES REMOTAS

Las estaciones remotas son los nodos del sistema situados en cada una de las instalaciones que se desea telecontrolar. Su misión es doble: por un lado, adquirir las señales procedentes de la instrumentación y los equipos de campo de su instalación; por otro, ejecutar la lógica local de control que garantiza el funcionamiento autónomo de la instalación, incluso ante una eventual pérdida de comunicación con el centro de control. Cada estación envía la información recogida al centro de control y recibe de él las órdenes y consignas que correspondan.

Todas las estaciones comparten una estructura común, integrada por un equipo de control (autómata), un equipo de comunicaciones (radio-módem y sistema radiante), un sistema de alimentación y el correspondiente armario. No obstante, su diseño concreto varía en función de las características de cada instalación y, sobre todo, de si se trata de una ampliación del telemando preexistente o de una integración sobre la infraestructura existente. A continuación, se describe el diseño de cada una de ellas.

5.5.1. ETAP LA LLEDA

Aunque la ETAP alberga el Centro de Control, es a su vez la instalación con mayor densidad de instrumentación de campo del sistema, al concentrar los procesos de tratamiento y potabilización. Su diseño contempla la automatización y supervisión de las distintas etapas del proceso, distribuidas en varios armarios de periferia conectados al armario central mediante red Ethernet.

En la **entrada de planta** se supervisa el caudal de entrada mediante un caudalímetro electromagnético. En la etapa de **decantación** se controla el nivel de los decantadores mediante sondas de nivel radar, actuando sobre las válvulas y las purgas correspondientes. En la etapa de **filtración** se integra la lógica de control del bombeo de agua de lavado de los

filtros; para ello se sustituye el equipo de control previo por nueva periferia, debido a que el protocolo de comunicaciones del equipo anterior no resultaba compatible con el nuevo sistema, e incorpora un volumen elevado de señales (con capacidad para 96 entradas digitales, 48 salidas digitales, 40 entradas analógicas y 12 salidas analógicas), lo que refleja la complejidad de esta zona. En la **salida de planta** se supervisan el nivel del depósito de salida y el caudal de salida, y se controla el bombeo correspondiente. A todo ello se añaden los **paneles de analítica**, que miden los parámetros de calidad del agua (pH, cloro libre, turbidez y conductividad) en los distintos puntos del proceso, desde la entrada hasta la salida de los depósitos.

Por su papel central y su elevada instrumentación, la ETAP es la instalación que mayor esfuerzo de diseño concentra, y sus señales se integran directamente en el armario de control central descrito en el apartado anterior.

5.5.2. BOMBEO DE LA MAGDALENA

El bombeo de la Magdalena actúa como captación y suministro de agua bruta a la ETAP, por lo que su correcto funcionamiento es esencial para la operación del conjunto. La instalación dispone de un telemando preexistente, de modo que su diseño no parte de cero, sino que consiste en la ampliación de funcionalidades sobre la infraestructura existente.

El diseño contempla la integración, en el armario eléctrico existente, de un equipo de control para la gestión y conversión de comunicaciones, dotado de interfaces Ethernet, RS-232 y RS-485, que permite comunicar la estación con el Centro de Control. A este equipo se añaden el equipo de comunicaciones radio (radio-módem half-dúplex), la fuente de alimentación con su regulador de tensión para el equipo de radio, y un sistema radiante con antena directiva en banda UHF orientada hacia la ETAP. El diseño incluye además el cableado de la señalización del transmisor de medida existente, que comunica mediante protocolo Modbus [12], así como la modificación del esquema eléctrico del armario para incorporar los nuevos equipos. Se aprovecha así la infraestructura disponible (switch y alimentaciones existentes), integrando sobre ella los elementos necesarios para el telecontrol.

5.5.3. DEPÓSITO DE LA CARRIONA

El depósito de La Carriona es una instalación de almacenamiento y regulación dentro de la red de distribución. Al igual que en el bombeo de la Magdalena, su diseño consiste en la integración del equipamiento de telecontrol sobre el armario eléctrico existente, aprovechando la infraestructura ya disponible.

La estación incorpora un equipo de control para la gestión y conversión de comunicaciones, con interfaces Ethernet, RS-232 y RS-485, el equipo de comunicaciones radio, la fuente de alimentación con su regulador para el equipo de radio, y un sistema radiante con antena directiva en banda UHF. El diseño aprovecha el switch y la fuente de alimentación existentes, sobre los que se integran los nuevos equipos, e incluye la modificación del esquema eléctrico del armario para reflejar las incorporaciones. De este modo, la estación queda integrada en la red de telecontrol con una intervención mínima sobre la instalación existente.

5.5.4. DEPÓSITO DE LA LLEDA 2

El depósito de La Lleda 2 es igualmente una instalación de almacenamiento, con la que se establece la comunicación con el Centro de Control. A diferencia de las dos anteriores, su diseño contempla la instalación de un **armario de control completo y nuevo**, que sustituye al armario existente, lo que permite dotar a la estación de un equipamiento homogéneo y plenamente integrado.

El nuevo armario, de poliéster y con sus correspondientes protecciones eléctricas, integra un **equipo de control** con interfaz Ethernet y serie, con capacidad para 14 entradas digitales, 10 salidas digitales y 4 entradas analógicas, acorde con las necesidades de la instalación. Se completa con el **equipo de comunicaciones radio** (radio-módem half-dúplex), la **fuente de alimentación** con su regulador para el equipo de radio, las **protecciones contra sobretensiones** en la alimentación y en los circuitos de comunicaciones, y un **sistema radiante con antena directiva** en banda UHF, instalada aprovechando el mástil existente. La sustitución completa del armario permite, en este caso, partir de una base homogénea con el resto del sistema.

5.5.5. SÍNTESIS COMPARATIVA DE LAS ESTACIONES REMOTAS

Las cuatro instalaciones presentan, por tanto, enfoques de diseño distintos según su naturaleza y su punto de partida. Mientras que el bombeo de la Magdalena y el depósito de La Carriona se resuelven mediante la integración del equipamiento sobre los armarios existentes, el depósito de La Lleda 2 requiere la instalación de un armario completamente nuevo, y la ETAP, por su papel central y su elevada instrumentación, concentra el grueso de la adquisición de señales. Esta diversidad de situaciones es habitual en los proyectos de telecontrol, en los que el diseño debe adaptarse a la realidad de cada instalación, aprovechando la infraestructura existente siempre que sea posible. La siguiente tabla resume las características principales de cada estación remota.

<i>Estación</i>	<i>Tipo de intervención</i>	<i>Equipo de control</i>	<i>Señales (ED/SD/EA)</i>	<i>Antena</i>
ETAP La Lleda	Centro de Control + adquisición	Autómata central	96/16/16 (+4 SA)	Omnidireccional
Bombeo Magdalena	Ampliación sobre existente	Gestión/conversión comms	Según instalación	Directiva
Depósito La Carriona	Integración sobre existente	Gestión/conversión comms	Según instalación	Directiva
Depósito La Lleda 2	Armario nuevo completo	Autómata con E/S	14/10/4	Directiva

Tabla 6 Síntesis comparativa de las estaciones del sistema

5.6. DISEÑO DEL SUBSISTEMA SOFTWARE (SCADA)

El subsistema software constituye la interfaz de explotación del sistema y es el elemento con el que interactúa directamente el operador. Si el hardware y las comunicaciones conforman el soporte físico del telecontrol, el SCADA es la capa que da sentido a toda esa infraestructura, al traducir el flujo de datos en información comprensible y al permitir el mando de las instalaciones. Su diseño se basa en una plataforma SCADA de explotación centralizada, que integra la supervisión, el control y la gestión de la información de todas las instalaciones en un único entorno.

5.6.1. PLATAFORMA DE EXPLOTACIÓN CENTRALIZADA

La solución adoptada se basa en una plataforma SCADA centralizada, concebida como una evolución respecto a los SCADA convencionales [7] [23]. Frente a estos, la plataforma elegida ofrece una serie de características que la hacen especialmente adecuada para la gestión de un conjunto de instalaciones distribuidas:

- **Acceso web multiplataforma**, que permite la consulta y la operación del sistema desde distintos dispositivos (ordenador, tableta o teléfono móvil), sin necesidad de software específico instalado, lo que facilita la movilidad del personal de explotación.
- **Visualización avanzada de la información**, superior a la de un SCADA tradicional, orientada a ofrecer una visión clara y agregada del estado de las instalaciones.
- **Entorno orientado a la ciberseguridad**, acorde con la condición de infraestructura crítica de las instalaciones del ciclo del agua, que incorpora las medidas de protección necesarias frente a accesos no autorizados.
- **Comunicación mediante protocolos estándar**, como OPC [13] o Modbus [12], que permite la integración de equipos de distintos fabricantes y garantiza la interoperabilidad del sistema.

La plataforma se estructura en dos módulos funcionales principales. El módulo SCADA integra las funciones de visualización, control y mando, y la generación de alarmas y

notificaciones. El módulo de acceso remoto y movilidad web integra los servicios de visualización y explotación en línea, así como la generación de informes, dando soporte al acceso multiplataforma. Esta organización modular permite separar las funciones de supervisión y control propiamente dichas de los servicios de acceso y explotación remota.

Un aspecto que no puede pasarse por alto en el diseño es la ciberseguridad, especialmente teniendo en cuenta que las instalaciones del ciclo del agua tienen la consideración de infraestructura crítica. La plataforma adoptada se concibe, por ello, sobre un entorno orientado a la seguridad, alineado con los principios que recogen los estándares de referencia en seguridad de los sistemas de automatización y control industrial, como la norma IEC 62443 [11]. En la Figura 18 se muestra la arquitectura de red sobre la que se sustenta esta plataforma, organizada en niveles separados por cortafuegos. La red corporativa (IT) y la red de control de proceso (OT) no se comunican de forma directa, sino a través de una zona desmilitarizada (DMZ) intermedia que media todo el tráfico entre ambas. Esta segmentación, junto con el control de los accesos remotos y el aislamiento del entorno de operación, refleja el principio de defensa en profundidad que promueve la IEC 62443 [23], de modo que un eventual compromiso de la red IT no alcanzaría directamente a los sistemas que gobiernan el proceso.

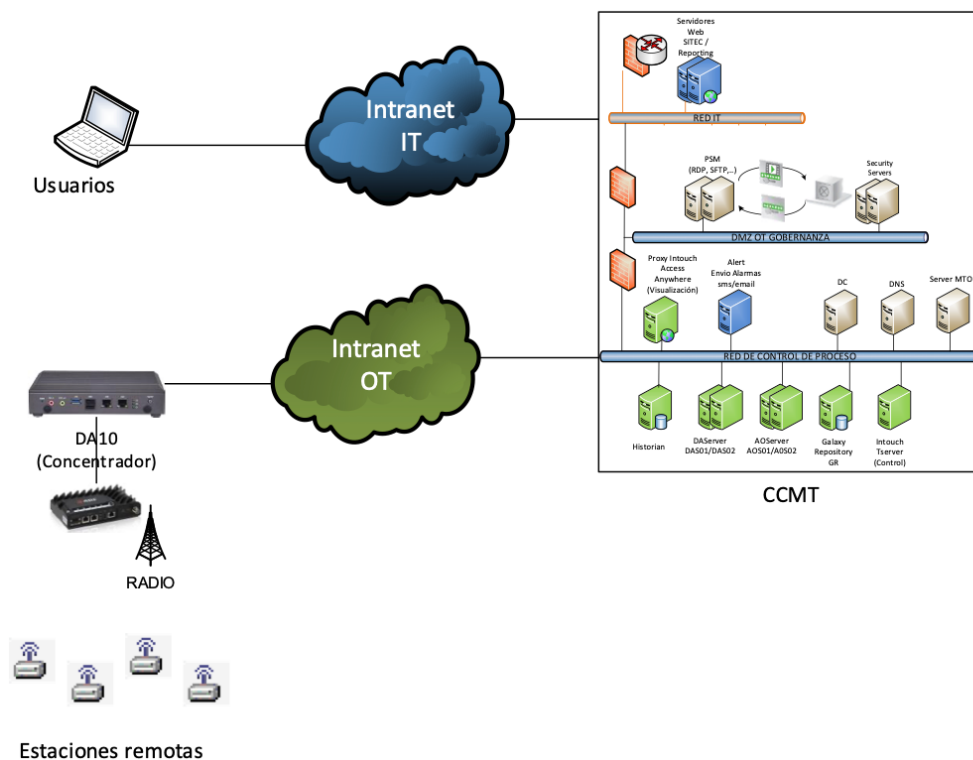


Figura 11 Arquitectura de red segmentada IT/OT del centro de control CCMT (Fuente: Elaboración propia a partir de IEC 62443 [11]).

Entre estos principios destacan la segmentación de la red, que separa la red de operación (OT) de las redes corporativas y de Internet para reducir la superficie de exposición; la defensa en profundidad, basada en establecer varias capas de protección en lugar de confiar en una sola barrera; y el control de accesos por perfiles de usuario, de modo que cada operador disponga únicamente de los permisos estrictamente necesarios para su función. En coherencia con estos criterios, el diseño contempla una gestión de los accesos por niveles y prevé que la conexión de la plataforma con el exterior se realice a través de los elementos de protección adecuados. No obstante, el desarrollo detallado de la arquitectura de ciberseguridad, con la definición concreta de zonas, conductos y políticas de seguridad conforme a la norma citada, excede el alcance de este trabajo y se plantea como una de las líneas de desarrollo futuro.

5.6.2. MODELADO DE LA INFORMACIÓN: EL CONCEPTO DE ACTIVO

Uno de los aspectos centrales del diseño del SCADA es la forma en que se modela la información procedente del campo. En la plataforma adoptada, cada elemento de las instalaciones se representa como un **activo**, entendido como una entidad que agrupa la información, la representación gráfica y la funcionalidad asociadas a un elemento concreto del sistema.

Así, cada medidor (de nivel, caudal, presión o parámetros de calidad), cada bomba, cada válvula o cada elemento eléctrico se modela como un activo independiente, con su propio icono representativo, sus señales asociadas, sus alarmas y su acceso a los datos históricos. Los activos se integran en dos niveles de visualización: el **sinóptico general**, basado en el esquema hidráulico de la red, que ofrece una visión de conjunto; y las **pantallas específicas de cada estación**, que detallan los activos de cada instalación concreta. Esta organización por activos resulta especialmente ventajosa, ya que homogeneiza el tratamiento de elementos de muy distinta naturaleza, facilita la navegación del operador y simplifica la ampliación del sistema, puesto que la incorporación de un nuevo elemento se traduce en la creación de un nuevo activo del tipo correspondiente.

A modo de ejemplo, un activo de tipo medidor (nivel, presión, caudal) muestra su valor numérico, un gráfico específico con sus alarmas y una ventana emergente con la información relevante y el acceso a históricos, accesible tanto desde el sinóptico general como desde la pantalla de la estación. Un activo de tipo bomba o válvula, por su parte, muestra su estado de funcionamiento mediante un icono que cambia de color, e incorpora, según su nivel de funcionalidad, las opciones de control correspondientes.

5.6.3. SUPERVISIÓN Y VISUALIZACIÓN

El diseño de la visualización persigue ofrecer al operador una visión clara y jerarquizada del estado del sistema. Para ello se contemplan distintos elementos. Los **cuadros de mando** resumen la información recogida de varias instalaciones, ofreciendo una visión global de un vistazo. Los **sinópticos basados en la red hidráulica** representan esquemáticamente las instalaciones y el flujo del agua, situando cada activo en su contexto. Las **gráficas de**

tendencia permiten analizar la evolución temporal de las principales variables, y las **tablas resumen de alarmas** informan de las incidencias activas. Por último, los **iconos específicos** del estado de los actuadores, con su código de colores, permiten identificar rápidamente el estado de bombas y válvulas.

Esta organización en distintos niveles —desde la visión global de los cuadros de mando hasta el detalle de cada activo— permite al operador navegar con facilidad entre la visión de conjunto y la información concreta de cada elemento, adaptándose a las distintas necesidades de la explotación.

5.6.4. GESTIÓN DE ALARMAS Y NOTIFICACIONES

Una de las funciones más relevantes del SCADA es la gestión de alarmas, que permite detectar y comunicar las situaciones anómalas del sistema. El diseño contempla la creación y configuración de alarmas asociadas a los distintos activos, que se activan cuando una variable supera los umbrales establecidos o cuando se produce un fallo en un equipo o en la instrumentación.

Las alarmas se señalizan visualmente en la interfaz, mediante cambios de color de los iconos y su inclusión en las tablas de alarmas, lo que permite al operador identificarlas de inmediato. Además, el sistema contempla el envío de **notificaciones** al personal de explotación mediante mensajes de texto (SMS) o correo electrónico, lo que resulta especialmente útil para comunicar incidencias cuando no hay un operador presente ante el puesto de control. De este modo, se reduce el tiempo de reacción ante las incidencias, uno de los objetivos fundamentales del proyecto.

5.6.5. CONTROL Y ENVÍO DE CONSIGNAS

Además de la supervisión, el SCADA diseñado permite el control de los elementos maniobrables de las instalaciones. Este control se materializa de dos formas complementarias. Por un lado, mediante **órdenes directas** sobre los actuadores, como el arranque o paro de una bomba o la apertura o cierre de una válvula, que el operador ejecuta desde la pantalla del activo correspondiente. Por otro, mediante el **envío de consignas**, que

son valores que el operador puede modificar para ajustar el comportamiento automático del sistema, como los niveles de arranque y paro de una bomba, los niveles de apertura y cierre de una válvula o los valores de alarma de un medidor.

El envío de consignas resulta particularmente potente, ya que permite ajustar el funcionamiento de las instalaciones de forma remota, sin necesidad de desplazamiento ni de actuación local, y delegando la ejecución en la lógica del autómatas de cada estación. Así, el SCADA no solo supervisa, sino que permite operar y optimizar el funcionamiento del conjunto del sistema desde el Centro de Control, cumpliendo plenamente su función de interfaz de explotación.

5.7 CONSIDERACIONES PARA LA IMPLANTACIÓN DEL SISTEMA

El presente trabajo tiene por objeto el diseño del sistema de telecontrol y comunicaciones, así como la validación de sus enlaces radioeléctricos, que se aborda en el capítulo siguiente. La implantación física del sistema correspondería a una fase de ejecución posterior, fuera del alcance de este proyecto. No obstante, resulta conveniente recoger las consideraciones técnicas principales que dicha implantación conllevaría, ya que condicionan algunas de las decisiones de diseño y permiten valorar su viabilidad práctica. Estas consideraciones abarcan el despliegue del equipamiento, la configuración de la red de comunicaciones, la programación de la lógica de control y del SCADA, y el proceso de legalización, pruebas y puesta en servicio.

5.7.1. DESPLIEGUE DEL EQUIPAMIENTO DE CAMPO

La primera fase de la implantación consistiría en el despliegue del equipamiento en cada instalación. En las estaciones remotas, ello implica la instalación o adaptación de los armarios de control, la conexión de la instrumentación de campo (sondas de nivel radar, caudalímetros, sondas de presión y paneles de analítica) y el montaje de los sistemas radiantes. La instalación de las antenas reviste especial importancia desde el punto de vista de las comunicaciones, ya que su ubicación y orientación condicionan directamente la calidad del enlace.

En particular, las antenas directivas de las estaciones remotas deberían orientarse con precisión hacia la estación base de la ETAP, de modo que el lóbulo principal de radiación quede alineado con la dirección del enlace, maximizando así la ganancia efectiva y la relación señal-ruido. Asimismo, sería necesario garantizar, en la medida de lo posible, la existencia de línea de visión directa entre las antenas, así como el despeje de la primera zona de Fresnel, con el fin de minimizar las pérdidas por difracción y obstrucción. La altura de instalación de las antenas, condicionada por la infraestructura existente (mástiles, edificios), es otro factor determinante que habría sido validado previamente en la fase de simulación.

5.7.2. CONFIGURACIÓN DE LA RED DE COMUNICACIONES

Una vez desplegado el equipamiento radiante, procedería la configuración de los equipos de comunicación. Esta tarea incluye la parametrización de los radio-módems, estableciendo la frecuencia de trabajo asignada en la banda UHF, la velocidad de transmisión y los parámetros del puerto serie (RS-232) que los conecta con los equipos de control. Al tratarse de radio-módems transparentes, su configuración resulta relativamente sencilla, ya que se comportan como un enlace serie inalámbrico, sin alterar la información transmitida.

En el lado del Centro de Control, sería necesario configurar el equipo frontal de comunicaciones, encargado de gestionar el direccionamiento de las estaciones remotas y la conversión entre las distintas interfaces (Ethernet, RS-232 y RS-485). Dado que la red emplea una topología en estrella con acceso half-dúplex, la configuración debe contemplar el esquema de interrogación cíclica (*polling*), de manera que el Centro de Control consulte secuencialmente a cada estación remota, evitando colisiones en el medio compartido. La definición de los tiempos de ciclo y de los *timeouts* de respuesta sería un aspecto a ajustar para garantizar un refresco adecuado de la información sin sobrecargar el enlace.

5.7.3. PROGRAMACIÓN DE LA LÓGICA DE CONTROL

La implantación requeriría la programación de la lógica de control de cada autómata. Cada estación remota debe ejecutar de forma autónoma las funciones de control local previstas en el diseño, de modo que la instalación siga operando correctamente incluso ante una pérdida de comunicación con el Centro de Control. Esta lógica incluiría, por ejemplo, las secuencias de arranque y paro de las bombas en función de los niveles de los depósitos, la actuación

sobre las válvulas según las consignas establecidas o la gestión de las condiciones de alarma a nivel local.

La programación debería contemplar, asimismo, el tratamiento de las señales adquiridas (entradas digitales y analógicas) y la generación de las órdenes hacia los actuadores (salidas digitales y analógicas), así como la preparación de la información que se pone a disposición del Centro de Control a través del equipo de comunicaciones. La compatibilidad de protocolos resultaría aquí un aspecto crítico, especialmente en aquellas instalaciones donde se integra instrumentación preexistente que comunica mediante Modbus.

5.7.4. CONFIGURACIÓN DEL SUBSISTEMA SCADA

De forma paralela, sería necesario configurar la plataforma SCADA para traducir el diseño del subsistema software en un sistema operativo. Esta tarea comprende el alta de cada uno de los activos (medidores, bombas, válvulas, elementos eléctricos) en la plataforma, con su representación gráfica, sus señales asociadas y sus alarmas. A continuación, se desarrollarían los sinópticos basados en la red hidráulica y las pantallas específicas de cada estación, se configurarían las alarmas y las notificaciones por SMS o correo electrónico, y se definirían los niveles de acceso de los distintos perfiles de usuario.

Una parte relevante de esta configuración sería el alta de las señales en el *driver* de comunicaciones de la plataforma, que establece la correspondencia entre las variables del SCADA y las señales físicas adquiridas por los autómatas. De la correcta definición de esta correspondencia depende que la información mostrada al operador refleje fielmente el estado real de las instalaciones.

5.7.5. LEGALIZACIÓN, PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO

Con carácter previo a la entrada en servicio, sería imprescindible completar la legalización de la red radioeléctrica ante la Dirección General de Telecomunicaciones. Este trámite, que comprende la redacción del proyecto de legalización y la certificación de las cuatro estaciones fijas, es condición necesaria para la operación legal de la red y, por tanto, para la puesta en marcha del sistema.

Finalmente, se llevaría a cabo la fase de pruebas y puesta en servicio. Desde el punto de vista de las comunicaciones, esta fase incluiría la verificación de la calidad real de los enlaces

radio, contrastando los niveles de señal medidos a pie de antena con los valores previstos en la simulación, así como la comprobación de la tasa de errores y de la estabilidad de los enlaces. Desde el punto de vista del control, se verificarían la correcta adquisición de las señales, la respuesta de los telemandos, el funcionamiento de los automatismos locales y la generación de alarmas. Solo tras la validación satisfactoria de todas estas pruebas, el sistema podría darse por operativo y entrar en explotación.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El principal resultado de este Trabajo de Fin de Grado, desde la perspectiva de las comunicaciones, es la validación de la viabilidad de los enlaces radioeléctricos que sostienen el sistema de telecontrol. Esta validación se ha abordado por una doble vía: por un lado, mediante un estudio de cobertura basado en la simulación con el software Radio Mobile, que emplea el perfil real del terreno; por otro, mediante un balance de enlace analítico, calculado a partir de los parámetros de los equipos, que permite contrastar y respaldar los resultados de la simulación. En este capítulo se presentan ambos resultados y se realiza un análisis crítico de los mismos.

6.1. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO DE COBERTURA

El objetivo del estudio es determinar los perfiles de los enlaces entre las estaciones remotas y el Centro de Control, y verificar la viabilidad de establecer la comunicación radio. El estudio se plantea como un análisis teórico punto a punto, cuyo fin es evaluar el nivel de señal recibido en cada enlace y compararlo con el umbral mínimo necesario para considerar establecida la comunicación.

6.1.1. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES

El estudio parte de la ubicación real de las cuatro estaciones que componen la red, expresadas en coordenadas geográficas (WGS84), recogidas en la Tabla 7.

<i>Estación</i>	<i>Coordenadas (WGS84)</i>
Centro de Control – ETAP La Lleda	43°32'51"N 005°56'19"O
Depósito La Lleda 2	43°32'50"N 005°56'27"O
Bombeo Magdalena	43°32'31"N 005°55'24"O
Depósito La Carriona	43°32'13"N 005°56'34"O

Tabla 7 Localización de las estaciones (WGS84).

Sobre esta base, en la Figura 19 se representa la ubicación de las cuatro estaciones en el entorno de Avilés.

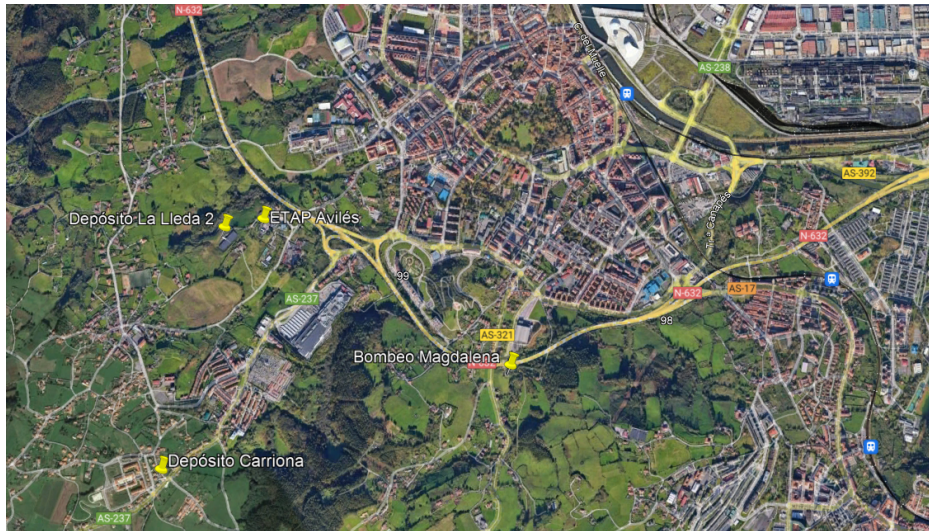


Figura 12 Ubicación de las estaciones en el entorno de Avilés (Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth).

A partir de estas coordenadas se han calculado las distancias de cada enlace respecto al Centro de Control, mediante la fórmula del semiverseno (*haversine*) [24]. Los resultados, recogidos en la Tabla 8, muestran que se trata de enlaces de corto alcance, todos ellos inferiores a 1,4 km, lo que constituye un primer indicio favorable para su viabilidad. En ella se encuentra la distancia de cada enlace al centro de control.

<i>Enlace</i>	<i>Distancia</i>
ETAP – Depósito La Lleda 2	0,182 km
ETAP – Depósito La Carriona	1,221 km
ETAP – Bombeo Magdalena	1,378 km

Tabla 8 Distancia de cada enlace al centro de control.

6.1.2. MODELO DE PROPAGACIÓN Y HERRAMIENTA

Para la predicción del campo se ha empleado el método de Longley-Rice [25], también conocido como modelo de terreno irregular. Este modelo realiza un análisis diferenciado de cada perfil en función del número de obstáculos y de si interfieren con la línea de vista, lo que lo hace especialmente adecuado para la propagación sobre el terreno irregular del entorno [26]. La herramienta Radio Mobile opera sobre el Modelo de Elevación Digital Global (DEM) SRTM de la zona, a partir del cual reconstruye el perfil del terreno entre cada par de estaciones [3].

Como se advierte en el propio estudio, los resultados teóricos pueden diferir de la realidad si existen divergencias en las coordenadas u obstáculos físicos o electromagnéticos no recogidos en el modelo digital del terreno, como edificios, torres de alta tensión o inhibidores de frecuencia.

6.2. PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN

La simulación considera que la comunicación se establece desde el centro de control hacia cada equipo receptor, empleando antenas omnidireccionales en la banda de 403 a 470 MHz [22]. Los parámetros de transmisión y recepción se recogen en la Tabla 9. Aunque el proyecto de ejecución contempla antenas directivas en las estaciones remotas, el estudio de cobertura de referencia se ha realizado con antenas omnidireccionales de 4,5 dBi tanto en transmisión como en recepción. Por ello, los cálculos analíticos de este trabajo mantienen dichos parámetros para ser coherentes con el estudio original y adoptar un criterio conservador. La configuración final prevista en ejecución, con antenas directivas en las remotas, mejoraría previsiblemente el margen efectivo del enlace.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Potencia de transmisión	10 W (40 dBm)
Tipo de antena (Tx y Rx)	Omnidireccional
Ganancia de antena (Tx y Rx)	4,5 dBi

Frecuencia del estudio	403–470 MHz
Longitud de cableado	10 m
Atenuación de cableado y conectores	0,5 dB
Altura del receptor	3 m
Sensibilidad del receptor	–103 dBm

Tabla 9 Parámetros de transmisión y recepción

Como sistema radiante de referencia se ha empleado una antena omnidireccional [14] en el rango de 375 a 512 MHz, con ancho de banda de 13 MHz, ganancia de 4,5 dBi, polarización vertical, potencia máxima de 150 W, impedancia de 50 Ω y SWR inferior a 1,5.

6.3. CÁLCULO DEL NIVEL DE CAMPO MEDIANO

La viabilidad de cada enlace se determina a partir del nivel de campo mediano, definido como el nivel de señal mínimo admisible a pie de antena, maximizado con las correcciones estadísticas correspondientes para proporcionar protección frente a la propagación multitrayecto y al desvanecimiento lento de tipo log-normal [27]. Constituye, por tanto, el umbral a partir del cual se considera establecida la comunicación.

Este nivel se obtiene a partir del campo mínimo utilizable en recepción, calculado con los parámetros del receptor (frecuencia, ganancia y sensibilidad), al que se aplican las correcciones por multitrayecto y estadísticas. Sobre el campo mínimo admisible se establece, además, un coeficiente de seguridad estimado en un 20 %, que garantiza unas buenas condiciones de nivel de señal en recepción. Solo se consideran factibles los enlaces cuyo nivel recibido supera el campo mediano así calculado.

6.4. BALANCE DE ENLACE ANALÍTICO

Con el fin de respaldar los resultados de la simulación con un cálculo independiente, se ha realizado un balance de enlace analítico para cada uno de los tres radioenlaces. Este balance permite estimar la potencia recibida en cada estación y el margen disponible respecto a la sensibilidad del receptor, a partir de los parámetros de la Tabla 9.

6.4.1. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

La potencia recibida en cada enlace se obtiene mediante la ecuación de balance de enlace, que en decibelios se expresa como:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - L_{bf} + G_{rx} - L_{rx}$$

donde P_{tx} es la potencia de transmisión (40 dBm), G_{tx} y G_{rx} son las ganancias de las antenas transmisora y receptora (4,5 dBi cada una), L_{tx} y L_{rx} son las pérdidas de cableado y conectores (0,5 dB cada una), y L_{bx} son las pérdidas de propagación en espacio libre.

Las pérdidas de propagación en espacio libre se calculan mediante la fórmula de Friis [28], expresada en función de la distancia y la frecuencia:

$$L_{bf}(dB) = 32,45 + 20 \cdot \log_{10}(d_{km}) + 20 \cdot \log_{10}(f_{MHz})$$

Para el cálculo se ha tomado una frecuencia representativa de 435 MHz, correspondiente al punto medio de la banda de trabajo (403–470 MHz). A partir de estos parámetros, la potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) del transmisor resulta:

$$PIRE = 40 + 4,5 - 0,5 = 44dBm$$

6.4.2. RESULTADOS DEL BALANCE DE ENLACE

Aplicando la metodología anterior a cada enlace, se obtienen los resultados recogidos en la Tabla 10. El margen de enlace se calcula como la diferencia entre la potencia recibida y la sensibilidad del receptor (−103 dBm).

<i>Enlace</i>	<i>Distancia (km)</i>	<i>L_{bf}(dB)</i>	<i>P_{rx}(dBm)</i>	<i>Margen (dB)</i>
ETAP – Depósito La Lleda 2	0,182	70,4	-22,4	80,6
ETAP – Depósito La Carriona	1,221	87,0	-39,0	64,0
ETAP – Bombeo Magdalena	1,378	88,0	-40,0	63,0

Tabla 10 Resultados del balance de enlace para cada radioenlace

Los resultados muestran que, incluso en el enlace más desfavorable (Bombeo Magdalena, el de mayor distancia), la potencia recibida estimada es de -40 dBm, muy por encima de la sensibilidad del receptor de -103 dBm, lo que se traduce en un margen de enlace de 63 dB. En el enlace más corto (Depósito La Lleda 2), el margen alcanza los 80,6 dB. Estos márgenes, extraordinariamente holgados, se explican por la corta distancia de los enlaces y confirman, mediante un cálculo analítico independiente, la viabilidad de las comunicaciones.

6.4.3. Verificación de la primera zona de Fresnel

Para garantizar que la propagación se aproxima a las condiciones de espacio libre asumidas en el balance, se ha calculado el radio de la primera zona de Fresnel [29] en el punto medio de cada enlace, mediante la expresión:

$$r_1 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\lambda \cdot d}$$

donde λ es la longitud de onda (0,69 m a 435 MHz) y d la distancia del enlace. Los resultados, recogidos en la Tabla 11, indican el despeje que debería garantizarse para evitar pérdidas por difracción.

<i>Enlace</i>	<i>Distancia (km)</i>	<i>Radio 1.ª zona de Fresnel (m)</i>
ETAP – Depósito La Lleda 2	0,182	5,6
ETAP – Depósito La Carriona	1,221	14,5
ETAP – Bombeo Magdalena	1,378	15,4

Tabla 11 Radio de la primera zona de Fresnel en el punto medio de cada enlace

Como criterio práctico, se considera suficiente un despeje del 60 % del radio de la primera zona de Fresnel para asumir condiciones de propagación próximas a las de espacio libre. En los enlaces estudiados, el radio máximo es de aproximadamente 15 m, un valor moderado que, dada la corta distancia de los enlaces y la posibilidad de instalar las antenas a una altura adecuada sobre la infraestructura existente, resulta razonablemente alcanzable. No obstante, la verificación definitiva del despeje requeriría el análisis del perfil real del terreno, que es precisamente lo que aporta la simulación con Radio Mobile.

6.5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

La simulación con Radio Mobile proporciona, para cada enlace, el perfil del terreno entre las estaciones y el nivel de campo recibido, lo que permite verificar la viabilidad considerando los obstáculos reales del terreno. Los resultados confirman que la comunicación es teóricamente viable entre las tres estaciones remotas (Bombeo Magdalena, Depósito La Carriona y Depósito La Lleda 2) y la ETAP La Lleda. En los tres casos, el nivel de campo recibido se sitúa por encima del umbral de campo mediano necesario, una vez aplicado el coeficiente de seguridad del 20 %. En la Figura 20 se presenta el perfil del radioenlace entre la ETAP La Lleda (Centro de Control) y el depósito La Lleda 2, obtenido mediante el software Radio Mobile.

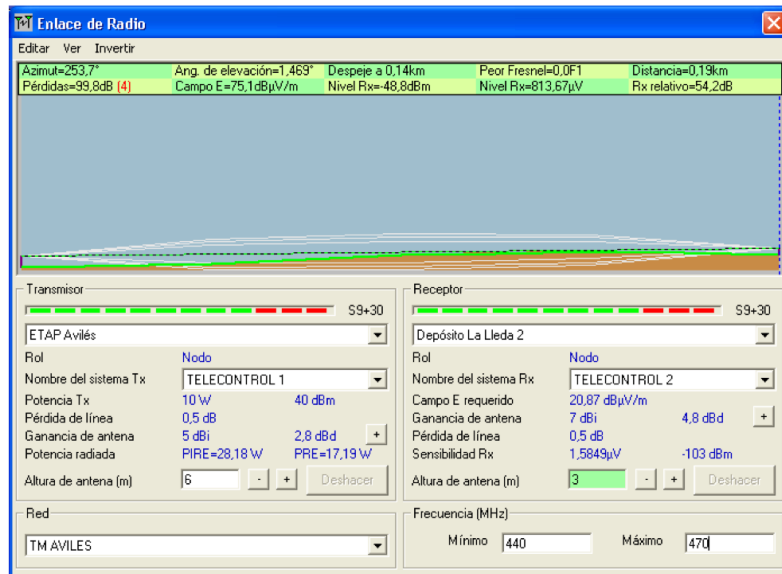


Figura 13 Perfil del enlace ETAP - Depósito La Lleda 2. (Fuente: Elaboración propia mediante RadioMobile)

En la Figura 21 se recoge el perfil del radioenlace entre la ETAP La Lleda y el depósito La Carriona, y en la Figura 22 se muestra el perfil del radioenlace entre la ETAP La Lleda y el bombeo Magdalena.

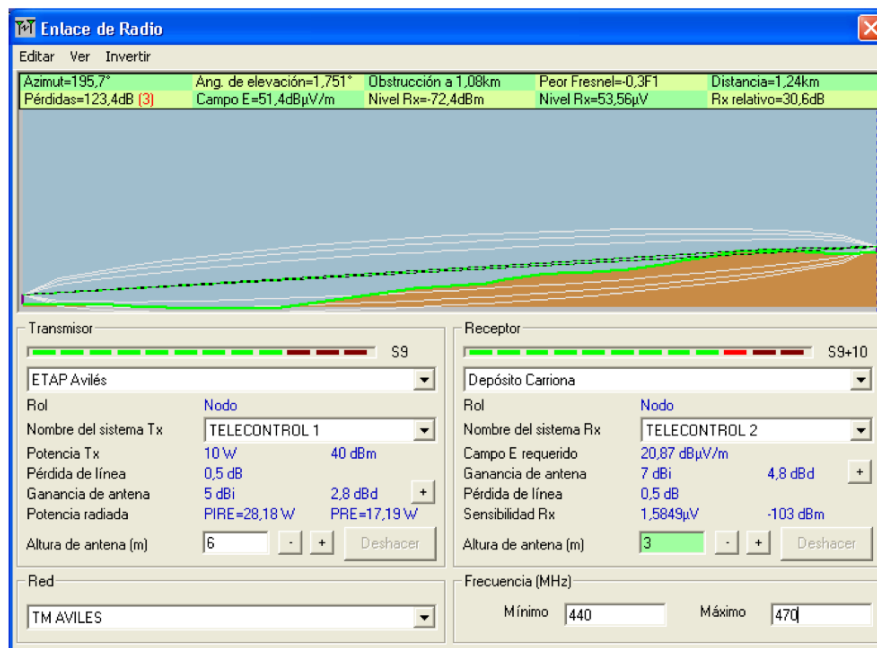


Figura 14 Perfil del enlace ETAP - Depósito Carriona (Fuente: Elaboración propia mediante RadioMobile).

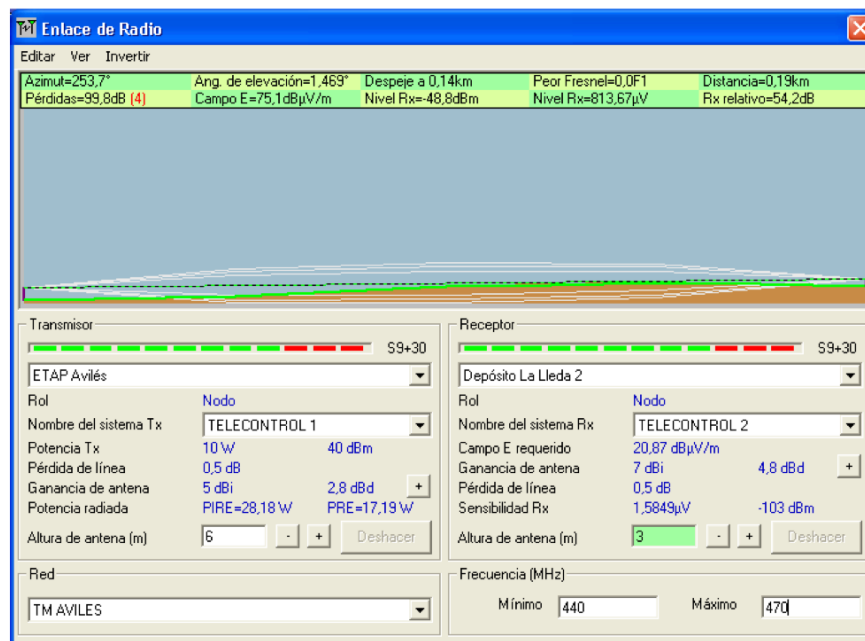


Figura 15 Perfil del enlace ETAP - Bombeo Magdalena (Fuente: Elaboración propia mediante RadioMobile).

La coincidencia entre los resultados de la simulación, que confirma la viabilidad de los tres enlaces, y los del balance de enlace analítico, que arroja márgenes superiores a 60 dB, refuerza la fiabilidad de la conclusión: ambos métodos, basados en planteamientos distintos, conducen al mismo resultado.

Los perfiles obtenidos mediante Radio Mobile confirman la viabilidad de los tres radioenlaces, si bien revelan un comportamiento diferenciado en cuanto al despeje de la primera zona de Fresnel. En el enlace con el depósito La Lleda 2, dada su reducida longitud (0,19 km), la primera zona de Fresnel queda completamente despejada y el nivel de señal recibido (-48,8 dBm) se sitúa muy por encima de la sensibilidad del receptor. En cambio, los enlaces con el bombeo Magdalena (1,37 km) y el depósito La Carriona (1,24 km) presentan una invasión parcial de la primera zona de Fresnel, con valores de despeje de -0,5F1 y -0,3F1 respectivamente, debido a la presencia de elevaciones del terreno próximas a la línea de visión directa entre las antenas. Esta obstrucción parcial introduce pérdidas adicionales por difracción respecto a las condiciones ideales de espacio libre, lo que explica que los niveles de señal recibidos en estos enlaces (-74,7 dBm y -72,4 dBm) sean inferiores

a los del primero. No obstante, ambos enlaces siguen cerrando con un margen de desvanecimiento holgado [30], del orden de 28 a 31 dB sobre el umbral de sensibilidad de -103 dBm, lo que garantiza un nivel de señal estable y suficiente para asegurar la disponibilidad de las comunicaciones incluso ante condiciones de propagación desfavorables. Cabe señalar que el criterio habitual de despeje del 60 % de la primera zona de Fresnel se establece para minimizar las pérdidas por difracción en enlaces críticos; en el presente caso, el elevado margen disponible y el empleo de la banda licenciada UHF, menos sensible a las obstrucciones que bandas superiores, permiten tolerar esta invasión parcial sin comprometer la fiabilidad del sistema de telecontrol.

6.6. ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos permiten extraer varias conclusiones, pero exigen también una valoración crítica de su alcance y limitaciones.

En primer lugar, tanto la simulación como el balance de enlace confirman que la elección de la banda licenciada UHF [26] y de la topología en estrella es técnicamente acertada: desde una única estación base se alcanzan las tres estaciones remotas con márgenes de señal muy holgados. Los márgenes obtenidos mediante el balance analítico (superiores a 60 dB) son extraordinariamente amplios, lo que se explica por la corta distancia de los enlaces (todos por debajo de 1,4 km). La simulación con Radio Mobile, que incorpora las pérdidas reales por difracción del terreno, arroja niveles de señal inferiores y, por tanto, márgenes más reducidos pero realistas, comprendidos entre 28 y 54 dB sobre el umbral de sensibilidad; la diferencia de unos 30 dB entre ambos métodos es coherente con el efecto de la difracción no contemplada en el modelo de espacio libre. Esto otorga al sistema una notable robustez: incluso ante atenuaciones adicionales no previstas (obstáculos, lluvia, desvanecimientos [30]), el enlace dispondría de un margen más que suficiente para mantenerse operativo.

No obstante, es necesario reconocer las limitaciones del estudio. El balance de enlace analítico asume condiciones de propagación en espacio libre, que no contemplan la atenuación por obstáculos ni los efectos del multitrayecto; por ello se complementa con la

simulación sobre el perfil real del terreno. Esta última, a su vez, es también un análisis teórico, basado en un modelo digital del terreno que, como el propio estudio advierte, no recoge todos los obstáculos reales (edificios, líneas eléctricas, etc.). Por tanto, los resultados deben interpretarse como una validación de viabilidad previa, que reduce el riesgo técnico del despliegue, pero no sustituye a la comprobación experimental, el hecho de que ambos métodos, pese a partir de hipótesis distintas, confirmen la viabilidad de los tres enlaces refuerza la solidez de la conclusión.

En segundo lugar, conviene matizar que los márgenes tan elevados, si bien son una garantía de fiabilidad, son también consecuencia directa de la corta distancia de las instalaciones. Este resultado, lejos de restar valor al estudio, confirma que el escenario es especialmente favorable para una solución de radio UHF, y que no sería necesario recurrir a soluciones más complejas (repetidores, mayores potencias o antenas de mayor ganancia) para garantizar la comunicación.

Finalmente, como línea de mejora, sería recomendable contrastar estos resultados teóricos con medidas de campo reales una vez desplegadas las antenas, verificando los niveles de señal efectivamente recibidos, el despeje real de la primera zona de Fresnel y la estabilidad de los enlaces a lo largo del tiempo. Esta verificación experimental cerraría el ciclo de validación iniciado con los cálculos y la simulación.

En definitiva, el análisis realizado cumple su objetivo: demuestra, mediante dos metodologías independientes y con un margen de seguridad razonable, que el sistema de comunicaciones diseñado es viable. Este resultado constituye la principal aportación técnica del trabajo, ya que valida la base sobre la que se sustenta todo el sistema de telecontrol.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este último capítulo cierra el Trabajo de Fin de Grado recogiendo sus conclusiones. Se sintetiza primero el trabajo realizado y se valora, de forma razonada, hasta qué punto se han cumplido los objetivos planteados al inicio. Se destacan después las aportaciones más relevantes, tanto técnicas como prácticas, y se proponen, por último, las líneas que permitirían dar continuidad al proyecto y completar el ciclo de diseño, validación e implantación.

7.1. CONCLUSIONES GENERALES

El trabajo ha abordado el diseño del sistema de telecontrol y comunicaciones de la ETAP La Lleda y de sus instalaciones asociadas. El punto de partida era una situación de control puramente local: instalaciones aisladas, sin supervisión remota ni comunicación entre ellas. Frente a ese escenario, la propuesta plantea una arquitectura de telecontrol centralizada que permite supervisar y operar todas las plantas a distancia desde un único centro de control.

Para llegar hasta ahí se ha seguido un recorrido completo de ingeniería. Se partió del análisis del problema y de la situación inicial, se continuó con el estudio del estado de la cuestión y la justificación de la solución adoptada, y se desembocó en el diseño detallado del sistema y en la validación técnica de sus comunicaciones. Cada subsistema se ha diseñado de forma específica: el sistema de comunicaciones radio, el centro de control con su hardware y su plataforma SCADA, y las estaciones remotas. Sobre esa base, se ha verificado la viabilidad de los radioenlaces que sostienen todo el conjunto. El resultado es una propuesta técnica completa, fundamentada y coherente, que responde a una necesidad operativa real y que se alinea con las tendencias de digitalización del sector del agua.

Desde la perspectiva de la ingeniería de telecomunicación, el proyecto ha exigido integrar conocimientos de ámbitos muy distintos: el diseño de redes y arquitecturas de comunicación, la selección de tecnologías de transmisión, el análisis de la propagación radioeléctrica y la planificación de radioenlaces. Tener que combinar todo ello sobre un caso real, y no sobre

un supuesto académico, ha sido probablemente uno de los aspectos más enriquecedores del trabajo. Los resultados obtenidos respaldan estas conclusiones con datos concretos. El estudio de cobertura confirma que los tres radioenlaces diseñados, con distancias comprendidas entre los 0,19 km del depósito de La Lleda 2 y los 1,37 km del bombeo de la Magdalena, cierran con holgura en la banda licenciada de 403 a 470 MHz. Los márgenes de enlace obtenidos, que oscilan entre los 28 dB de los enlaces más exigentes y los más de 50 dB del más favorable, garantizan la disponibilidad de las comunicaciones incluso ante condiciones de propagación desfavorables. La coincidencia entre el balance de enlace analítico y la simulación radioeléctrica, abordados como dos metodologías independientes, refuerza la fiabilidad de estas cifras y permite afirmar que la solución propuesta es técnicamente viable antes de acometer cualquier inversión en equipamiento.

7.2. GRADO DE CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS

El objetivo general, diseñar un sistema de telecontrol y comunicaciones técnicamente viable, escalable y coherente para la ETAP La Lleda y sus instalaciones asociadas, que permita su supervisión y operación remota desde un centro de control centralizado, se considera plenamente alcanzado. Ese cumplimiento se apoya en la consecución de cada uno de los objetivos específicos, que se valoran a continuación.

En cuanto al **análisis de la situación de partida y los requisitos**, se ha estudiado en detalle el estado inicial de las instalaciones, identificando para cada una las señales a supervisar (entradas digitales y analógicas), los elementos a telemandar y sus necesidades de comunicación. De ese análisis se ha derivado un conjunto estructurado de requisitos funcionales y no funcionales que ha guiado todas las decisiones de diseño posteriores. Con todo esto, se considera que el objetivo ha sido cumplido en su totalidad.

En el **diseño de la arquitectura del sistema**, se ha definido una arquitectura de telecontrol centralizada con topología en estrella, en la que el Centro de Control, ubicado en la ETAP, ocupa el nodo central y se comunica de forma directa con cada estación remota. Se han identificado y diseñado los tres elementos básicos del sistema y se ha establecido el flujo

bidireccional de información entre ellos. Por tanto, los requisitos propuestos se han alcanzado correctamente.

La **definición de la topología de comunicaciones** constituye, por su naturaleza, el núcleo del trabajo. Se ha diseñado el sistema de comunicaciones justificando técnicamente la elección de la radio en banda licenciada UHF frente a las alternativas de telefonía móvil y radio en banda libre, sobre criterios de fiabilidad, coste recurrente, inmunidad a interferencias y disponibilidad del espectro. Se ha definido la topología en estrella y se han seleccionado los sistemas radiantes coherentes con ella: antena omnidireccional en la base y antenas directivas en las remotas. Por ello, el objetivo se considera plenamente cumplido.

Respecto a la **selección y justificación de los equipos**, se han elegido y razonado los equipos de control y comunicación de cada instalación (automatas, radio-módems digitales half-dúplex, sistemas radiantes, equipos de alimentación con respaldo y protecciones contra sobretensiones). La selección se ha adaptado a las particularidades de cada estación, distinguiendo entre las que solo requieren ampliar el telemando existente y las que precisan un armario de control completamente nuevo. Es por ello que se han alcanzado los objetivos propuestos.

La **validación de los enlaces radioeléctricos**, de especial relevancia en un trabajo de telecomunicación, se ha abordado con un doble enfoque metodológico. Por un lado, se ha realizado un balance de enlace analítico basado en la ecuación de Friis, que ha permitido estimar la potencia recibida y el margen de enlace en cada uno de los tres radioenlaces. Por otro, se ha llevado a cabo una simulación de cobertura con el software Radio Mobile, que incorpora el perfil real del terreno mediante el modelo de propagación de Longley-Rice. Ambos métodos coinciden en confirmar la viabilidad de las comunicaciones, con márgenes de enlace superiores a 60 dB en todos los casos. El objetivo se considera ampliamente cumplido. Por último, en la **documentación de la propuesta**, se ha recogido el conjunto del diseño de forma estructurada, mediante esquemas, tablas y justificaciones técnicas, y se ha analizado su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

En conjunto, puede afirmarse que el trabajo ha alcanzado tanto su objetivo general como la totalidad de los específicos, lo que avala la solidez de la propuesta desarrollada.

7.3. APORTACIONES DEL TRABAJO

Más allá del cumplimiento de los objetivos, conviene detenerse en las aportaciones que constituyen el valor diferencial del trabajo.

La primera y principal es la **integración**, en un único diseño coherente, del sistema de telecontrol y del sistema de comunicaciones para un caso real concreto. Como se puso de manifiesto en el estado de la cuestión, buena parte de los trabajos y soluciones existentes abordan ambos aspectos por separado: unos se centran en la automatización y el control, y otros en las comunicaciones. Aquí se han tratado de forma conjunta, garantizando que las decisiones de diseño de un subsistema sean coherentes con las del otro y ofreciendo una visión de conjunto del sistema completo.

La segunda aportación, de carácter estrictamente técnico, es la **validación de los enlaces mediante dos metodologías independientes y complementarias**. Realizar un balance de enlace analítico propio, además de la simulación de cobertura, aporta una doble verificación que refuerza notablemente la fiabilidad de la conclusión. Que ambos métodos —uno basado en la propagación en espacio libre y otro en el perfil real del terreno— conduzcan al mismo resultado confiere a la validación una robustez que ningún enfoque aislado podría ofrecer. Este punto es especialmente relevante desde la óptica de la ingeniería de telecomunicación, porque demuestra el dominio tanto de los fundamentos analíticos de los radioenlaces como de las herramientas de planificación radioeléctrica.

La tercera aportación es el **carácter escalable y replicable** de la solución. La arquitectura en estrella no resuelve únicamente la situación actual, sino que admite incorporar nuevas estaciones como nuevos radios de la estrella, sin alterar las existentes. Eso convierte al trabajo en una base sólida para la digitalización progresiva de toda la red de abastecimiento, más allá de las cuatro instalaciones de esta primera fase.

Finalmente, cabe destacar el **enfoque realista** del trabajo, derivado de haberse desarrollado en colaboración con la entidad gestora. Trabajar con datos, equipos y restricciones reales ha evitado que el diseño quede como un ejercicio puramente teórico y lo ha convertido en una propuesta directamente aplicable, lo que incrementa de forma notable su valor práctico.

7.4. TRABAJOS FUTUROS

El trabajo desarrollado abre varias líneas de continuidad que permitirían cerrar el ciclo de diseño, validación e implantación del sistema. Se proponen las siguientes.

La línea más inmediata es la **validación experimental de los enlaces** una vez desplegadas las antenas. Consistiría en medir a pie de antena los niveles de señal realmente recibidos y contrastarlos con los valores teóricos del balance de enlace y de la simulación. Permitiría, además, comprobar el despeje efectivo de la primera zona de Fresnel, evaluar la tasa de errores de los enlaces y analizar su estabilidad a lo largo del tiempo y frente a distintas condiciones meteorológicas. Esta comprobación cerraría el ciclo de validación iniciado con los cálculos y la simulación.

El siguiente paso natural sería la **programación e implementación del sistema**, llevando el diseño al nivel de detalle operativo: desarrollar la lógica de control de cada autómatas y configurar por completo la plataforma SCADA, incluyendo el alta de los activos, el desarrollo de los sinópticos, la configuración de alarmas y notificaciones y la definición de los perfiles de usuario. Esta fase materializaría el diseño en un sistema plenamente operativo.

Dado el carácter de infraestructura crítica de las instalaciones del ciclo del agua, otra línea relevante sería la **profundización en la ciberseguridad** de la arquitectura. En el presente trabajo este aspecto se ha tratado a nivel de requisito, pero su desarrollo detallado conforme al marco IEC 62443 [15] y a la normativa de protección de infraestructuras críticas — singularmente el Real Decreto 123/2017 [13]— podría constituir por sí mismo el objeto de un estudio específico.

Aprovechando la escalabilidad de la solución, cabría también la **extensión del sistema a nuevas instalaciones** del servicio. Según la ubicación de las nuevas estaciones, esta ampliación podría exigir el análisis de enlaces de mayor distancia, lo que abriría la puerta a soluciones adicionales como el empleo de repetidores o de estaciones con antenas de mayor ganancia.

Por último, a partir de los datos históricos que recogería el sistema, podría desarrollarse una capa de **analítica de datos orientada al mantenimiento predictivo**. El análisis de las tendencias de las variables permitiría anticipar fallos en los equipos, optimizar la operación de las instalaciones y avanzar hacia una gestión inteligente del ciclo del agua. En esta línea, algunos trabajos recientes han demostrado la viabilidad de predecir el fallo de bombas a partir de datos de sensores (niveles, caudales, intensidades) mediante algoritmos de clasificación de aprendizaje automático integrados en el propio sistema SCADA [16], lo que sitúa esta evolución en plena coherencia con las tendencias más avanzadas del sector.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Retema, «El viaje del dato del agua. Cómo la digitalización mejora la gestión hídrica en España,» Diciembre 2025. [En línea]. Available: <https://www.retema.es/articulos-reportajes/el-viaje-del-dato-del-agua-como-la-digitalizacion-mejora-la-gestion-hidrica-en>. [Último acceso: Abril 2026].
- [2] Asturagua - Aguas de Avilés, «Información técnica general sobre la ETAP La Lleda y sus instalaciones asociadas,» Avilés, 2024.
- [3] Coudé, Roger, «Radio Mobile – Software de simulación de radiopropagación,» 1998. [En línea]. Available: <http://www.ipellejero.es/radiomobile/>. [Último acceso: Enero 2026].
- [4] United Nations, «Sustainable Development Goals (SDGs) – Agenda 2030,» 2015. [En línea]. Available: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. [Último acceso: Noviembre 2025].
- [5] Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento (AEAS), «XVII Encuesta Nacional de Suministro de Agua Potable y Saneamiento en España,» AEAS-AGA, Madrid, 2024.
- [6] S. Boyer, SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition, Research Triangle Park, NC: International Society of Automation (ISA), 2010.
- [7] E. Pérez-López, «Los sistemas SCADA en la automatización industrial,» *Tecnología en Marcha*, vol. 28, nº 4, pp. 3-14, 2015.
- [8] Siemens AG, «SIMATIC S7-1500, ET 200SP. Manual de sistema,» Siemens AG, Núremberg, 2023.
- [9] Universidad de Jaén, «Técnicas de Automatización Avanzadas en Procesos Industriales – Elementos de la Automatización Avanzada,» 2007. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/tesis/60.pdf>. [Último acceso: Enero 2026].

- [10] International Electrotechnical Commission (IEC), «IEC 60870-5-104. Telecontrol equipment and systems – Part 5-104: Transmission protocols,» IEC, Ginebra, 2006.
- [11] International Electrotechnical Commission (IEC), «IEC 62443 – Security for Industrial Automation and Control Systems,» International Electrotechnical Commission (IEC), Ginebra (Suiza), 2018.
- [12] Modbus Organization, «Modbus Application Protocol Specification V1.1b3,» Modbus Organization, Hopkinton, MA (EE. UU.), 2012.
- [13] O. Foundation, « OPC Unified Architecture Specification, Part 1: Overview and Concepts (IEC 62541-1),» OPC Foundation, Scottsdale, AZ, 2020.
- [14] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, «Apuntes de Radioenlaces – Parámetros básicos en la planificación y proyecto de radioenlaces,» 2009. [En línea]. Available: <https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/29/29328/apuntesderadioenlaces.pdf>. [Último acceso: Diciembre 2025].
- [15] L. F. Aleaga Loaiza, «Diseño de un sistema de telemetría y telecontrol (SCADA) para la red de distribución de agua potable de la ciudad de Loja,» Universidad de Cuenca, Maestría en Telemática, Cuenca, Ecuador, 2010.
- [16] J. Gausí Marín, «Sistema de comunicaciones para el control y automatización de un canal de distribución de agua,» Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla, 2015.
- [17] C. E. Ozuna Delgado, «Diseño y control de un sistema de abastecimiento de agua para una comunidad con desnivel significativo,» Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Escuela de Ingeniería de Bilbao, Bilbao, 2024.
- [18] Asturagua – Aguas de Avilés, «Proyecto de telecontrol Fase I. Presupuesto y mediciones,» Avilés, 2025.
- [19] Siemens AG, «SIMATIC NET. Comunicación industrial – Manual de sistema,» Siemens AG, Núremberg, 2023.
- [20] IEEE, «IEEE Std 802.3 – Standard for Ethernet,» Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Nueva York (EE. UU.), 2022.

- [21] Gobierno de España, «Real Decreto 123/2017, de 24 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento sobre el uso del dominio público radioeléctrico,» Boletín Oficial del Estado (BOE), Madrid, 2017.
- [22] Secretaría de Estado de Telecomunicaciones e Infraestructuras Digitales, «Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF). Orden ETD/1449/2021, de 16 de diciembre,» Boletín Oficial del Estado (BOE) , Madrid, 2021.
- [23] National Institute of Standards and Technology (NIST), «SP 800-82 Rev. 3. Guide to Operational Technology (OT) Security,» NIST, Gaithersburg, MD (EE. UU.), 2023.
- [24] A. G. Longley y P. L. Rice, «Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain: A Computer Method – 1968,» Institute for Telecommunication Sciences (NTIA), Technical Report ERL 79-ITS 67, Boulder, CO (EE. UU.), 1968.
- [25] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, Chichester: John Wiley & Sons, 2000.
- [26] R. W. Sinnott, «Virtues of the Haversine,» *Sky and Telescope*, vol. 68, nº 2, p. 159, 1984.
- [27] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R), «Recomendación UIT-R P.525-5. Cálculo de la atenuación en el espacio libre,» Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), Ginebra (Suiza), 2024.
- [28] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R), «Recomendación UIT-R P.526-16. Propagación por difracción,» Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), Ginebra (Suiza), 2025.
- [29] I. E. Commission, «IEC 61158. Industrial communication networks – Fieldbus specifications,» IEC, Ginebra, 2019.
- [30] Unión Internacional de Telecomunicaciones, «Recomendación UIT-R P.530-18. Datos de propagación y métodos de predicción para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa,» UIT, Ginebra, 2021.
- [31] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R), «Recomendación UIT-R P.1057-7. Distribuciones de probabilidad para el modelado de la propagación de las ondas radioeléctricas,» UIT, Ginebra, 2022.

-
- [32] Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R), «Recomendación UIT-R P.1546-6. Método de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de 30 MHz a 4000 MHz,» UIT, Ginebra, 2019.

ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS

INTRODUCCIÓN

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen el núcleo de la Agenda 2030 aprobada por la Asamblea General de Naciones Unidas en 2015, y conforman un marco de referencia global para orientar el desarrollo hacia criterios de sostenibilidad económica, social y ambiental [4]. La Agenda se articula en 17 objetivos, desglosados a su vez en 169 metas concretas.

Aunque el presente trabajo es un proyecto de ingeniería de carácter técnico, su objeto —la modernización del telecontrol de una infraestructura del ciclo del agua— guarda una relación directa con varios de estos objetivos. La gestión eficiente del agua, la digitalización de las infraestructuras y la mejora de los servicios públicos son ámbitos en los que la ingeniería de telecomunicación tiene un papel determinante. En este anexo se analiza, de forma razonada, la contribución del proyecto a los ODS con los que presenta una vinculación más estrecha: el ODS 6, el ODS 9 y el ODS 11. Adicionalmente, se identifican contribuciones de carácter secundario a los ODS 7 y 12.

I.2. ODS 6. AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO

El ODS 6 persigue garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. La contribución del proyecto a este objetivo es directa y constituye su vinculación más evidente, al actuar sobre una infraestructura del ciclo integral del agua.

En concreto, el sistema de telecontrol diseñado incide sobre la meta 6.4, relativa al uso eficiente de los recursos hídricos. La supervisión en tiempo real de niveles, caudales y presiones, junto con la capacidad de actuación remota sobre los elementos electromecánicos, permite operar las instalaciones cerca de su punto óptimo de funcionamiento y detectar de forma temprana anomalías como fugas o consumos anómalos. Esta capacidad de detección

y respuesta rápida se traduce en una reducción de las pérdidas de agua en la red, uno de los principales retos de la gestión hídrica. Asimismo, la integración de los paneles de analítica, que supervisan parámetros de calidad del agua como el pH, el cloro, la turbidez y la conductividad, contribuye a garantizar la calidad del agua suministrada, en línea con la meta 6.1 sobre el acceso a agua potable segura.

De este modo, el proyecto no solo mejora la eficiencia operativa, sino que refuerza la fiabilidad y la calidad de un servicio esencial, contribuyendo a una gestión más sostenible del recurso.

I.3. ODS 9. INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA

El ODS 9 busca construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación. El proyecto contribuye a este objetivo en su dimensión tecnológica, al modernizar y digitalizar una infraestructura crítica.

La sustitución de un modelo de control local aislado por una arquitectura de telecontrol centralizada, basada en autómatas programables, comunicaciones radioeléctricas y una plataforma SCADA, representa una actualización tecnológica que incrementa la resiliencia de la infraestructura, en consonancia con la meta 9.1, relativa al desarrollo de infraestructuras fiables y de calidad. La capacidad de supervisión remota y de respuesta rápida ante incidencias hace que la infraestructura sea más robusta frente a fallos y más fácil de mantener.

Por otra parte, la incorporación de tecnologías de comunicación y de digitalización conecta con la meta 9.4, sobre la modernización de las infraestructuras para hacerlas sostenibles, y con la meta 9.5, sobre el fomento de la innovación. Desde la perspectiva de la ingeniería de telecomunicación, el proyecto materializa precisamente ese papel de la tecnología como motor de modernización de las infraestructuras tradicionales, integrando la conectividad y la inteligencia en un sistema que antes operaba de forma manual y desconectada.

I.4. ODS 11. CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES

El ODS 11 tiene por finalidad lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. El proyecto contribuye a este objetivo en la medida en que mejora un servicio público esencial para la comunidad del concejo de Avilés.

La garantía de continuidad y calidad del suministro de agua es un componente básico de la sostenibilidad y la habitabilidad de cualquier núcleo urbano. Al dotar al sistema de abastecimiento de una capacidad de supervisión y operación remota, el proyecto reduce el riesgo de interrupciones del servicio y mejora la capacidad de respuesta ante incidencias, lo que repercute directamente en la calidad de vida de la población. Esta contribución se alinea con la meta 11.1, sobre el acceso a servicios básicos adecuados, y con la dimensión de resiliencia de las infraestructuras urbanas que recoge el objetivo. Una gestión más eficiente y anticipativa del agua es, en definitiva, un elemento de sostenibilidad urbana.

I.5. CONTRIBUCIONES SECUNDARIAS: ODS 7 Y ODS 12

Además de los tres objetivos principales, el proyecto presenta contribuciones de carácter secundario a otros dos ODS.

Respecto al **ODS 7 (Energía asequible y no contaminante)**, la optimización de la operación de los equipos electromecánicos —bombas y válvulas— que posibilita el telecontrol permite un uso más eficiente de la energía. La capacidad de operar las instalaciones cerca de su punto óptimo y de evitar funcionamientos innecesarios contribuye a la eficiencia energética del sistema, en línea con la meta 7.3 sobre la mejora de la eficiencia energética.

En cuanto al **ODS 12 (Producción y consumo responsables)**, la disponibilidad de datos históricos y la supervisión continua sientan las bases para una gestión basada en información, que favorece un uso responsable de los recursos. El análisis de los datos recogidos por el sistema permite identificar ineficiencias y optimizar el consumo de agua y energía, contribuyendo a la meta 12.2 sobre la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.

I.6. SÍNTESIS

La siguiente tabla resume la contribución del proyecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible identificados, junto con las metas concretas con las que se vincula y el mecanismo a través del cual se materializa dicha contribución.

<i>ODS</i>	<i>Metas vinculadas</i>	<i>Mecanismo de contribución</i>
ODS 6. Agua limpia y saneamiento	6.1, 6.4	Reducción de pérdidas, gestión eficiente y supervisión de la calidad del agua
ODS 9. Industria, innovación e infraestructura	9.1, 9.4, 9.5	Digitalización y modernización de una infraestructura crítica
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles	11.1	Mejora de la continuidad y fiabilidad de un servicio público esencial
ODS 7. Energía asequible y no contaminante	7.3	Operación eficiente de los equipos electromecánicos
ODS 12. Producción y consumo responsables	12.2	Gestión basada en datos y uso eficiente de los recursos

Tabla 12 . Síntesis de la contribución del proyecto a los ODS

En conclusión, el proyecto, pese a su naturaleza eminentemente técnica, presenta una contribución significativa y multidimensional a la Agenda 2030. Su aportación se concentra en los ODS 6, 9 y 11, a los que contribuye de forma directa mediante la gestión eficiente del agua, la modernización tecnológica de la infraestructura y la mejora del servicio público, y se extiende de forma secundaria a los ODS 7 y 12. Esta alineación pone de manifiesto que la digitalización de las infraestructuras del ciclo del agua, ámbito propio de la ingeniería de telecomunicación, es también una vía de contribución a la sostenibilidad.

ANEXO II: CÁLCULOS DEL BALANCE DE ENLACE RADIOELÉCTRICO

II.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL ANEXO

En el Capítulo 6 se ha presentado la validación de los enlaces radioeléctricos del sistema, combinando la simulación de cobertura con Radio Mobile y un balance de enlace analítico. Por claridad, en el cuerpo de la memoria solo se han recogido los resultados de ese balance. El presente anexo desarrolla, paso a paso, los cálculos que conducen a dichos resultados, de manera que cualquier lector pueda reproducirlos y verificarlos. Se detallan, por tanto, la obtención de las distancias entre estaciones, el cálculo de las pérdidas de propagación, el balance de potencia de cada enlace y la estimación de la primera zona de Fresnel.

II.2. DATOS DE PARTIDA

Todos los cálculos parten de los parámetros de los equipos definidos en el proyecto, que se resumen en la Tabla 13. Como frecuencia de cálculo se ha adoptado 435 MHz, valor representativo del punto medio de la banda de trabajo (403–470 MHz).

<i>Parámetro</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Valor</i>
Potencia de transmisión	P_{tx}	10 W (40 dBm)
Ganancia de antena transmisora	G_{tx}	4,5 dBi
Ganancia de antena receptora	G_{rx}	4,5 dBi
Pérdidas de cable y conectores (Tx)	L_{tx}	0,5 dB
Pérdidas de cable y conectores (Rx)	L_{rx}	0,5 dB
Sensibilidad del receptor	S_{rx}	-103 dBm
Frecuencia de cálculo	f	435 MHz

Tabla 13 Parámetros de los equipos empleados en el balance de enlace

Como paso previo, conviene expresar la potencia de transmisión en dBm, ya que el balance se desarrolla en unidades logarítmicas. Partiendo de los 10 W de potencia, se tiene:

$$P_{tx}(dBm) = 10 \cdot \log_{10}(10 \cdot 1000mW) = 40dBm$$

II.3. CÁLCULO DE LAS DISTANCIAS ENTRE ESTACIONES

El primer dato necesario para el balance es la distancia de cada enlace, que se obtiene a partir de las coordenadas geográficas (WGS84) de las estaciones, recogidas en el Capítulo 6. Dado que las coordenadas se expresan en latitud y longitud, la distancia entre dos puntos sobre la superficie terrestre se calcula mediante la fórmula del semiverseno (*haversine*) [26], que tiene en cuenta la curvatura de la Tierra:

$$d = 2R \cdot \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta\varphi}{2} \right) + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\Delta\lambda}{2} \right)} \right)$$

donde R es el radio terrestre (6 371 km), φ_1 y φ_2 son las latitudes de las dos estaciones, y $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$ son las diferencias de latitud y de longitud, respectivamente. Aplicando esta expresión a las coordenadas de cada estación remota respecto al Centro de Control de la ETAP, se obtienen las distancias recogidas en la Tabla 14.

<i>Enlace</i>	<i>Distancia</i>
ETAP – Depósito La Lleda 2	0,182 km
ETAP – Depósito La Carriona	1,221 km
ETAP – Bombeo Magdalena	1,378 km

Tabla 14 Distancias de los enlaces calculadas mediante la fórmula del semiverseno

Como puede observarse, se trata de enlaces de corto alcance, todos por debajo de 1,4 km, lo que ya anticipa unas condiciones de propagación favorables.

II.4. CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN EN ESPACIO LIBRE

Las pérdidas de propagación en espacio libre [27] (*Free Space Path Loss*, FSPL) representan la atenuación que experimenta la señal al propagarse entre las antenas, suponiendo un trayecto sin obstáculos. Se calculan mediante la fórmula de Friis, que, expresada en decibelios y con la distancia en kilómetros y la frecuencia en megahercios, adopta la forma:

$$L_{bf} \text{ (dB)} = 32,45 + 20 \cdot \log_{10}(d_{\text{km}}) + 20 \cdot \log_{10}(f_{\text{MHz}})$$

Aplicando esta expresión a cada enlace, con la frecuencia de 435 MHz, se obtienen los siguientes valores. Para el enlace con el depósito de La Lleda 2:

$$L_{bf} = 32,45 + 20 \cdot \log_{10}(0,182) + 20 \cdot \log_{10}(435) = 70,41 \text{ dB}$$

Para el enlace con el depósito de La Carriona:

$$L_{bf} = 32,45 + 20 \cdot \log_{10}(1,221) + 20 \cdot \log_{10}(435) = 86,95 \text{ dB}$$

Y para el enlace con el bombeo de la Magdalena:

$$L_{bf} = 32,45 + 20 \cdot \log_{10}(1,378) + 20 \cdot \log_{10}(435) = 88,00 \text{ dB}$$

Como era de esperar, las pérdidas crecen con la distancia, por lo que el enlace más desfavorable en este sentido es el del bombeo de la Magdalena, que es el más alejado.

II.5. BALANCE DE POTENCIA Y MARGEN DE ENLACE

Con las pérdidas de propagación ya calculadas, puede plantearse el balance de potencia completo de cada enlace. La potencia recibida en el receptor se obtiene sumando, en decibelios, las ganancias y restando las pérdidas a lo largo de toda la cadena:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - L_{bf} + G_{rx} - L_{rx}$$

Conviene notar que la combinación de la potencia de transmisión, la ganancia de la antena transmisora y las pérdidas de su cableado constituye la potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE), que en este caso vale:

$$\text{PIRE} = 40 + 4,5 - 0,5 = 44 \text{ dBm}$$

El margen de enlace se define, a su vez, como la diferencia entre la potencia recibida y la sensibilidad del receptor (-103 dBm). Este margen indica cuántos decibelios de holgura tiene el enlace por encima del mínimo necesario para establecer la comunicación; cuanto mayor es, más robusto resulta el enlace frente a atenuaciones imprevistas. Aplicando el balance a cada enlace se obtienen los resultados de la Tabla 15.

<i>Enlace</i>	<i>L_{bf} (dB)</i>	<i>P_{rx} (dBm)</i>	<i>Margen (dB)</i>
ETAP – Depósito La Lleda 2	70,41	-22,41	80,59
ETAP – Depósito La Carriona	86,95	-38,95	64,05
ETAP – Bombeo Magdalena	88,00	-40,00	63,00

Tabla 15 Resultados del balance de enlace para cada radioenlace

A modo de ejemplo del desarrollo completo, el balance del enlace más desfavorable, el del bombeo de la Magdalena, se calcula como:

$$P_{rx} = 40 + 4,5 - 0,5 - 88,00 + 4,5 - 0,5 = -40,00 \text{ dBm}$$

$$\text{Margen} = -40,00 - (-103) = 63,00 \text{ dB}$$

Incluso en este caso, el más exigente de los tres, el margen resultante es de 63 dB, una holgura muy amplia que confirma la viabilidad del enlace.

II.6. ESTIMACIÓN DE LA PRIMERA ZONA DE FRESNEL

Para que las pérdidas calculadas se aproximen a las de espacio libre [28], es necesario que el trayecto entre antenas se encuentre suficientemente despejado de obstáculos. La región que conviene mantener libre se describe mediante la primera zona de Fresnel, cuyo radio máximo, que se da en el punto medio del enlace, se calcula como:

$$r_1 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\lambda \cdot d}$$

donde λ es la longitud de onda y d la distancia del enlace. Para la frecuencia de cálculo de 435 MHz, la longitud de onda vale $\lambda = c / f = 0,69$ m. Aplicando la expresión a cada enlace se obtienen los radios recogidos en la Tabla 16.

<i>Enlace</i>	<i>Distancia (km)</i>	<i>Radio 1.ª zona de Fresnel (m)</i>
ETAP – Depósito La Lleda 2	0,182	5,60
ETAP – Depósito La Carriona	1,221	14,51
ETAP – Bombeo Magdalena	1,378	15,41

Tabla 16 Radio de la primera zona de Fresnel en el punto medio de cada enlace

Como criterio práctico de diseño, se considera suficiente mantener despejado al menos el 60 % de este radio para asumir condiciones de propagación próximas a las de espacio libre. En los enlaces estudiados, el radio máximo ronda los 15 metros, un valor moderado que, dada la corta distancia de los enlaces y la posibilidad de instalar las antenas a una altura adecuada sobre la infraestructura existente, resulta razonablemente alcanzable. La comprobación definitiva del despeje, no obstante, requiere el análisis del perfil real del terreno, que es precisamente lo que aporta la simulación con Radio Mobile recogida en el Capítulo 6.

II.7. CONCLUSIÓN DEL ANEXO

Los cálculos desarrollados en este anexo confirman, por vía analítica, la viabilidad de los tres radioenlaces del sistema. Todos ellos presentan márgenes de enlace superiores a 60 dB, muy por encima del umbral necesario, lo que se explica por la corta distancia entre las estaciones. Estos resultados coinciden con los obtenidos mediante la simulación de cobertura, de modo que ambos métodos, analítico y de simulación, se respaldan mutuamente y refuerzan la solidez de la conclusión sobre la viabilidad de las comunicaciones.

ANEXO III: DESGLOSE DE SEÑALES POR INSTALACIÓN

III.1. OBJETO DEL ANEXO

En el Capítulo 5 se ha analizado, a nivel general, el volumen de señales que el sistema debe gestionar, agrupándolas en cuatro categorías: entradas digitales (ED), salidas digitales (SD), entradas analógicas (EA) y salidas analógicas (SA). Por claridad, en el cuerpo de la memoria se ofreció únicamente un ejemplo representativo. Este anexo recoge el desglose completo de la capacidad de señales de cada uno de los armarios de control del sistema, que constituye la base sobre la que se ha dimensionado la periferia de control de cada instalación.

Los datos aquí presentados proceden de la documentación técnica del proyecto [11] y se corresponden con las capacidades de entradas y salidas definidas para cada equipo de control.

III.2. SEÑALES DE LA ETAP LA LLEDA

La ETAP es, con diferencia, la instalación que concentra el mayor volumen de instrumentación, repartida en varios armarios de periferia que se conectan al armario central. La Tabla 17 recoge la capacidad de señales de cada uno de ellos.

<i>Armario</i>	<i>ED</i>	<i>SD</i>	<i>EA</i>	<i>SA</i>
Armario central (sala de cuadros)	96	16	16	4
Armario de periferia de filtros	96	48	40	12
Armario de periferia de dosificación de hipoclorito	48	8	8	—
Total ETAP	240	72	64	16

Tabla 17 Desglose de señales de los armarios de la ETAP La Lleda

(Fuente: Elaboración propia a partir de [18])

Como puede observarse, el armario de periferia de la zona de filtros es el que mayor número de señales gestiona, lo que resulta coherente con la complejidad de esta etapa del proceso, que integra el control del bombeo de agua de lavado y la maniobra de las válvulas y bombas asociadas. En conjunto, la ETAP supera las cuatrocientas señales, lo que da idea de su elevada densidad de instrumentación y justifica que sea la instalación que mayor esfuerzo de diseño concentra.

III.3. SEÑALES DEL DEPÓSITO DE LA LLEDA 2

El depósito de La Lleda 2 dispone de un armario de control completo y de nueva instalación, cuya capacidad de señales se recoge en la Tabla 18.

<i>Armario</i>	<i>ED</i>	<i>SD</i>	<i>EA</i>	<i>SA</i>
Armario de control del depósito La Lleda 2	14	10	4	—

Tabla 18 Desglose de señales del depósito la Lleda 2 (Elaboración propia a partir de [18])

El volumen de señales de esta instalación es notablemente inferior al de la ETAP, lo que se corresponde con su carácter de instalación de almacenamiento, en la que las necesidades de supervisión y control se limitan esencialmente a los niveles, los estados de los equipos y las maniobras básicas.

III.4. SEÑALES DEL BOMBEO DE LA MAGDALENA Y DEL DEPÓSITO DE LA CARRIONA

El bombeo de la Magdalena y el depósito de La Carriona presentan una particularidad respecto a las dos instalaciones anteriores. En ambos casos, el proyecto no contempla la instalación de un armario de control con una capacidad de señales predefinida, sino la integración del equipamiento de telecontrol sobre el armario eléctrico ya existente en cada

emplazamiento. En estas estaciones, el equipo de control desempeña fundamentalmente la función de gestión y conversión de las comunicaciones, sirviendo de enlace entre la instrumentación existente en la instalación y el Centro de Control.

Por este motivo, su dimensionamiento no se expresa mediante un número fijo de entradas y salidas, sino en función de las señales disponibles en la instalación existente, que se extraen de los armarios eléctricos para su integración en el sistema de telecontrol. Esta circunstancia es habitual en los proyectos de modernización, en los que la intervención sobre instalaciones preexistentes se adapta a la señalización ya disponible, en lugar de partir de una capacidad de señales fijada de antemano.

III.5. SÍNTESIS

La Tabla 19 resume el desglose de señales de las instalaciones que cuentan con una capacidad de control definida, ofreciendo una visión de conjunto del volumen total de señales gestionado por el sistema.

<i>Instalación</i>	<i>ED</i>	<i>SD</i>	<i>EA</i>	<i>SA</i>	<i>Tipo de intervención</i>
ETAP La Lleda	240	72	64	16	Armarios de nueva instalación
Depósito La Lleda 2	14	10	4	—	Armario nuevo completo
Bombeo Magdalena	(1)	(1)	(1)	—	Integración sobre existente
Depósito La Carriona	(1)	(1)	(1)	—	Integración sobre existente

Tabla 19 Síntesis del desglose de señales por instalación (Fuente: Elaboración propia a partir de [18])

(1) Dimensionado según las señales disponibles en el armario eléctrico existente.

Del análisis de conjunto se confirma que la ETAP concentra la práctica totalidad de las señales del sistema, mientras que las estaciones remotas presentan un volumen mucho más reducido, acorde con su función dentro de la red. Esta distribución de la instrumentación es

coherente con la arquitectura centralizada adoptada y con el papel diferenciado de cada instalación, descrito en el Capítulo 5.

ANEXO IV: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES

IV.1. OBJETO DEL ANEXO

A lo largo de la memoria, y en particular en el Capítulo 5, se han descrito los equipos que componen el sistema de telecontrol y comunicaciones, centrándose en su función dentro de la arquitectura. Este anexo recopila las características técnicas principales de dichos equipos, con el fin de ofrecer una referencia detallada que complemente la descripción funcional del cuerpo de la memoria. La información aquí recogida procede de la documentación técnica del proyecto [18].

Los equipos se agrupan en dos bloques: los equipos de control (autómatas programables y su periferia) y los equipos de comunicaciones (radio-módems y sistemas radiantes).

IV.2. EQUIPOS DE CONTROL: AUTÓMATAS PROGRAMABLES

El sistema se basa en autómatas programables de la familia SIMATIC del fabricante Siemens, lo que garantiza la homogeneidad de la solución y la compatibilidad entre las distintas instalaciones. Se emplean dos gamas distintas según el papel de cada estación.

En el **Centro de Control de la ETAP** se utiliza un autómata de la gama **SIMATIC S7-1500**, de altas prestaciones, adecuado para gestionar el elevado volumen de señales de la planta y la comunicación con las estaciones remotas. Esta gama se complementa con módulos de entradas y salidas montados sobre perfil, según las necesidades de señales de la instalación.

En las **estaciones remotas** se emplea la gama **SIMATIC ET200SP**, un sistema de periferia descentralizada modular, idóneo para instalaciones de menor tamaño por su carácter compacto y ampliable. La Tabla 20 recoge las referencias de los principales módulos empleados.

<i>Función del módulo</i>	<i>Referencia Siemens</i>
CPU SIMATIC S7-1500 (Centro de Control)	6ES7513-1AL01-0AB0
Módulo de entradas digitales (16 × 24 V CC)	6ES7521-1BH00-0AB0
Módulo de entradas digitales (32 × 24 V CC)	6ES7521-1BL00-0AB0
Módulo de salidas digitales (16 × 24 V CC / 0,5 A)	6ES7522-1BH01-0AB0
Módulo de entradas analógicas (8 × U/I/RTD/TC)	6ES7531-7KF00-0AB0
Módulo de salidas analógicas (4 × U/I)	6ES7532-5HD00-0AB0
Interfaz de periferia ET200SP (PROFINET)	6ES7155-6AU01-0BN0
Módulo de comunicación punto a punto (PtP)	6ES7137-6AA00-0BA0

Tabla 20 Principales módulos de control empleados. Fuente: [18]

Conviene destacar que la elección de la familia Siemens condiciona la compatibilidad de protocolos con el equipamiento preexistente, un aspecto que, como se indicó en el Capítulo 5, obligó a sustituir el equipo de control previo de la zona de filtros por nueva periferia compatible. Además, la comunicación interna entre los equipos se articula mediante red PROFINET sobre Ethernet, gestionada a través de switches industriales de la gama SCALANCE del mismo fabricante.

IV.3. EQUIPOS DE COMUNICACIONES: RADIO-MÓDEMS

El enlace radio entre el Centro de Control y las estaciones remotas se establece mediante radio-módems digitales del fabricante **Farell Instruments**, modelo **T-MOD C48+**, con módem digital integrado. Sus características principales, conforme a la documentación del proyecto, son las siguientes:

- Fabricante y modelo: Farell Instruments T-MOD C48+.

- Tipo: radio-módem digital con módem integrado.
- Modo de operación: half-dúplex transparente.
- Interfaz de conexión con el equipo de control: puerto serie RS-232.
- Banda de operación: UHF, en el rango de trabajo del sistema (403–470 MHz).

El carácter half-dúplex y transparente de estos equipos, así como su idoneidad para un esquema de interrogación cíclica, se han justificado en detalle en el Capítulo 5. Cada radio-módem se complementa con un regulador de tensión específico que adapta la alimentación a la requerida por el equipo.

IV.4. SISTEMAS RADIANTES: ANTENAS

El sistema emplea dos tipos de antenas, según se trate de la estación base o de las estaciones remotas.

La **antena omnidireccional**, instalada en la estación base del Centro de Control, presenta las siguientes características, recogidas en el estudio de cobertura del proyecto:

- Rango de frecuencias: 375–512 MHz.
- Elemento radiante: dipolo coaxial.
- Relación de onda estacionaria (ROE): baja, dentro de la gama de frecuencias de trabajo.
- Polarización: vertical.

Su patrón de radiación omnidireccional en el plano horizontal le permite dar cobertura simultánea a las tres estaciones remotas, situadas en distintas direcciones respecto a la ETAP.

Las **antenas directivas**, instaladas en cada estación remota, concentran la potencia radiada en la dirección del enlace con la estación base. Según la documentación, se instalan sobre mástil (de 3 m de altura en el caso del depósito de La Lleda 2, aprovechando el existente) y orientadas hacia la ETAP. Esta direccionalidad maximiza la ganancia en el sentido del enlace y mejora la relación señal-ruido, contribuyendo a la fiabilidad de la comunicación.

IV.5. SÍNTESIS

La Tabla 21 resume los equipos principales del sistema y su ubicación, ofreciendo una visión de conjunto del equipamiento empleado.

<i>Equipo</i>	<i>Modelo / Tipo</i>	<i>Ubicación</i>
Autómata principal	SIMATIC S7-1500	Centro de Control (ETAP)
Periferia descentralizada	SIMATIC ET200SP	Estaciones remotas
Switch industrial	SCALANCE	Centro de Control y red interna
Radio-módem	Farell Instruments T-MOD C48+ (half-dúplex, RS-232)	Todas las estaciones
Antena omnidireccional	Dipolo coaxial, 375–512 MHz	Estación base (ETAP)
Antena directiva	UHF, sobre mástil	Estaciones remotas

Tabla 21 Síntesis de los equipos principales del sistema. Fuente: [18]

ANEXO V: ESQUEMAS ELÉCTRICOS Y DE COMUNICACIONES DEL PROYECTO

V.1. OBJETO DEL ANEXO

Con el fin de complementar la descripción del sistema realizada en el Capítulo 5 y de ilustrar el nivel de detalle de la instalación, este anexo recoge una selección de los esquemas eléctricos y de comunicaciones del proyecto de ejecución. Dichos esquemas forman parte de la documentación técnica facilitada por la entidad colaboradora [18] y han sido elaborados con la herramienta EPLAN como parte del proyecto de automatización de la ETAP La Lleda y sus instalaciones asociadas.

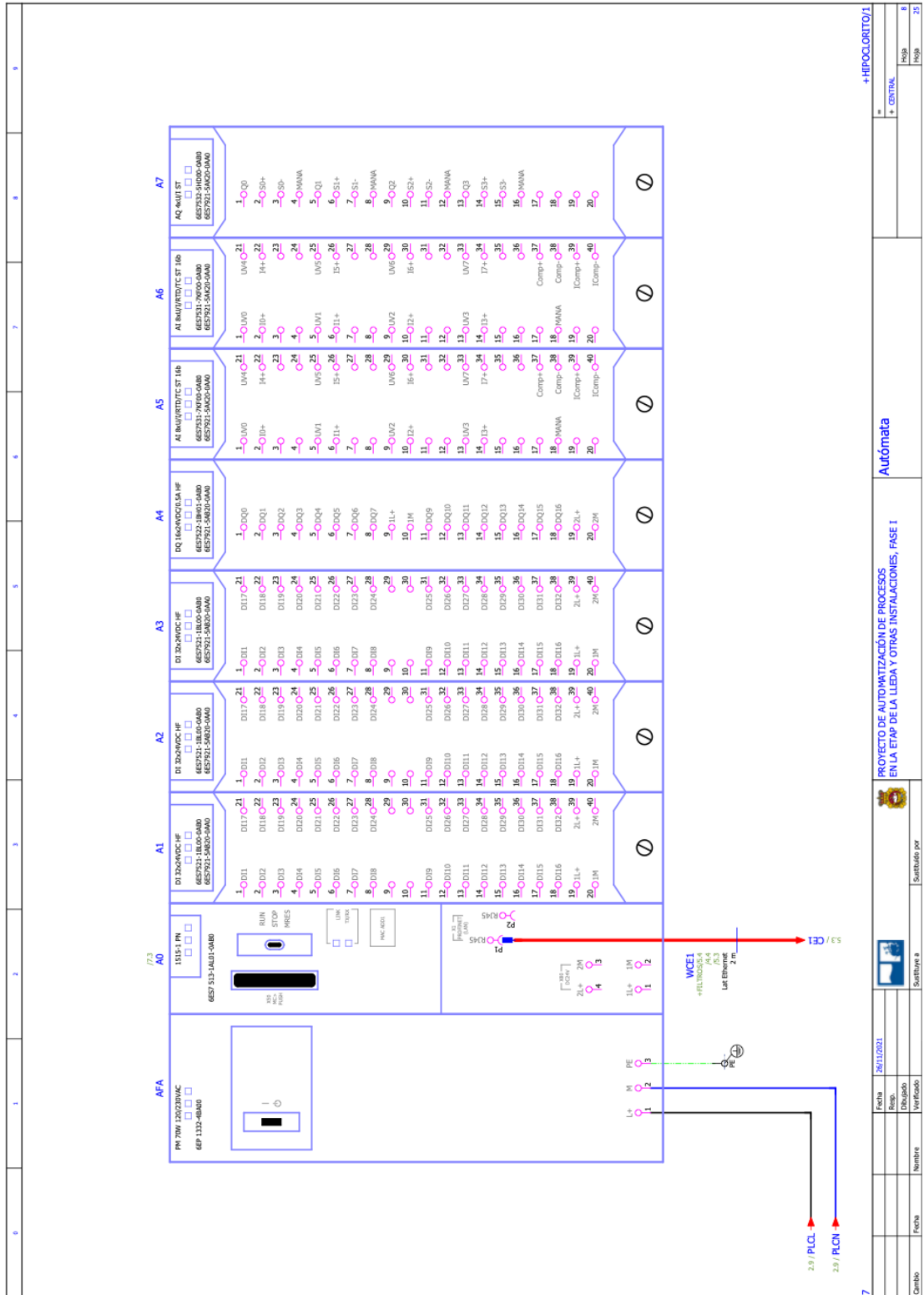
Conviene precisar que estos planos corresponden al proyecto de ejecución desarrollado por la ingeniería responsable de la instalación, y se incluyen aquí como material de referencia que respalda y detalla el diseño analizado en el presente trabajo. Dado el carácter de este Trabajo de Fin de Grado, centrado en el telecontrol y las comunicaciones, se ha realizado una selección de los esquemas más representativos de este ámbito, en lugar de reproducir la totalidad de la documentación eléctrica.

V.2. ESQUEMAS SELECCIONADOS

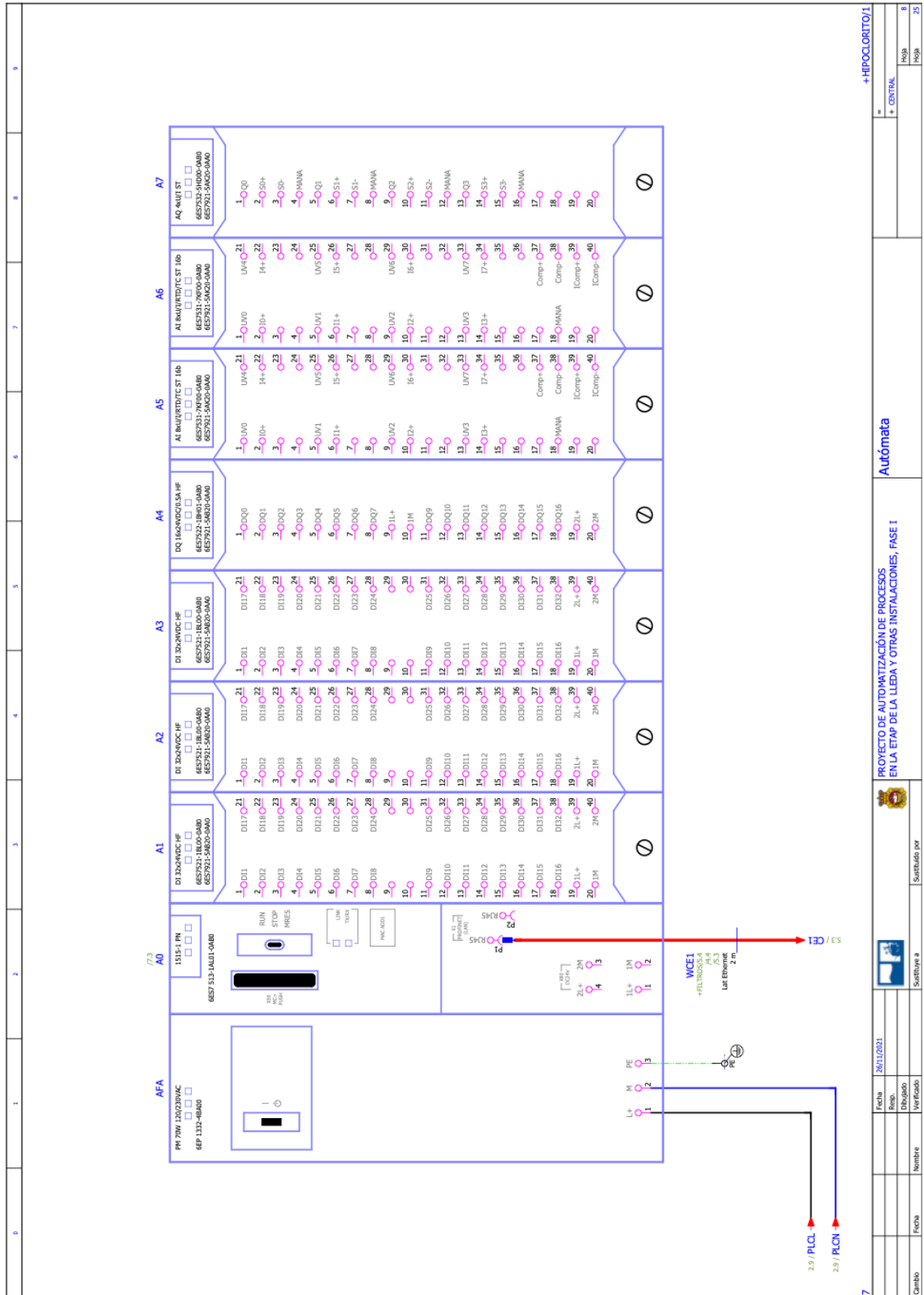
La selección incluye, para el armario central del centro de control y para las estaciones remotas, los esquemas correspondientes a los siguientes elementos:

- **Esquema del autómeta.** Muestra la configuración de la periferia de control (CPU y módulos de entradas y salidas) de cada estación, basada en la familia SIMATIC de Siemens.
- **Esquema del switch.** Representa la interconexión Ethernet interna mediante los switches industriales SCALANCE, que articulan la red de comunicaciones local.

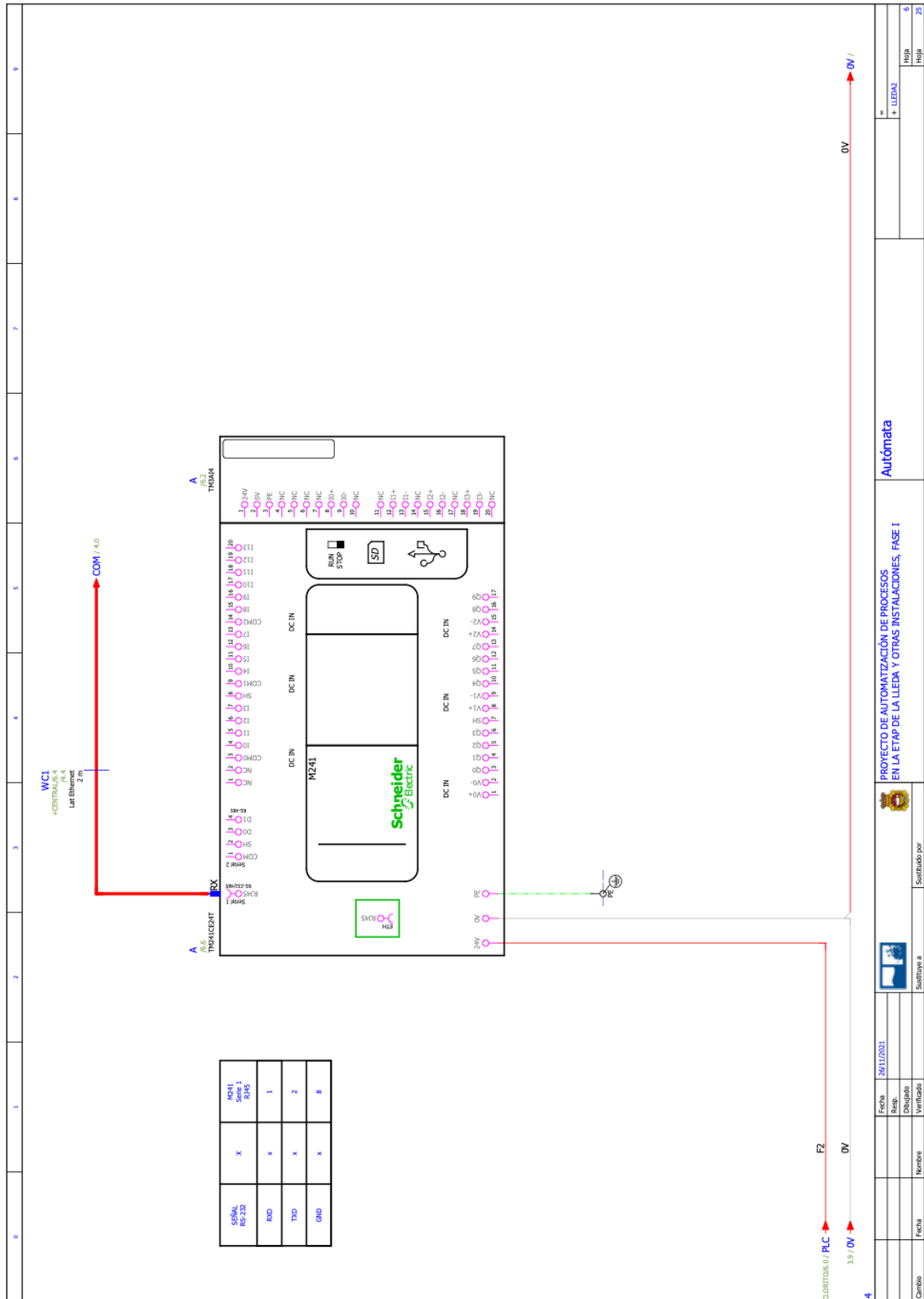
- **Esquema de comunicaciones.** Detalla la conexión del radio-módem Farell T-MOD C48+ con el equipo de control a través del puerto serie, así como su integración en el sistema de telecontrol.



Plano 3 Switch – Central, hoja 2 [18]



Plano 4 Automata – Central (periferia de control de la ETAP) [18]



Plano 6Automata – Lleda 2 (periferia de control de la remota) [18]

V.3. OBSERVACIONES

Del análisis de estos esquemas se desprenden varios aspectos coherentes con el diseño descrito en la memoria. En primer lugar, la homogeneidad de la solución de control, basada en la familia SIMATIC de Siemens (gama S7-1500 en el Centro de Control y ET200SP en las estaciones remotas), con la única excepción de alguna instalación que conserva equipamiento preexistente de otro fabricante. En segundo lugar, la articulación de la red interna mediante switches SCALANCE y enlaces PROFINET sobre Ethernet. Y, en tercer lugar, la integración del radio-módem como puente entre el equipo de control y el sistema radiante, mediante conexión serie, conforme a lo descrito en el apartado de comunicaciones.

Estos esquemas confirman, por tanto, la viabilidad de la arquitectura propuesta y aportan el nivel de detalle de ingeniería que correspondería a la fase de ejecución del sistema.