



# Sistema modular para monitoreo y control industrial con comunicación inalámbrica y capacidades de automatización embebida

Autor:

Ing. Lucas Sebastián Kirschner

Director:

Mg. Ing. Guillermo Alfredo Fernández (UNaM)

*Esta planificación fue realizada en el curso de Gestión de proyectos entre el 29 de abril de 2025 y el 17 de junio de 2025.*

## Índice

1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar . . . . .	5
2. Identificación y análisis de los interesados . . . . .	7
3. Propósito del proyecto . . . . .	8
4. Alcance del proyecto . . . . .	8
5. Supuestos del proyecto. . . . .	9
6. Requerimientos . . . . .	9
7. Historias de usuarios ( <i>Product backlog</i> ). . . . .	11
8. Entregables principales del proyecto . . . . .	12
9. Desglose del trabajo en tareas . . . . .	12
10. Diagrama de Activity On Node. . . . .	13
11. Diagrama de Gantt . . . . .	13
12. Presupuesto detallado del proyecto . . . . .	16
13. Gestión de riesgos . . . . .	16
14. Gestión de la calidad . . . . .	20
15. Procesos de cierre . . . . .	22

## Registros de cambios

Revisión	Detalles de los cambios realizados	Fecha
0	Creación del documento	29 de abril de 2025
1	Se completa hasta el punto 5 inclusive	12 de mayo de 2025
2	Se completa hasta el punto 9 inclusive Se corrigen errores de redacción y definición del Cliente de la revisión 1	19 de mayo de 2025
3	Se completa hasta el punto 12 inclusive Se corrigen errores de redacción y el desglose de tareas de la revisión 2	26 de mayo de 2025
4	Se completa el plan Se corrige diagrama de Gantt y notas del presupuesto de la revisión 3	2 de junio de 2025
5	Se finalizan revisiones del plan Se corrigen errores gramaticales de la revisión 4	9 de junio de 2025

## Acta de constitución del proyecto

Buenos Aires, 29 de abril de 2025

Por medio de la presente se acuerda con el Ing. Lucas Sebastián Kirschner que su Trabajo Final de la Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos se titulará “Sistema modular para monitoreo y control industrial con comunicación inalámbrica y capacidades de automatización embebida” y consistirá en el desarrollo de un sistema distribuido conformado por una estación central y múltiples estaciones remotas, para facilitar la adquisición de datos de campo, el control de actuadores y la comunicación eficiente en entornos industriales donde las soluciones cableadas resultan poco prácticas o costosas. El trabajo tendrá un presupuesto preliminar de 650 horas y un costo estimado de ARS 15.027.600,00, con fecha de inicio el 29 de abril de 2025 y fecha de presentación pública en junio de 2026.

Se adjunta a esta acta la planificación inicial.

Dr. Ing. Ariel Lutenberg  
Director posgrado FIUBA

Representante de PyME industrial del sector manufacturero  
Industria tipo con bajo nivel de automatización

Mg. Ing. Guillermo Alfredo Fernández  
Director del Trabajo Final

## 1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar

El proyecto consiste en el desarrollo de un sistema modular para monitoreo y control industrial, con capacidades de automatización embebida y comunicación inalámbrica. Se trata de un emprendimiento personal, motivado por la necesidad detectada en industrias con baja adopción tecnológica y limitada conectividad cableada, que requieren soluciones ágiles, adaptables y robustas para mejorar sus procesos productivos.

En el contexto actual, muchos sistemas de automatización industrial están diseñados para instalaciones específicas. Sus arquitecturas suelen ser rígidas y presentan escasa capacidad de adaptación a entornos cambiantes o geográficamente dispersos. Las soluciones tradicionales dependen en gran medida de infraestructura cableada, lo cual representa una limitación significativa en entornos donde el tendido de cables es costoso o impracticable. En contraste, este proyecto se enfoca en brindar una alternativa distribuida y escalable, basada en tecnologías modernas de microcontroladores, comunicación inalámbrica y diseño modular.

La solución propuesta contempla una arquitectura distribuida compuesta por una estación central y múltiples estaciones remotas. La estación central se construirá en torno a un microcontrolador de altas prestaciones (por ejemplo, ARM Cortex-M7 o M33), con capacidad para ejecutar múltiples tareas con restricciones temporales mediante un sistema operativo en tiempo real (*Real-Time Operating System*, RTOS). Integrará una interfaz Ethernet para conexión con sistemas de supervisión y control, tales como plataformas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), y una interfaz inalámbrica de alta confiabilidad para comunicarse con las estaciones remotas. También contará con un reloj en tiempo real (*Real-Time Clock*, RTC) para mantener el registro horario, y se evaluará el uso de *Power over Ethernet* (PoE) como alternativa de alimentación.

Las estaciones remotas estarán equipadas con microcontroladores de menores recursos (como ARM Cortex-M3 o M4), orientados a la adquisición de señales y a la activación de actuadores en campo. Contarán con entradas y salidas digitales industriales, adecuadas para la conexión de sensores discretos y dispositivos como relés o contactores, así como una interfaz de comunicación industrial, como RS485, que permita la integración con diversos equipos del entorno. La comunicación con la estación central se realizará mediante un enlace inalámbrico confiable. Estas estaciones estarán diseñadas para operar en entornos exigentes, alimentadas desde la red eléctrica de 220 V, con la posibilidad de integrar baterías de respaldo para asegurar continuidad operativa.

Desde el punto de vista del software, se implementará una arquitectura por capas que permita separar claramente las funciones de bajo nivel (controladores, comunicación, gestión de entradas/salidas) de la lógica de aplicación. Se proveerá una interfaz de programación de aplicaciones (*Application Programming Interface*, API) que facilite el desarrollo de soluciones específicas sobre la plataforma base. Este enfoque modular permitirá escalar el sistema según las necesidades, incorporar nuevas estaciones o funcionalidades sin rediseñar el conjunto y facilitar su mantenimiento y extensión futura.

La propuesta se destaca por su flexibilidad, escalabilidad y adaptabilidad. Frente a las soluciones actuales, que suelen ser cerradas y costosas, este proyecto plantea un sistema abierto y personalizable, orientado a pequeñas y medianas industrias que requieren soluciones específicas sin incurrir en altos costos de integración.

La figura 1 presenta el diagrama en bloques del sistema propuesto, el cual resume visualmente la arquitectura distribuida planteada. Se distinguen claramente la estación central, con su microcontrolador de altas prestaciones, las interfaces de comunicación (Ethernet e inalámbrica), las opciones de alimentación (PoE o red eléctrica) y las estaciones remotas, dotadas de entradas y salidas digitales industriales, interfaz inalámbrica y comunicación serie robusta para dispositivos de campo.

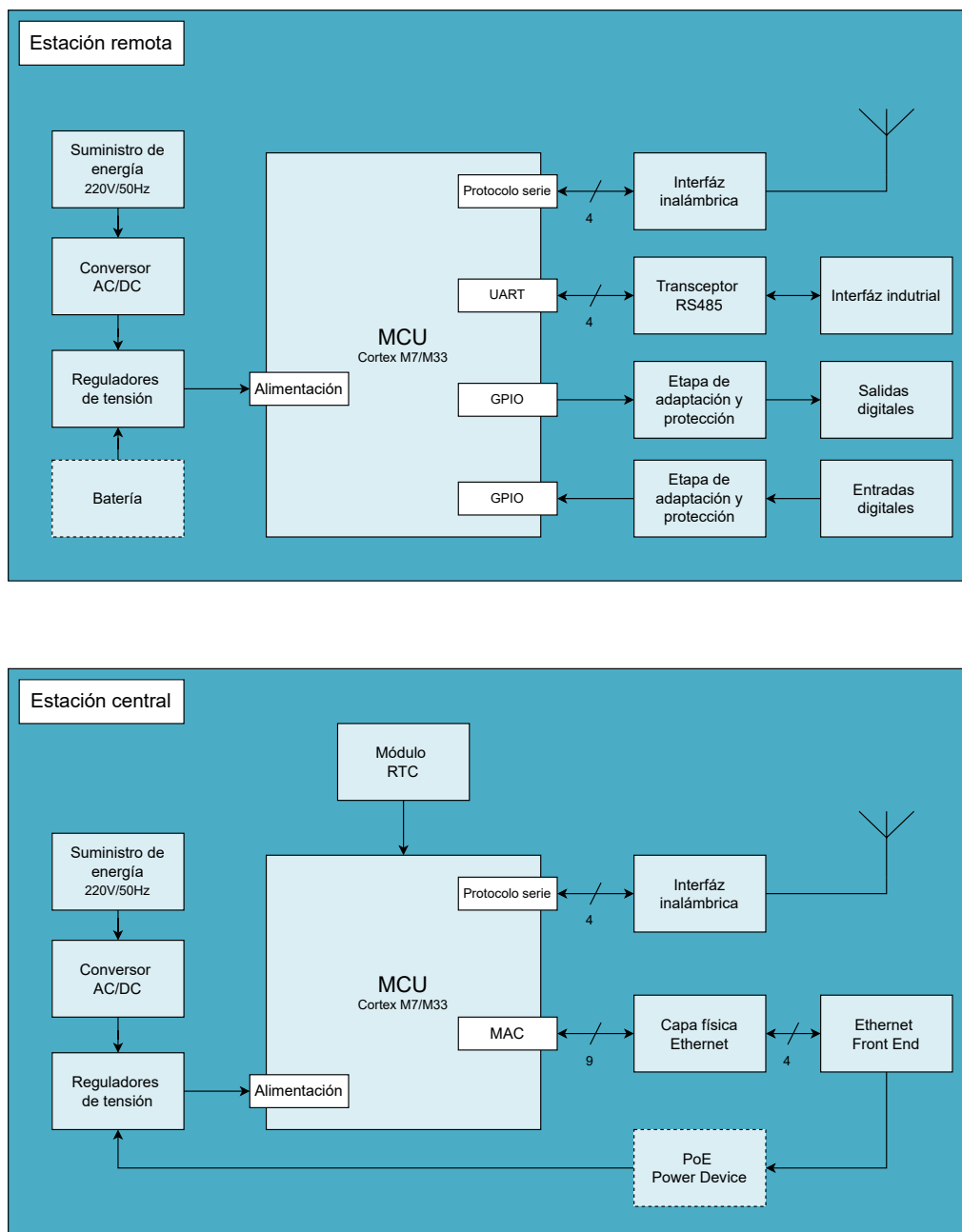


Figura 1. Diagrama en bloques del sistema.

## 2. Identificación y análisis de los interesados

A continuación, se identifican los principales interesados del proyecto, detallando sus roles, vínculos con el desarrollo y nivel de participación esperado.

Rol	Nombre y Apellido	Organización	Puesto
Cliente	Mg. Ing. Guillermo Alfredo Fernández	UNaM	Representante académico de PyMEs industriales del sector manufacturero
Responsable	Ing. Lucas Sebastián Kirschner	FIUBA	Alumno
Orientador	Mg. Ing. Guillermo Alfredo Fernández	UNaM	Director del Trabajo Final
Opositores	-	Fabricantes e integradores tradicionales de PLC	Actores con intereses en soluciones cableadas tradicionales
Usuario final	-	Industria genérica	Operadores y encargados de mantenimiento

- **Cliente:** el Mg. Ing. Guillermo Alfredo Fernández, quien además actúa como director del trabajo final, asume el rol de cliente en representación académica de pequeñas y medianas industrias del sector manufacturero. Aporta su conocimiento en sistemas embebidos aplicados a contextos productivos, y colabora en la definición de requerimientos y validación de los entregables del proyecto. Este perfil de cliente representa a organizaciones con bajo nivel de automatización y escasa infraestructura de conectividad, que buscan soluciones robustas, escalables y de bajo costo para modernizar sus procesos productivos sin necesidad de realizar grandes inversiones en cableado o infraestructura física.
- **Responsable:** el autor del proyecto, Ing. Lucas Sebastián Kirschner, asume la responsabilidad sobre el mismo. Tiene a su cargo el diseño, implementación, validación y documentación del sistema, así como la planificación y ejecución del trabajo dentro de los plazos establecidos.
- **Orientador:** el Mg. Ing. Guillermo Alfredo Fernández es profesor titular e investigador de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones (FIO - UNaM), con una reconocida trayectoria en sistemas embebidos aplicados a energías renovables y automatización. Su rol es fundamental para validar las decisiones técnicas, guiar metodológicamente el desarrollo y asegurar el rigor académico del trabajo final.
- **Opositores:** fabricantes de PLC convencionales e integradores de soluciones cableadas que podrían ver afectada su posición en el mercado ante la aparición de propuestas modulares, económicas y de implementación más ágil como la que plantea este proyecto. Esta oposición potencial se da principalmente en entornos donde la adopción de nuevas tecnologías no forma parte del modelo de negocio tradicional.
- **Usuario final:** personal técnico de planta, incluyendo operarios, encargados de mantenimiento y supervisores de proceso. Interactuarán con el sistema para monitorear variables de proceso y controlar dispositivos industriales. Se prioriza la facilidad de uso, confiabilidad operativa y adaptación a diferentes entornos industriales.

### 3. Propósito del proyecto

Desarrollar una solución modular y escalable que permita monitorear y controlar procesos industriales en entornos con baja infraestructura de conectividad, mediante una arquitectura distribuida que combine estaciones centrales y remotas interconectadas por enlaces inalámbricos confiables. La iniciativa surge como respuesta a la necesidad de automatización en industrias que presentan limitaciones técnicas, económicas o geográficas para implementar sistemas cableados convencionales y busca facilitar la recolección de datos de campo, la activación de actuadores y la implementación de lógica de control adaptada a cada caso.

### 4. Alcance del proyecto

El proyecto incluye:

- El diseño y construcción de un prototipo funcional de la estación central, basada en un microcontrolador de altas prestaciones con capacidad para ejecutar un sistema operativo de tiempo real (RTOS).
- El diseño y fabricación de al menos dos prototipos funcionales de estaciones remotas, con interfaces para la conexión de sensores y actuadores industriales.
- El diseño e implementación de la arquitectura de alimentación, contemplando el uso de PoE como opción de suministro para la estación central y la incorporación de baterías de respaldo en las estaciones remotas.
- El desarrollo del firmware de bajo nivel para la inicialización de periféricos, gestión de comunicaciones y manejo de entradas/salidas en ambas estaciones.
- La implementación de una API modular que abstraiga la complejidad del hardware y facilite la adaptación del sistema a distintos procesos industriales.
- La validación funcional de los módulos mediante pruebas controladas que simulen condiciones reales del entorno industrial.

El presente proyecto no incluye:

- El desarrollo de una interfaz gráfica de supervisión (HMI/SCADA).
- La integración con sistemas productivos reales de empresas externas.
- La incorporación de inteligencia artificial embebida, aunque se considera su viabilidad para futuras etapas.
- El diseño de encapsulados o gabinetes industriales, más allá de criterios básicos de disposición y conexión.
- La certificación del producto para entornos industriales normados.
- La obtención de un sistema final manufacturable, dado que el proyecto se limita a la construcción y validación de prototipos funcionales.



## 5. Supuestos del proyecto

Para el desarrollo del presente proyecto se supone que:

- Se dispondrá de tiempo suficiente por parte del responsable para cumplir con las actividades planificadas.
- Se podrán adquirir los componentes electrónicos necesarios en el mercado local o internacional, sin demoras significativas ni incrementos abruptos de costos.
- No se presentarán restricciones legales, regulatorias o normativas que impidan la realización del proyecto o el uso de tecnologías previstas.
- No habrá una devaluación abrupta que comprometa la adquisición de insumos clave o el cumplimiento del presupuesto estimado.
- La tecnología inalámbrica seleccionada será factible de implementar con los recursos disponibles y adecuada para el tipo de comunicación requerida entre estaciones.
- El entorno de prueba seleccionado permitirá validar adecuadamente el funcionamiento del sistema en condiciones representativas.
- Se contará con acceso a herramientas y bibliografía técnica suficiente para el diseño, implementación y validación del sistema.
- El desarrollo del firmware y la arquitectura modular prevista podrán implementarse con herramientas de software disponibles sin incurrir en costos adicionales significativos.

## 6. Requerimientos

### 1. Requerimientos de hardware:

- 1.1. El sistema deberá contar con una estación central basada en un microcontrolador ARM Cortex-M7 (o superior), con al menos 512 KB de RAM y 2 MB de Flash.
- 1.2. Las estaciones remotas deberán emplear microcontroladores ARM Cortex-M3/M4 o similar, con al menos 64 KB de RAM y 256 KB de Flash.
- 1.3. La interfaz RS485 deberá cumplir con la norma TIA/EIA-485-A, soportando velocidades de hasta 115200 baudios en distancias de hasta 100 m.
- 1.4. Cada estación remota deberá contar con entradas digitales compatibles con sensores industriales de 24 V.
- 1.5. Las salidas digitales deberán soportar cargas de al menos 30 V y 500 mA, con aislamiento galvánico.
- 1.6. Las estaciones deberán alimentarse desde la red eléctrica de 220 V/50 Hz, mediante conversores internos.
- 1.7. La estación central deberá incluir un RTC con respaldo energético para mantener fecha y hora ante cortes de energía.
- 1.8. Opcionalmente, las estaciones remotas podrán alimentarse mediante baterías internas cuando no se disponga de acceso directo a la red eléctrica o se desee simplificar su instalación en ubicaciones aisladas.

2. Requerimientos de comunicación:

- 2.1. La comunicación entre la estación central y las estaciones remotas se realizará mediante un protocolo inalámbrico que asegure un alcance mínimo de 20 m en interiores.
- 2.2. El sistema deberá permitir la conexión de hasta 16 estaciones remotas a una misma estación central.
- 2.3. La estación central deberá contar con interfaz Ethernet 10/100 Mbps para la conexión con sistemas SCADA o de supervisión.
- 2.4. El protocolo inalámbrico deberá contemplar acuse de recibo y retransmisión de mensajes no confirmados.

3. Requerimientos de firmware:

- 3.1. El firmware deberá estar basado en arquitectura en capas, con separación entre drivers, middleware y lógica de aplicación.
- 3.2. La estación central deberá ejecutar un sistema operativo de tiempo real (RTOS) con soporte para tareas concurrentes.
- 3.3. Deberá implementarse una API estandarizada para el acceso a sensores y actuadores, tanto locales como remotos.
- 3.4. El desarrollo deberá utilizar control de versiones con Git.
- 3.5. Se adoptaran buenas prácticas de programación modular y segura, inspiradas en lineamientos como MISRA-C.

4. Requerimientos de documentación:

- 4.1. La documentación técnica del hardware incluirá esquemáticos, lista de materiales y archivos de fabricación (*gerbers*).
- 4.2. La API del sistema deberá documentarse utilizando una herramienta de documentación automática como Doxygen.
- 4.3. La planificación deberá contemplar la elaboración de una memoria técnica del trabajo final y un informe de avances según las pautas del curso.
- 4.4. Opcionalmente, se podrá incluir un manual de instalación y puesta en marcha orientado al usuario final.

5. Requerimientos de validación y pruebas:

- 5.1. Las pruebas funcionales deberán verificar la correcta lectura de sensores y la activación de salidas digitales, utilizando equipos de laboratorio.
- 5.2. Las funciones de comunicación inalámbrica y cableada serán validadas mediante ensayos controlados en condiciones reproducibles.
- 5.3. Se confirmará la integridad funcional del sistema en escenarios que simulen condiciones típicas de operación.

6. Requerimientos normativos:

- 6.1. El diseño del hardware deberá cumplir con las normas de seguridad eléctrica aplicables a equipos de baja tensión (por ejemplo IEC 61010 o IRAM equivalente).
- 6.2. Las placas de circuito impreso deberán diseñarse siguiendo la normativa IPC correspondiente (por ejemplo IPC-2221, IPC-7351).

## 7. Historias de usuarios (*Product backlog*)

Las siguientes historias de usuarios describen funcionalidades deseables para distintos perfiles involucrados en la utilización, integración o instalación del sistema. Cada historia fue ponderada según su complejidad estimada, utilizando el enfoque de *story points*, basado en la suma de tres dimensiones:

- Dificultad: nivel de complejidad técnica para implementar la historia.
- Tiempo de implementación: cantidad de trabajo estimado para completarla.
- Incertidumbre: grado de riesgo técnico o falta de información.

Cada dimensión toma un valor entre 1 (bajo), 2 (medio) y 3 (alto), dando lugar a una suma total que se traduce en los *story points* asociados. La prioridad relativa de cada historia (1 a 9) indica su importancia funcional respecto del resto.

1. Como técnico instalador, quiero que las estaciones remotas dispongan de conectores industriales normalizados y borneras identificadas, para realizar una instalación rápida y sin errores.  
*Story points: 4* (dificultad: 1, tiempo de implementación: 1, incertidumbre: 2).
2. Como ingeniero de mantenimiento, quiero que el sistema sea modular y permita reemplazar estaciones remotas sin reconfigurar la estación central, para facilitar el mantenimiento correctivo.  
*Story points: 7* (dificultad: 2, tiempo de implementación: 2, incertidumbre: 3).
3. Como desarrollador de sistemas embebidos, quiero disponer de una API clara y documentada para programar la lógica de control del sistema, para poder implementar distintas aplicaciones sin modificar las capas base.  
*Story points: 7* (dificultad: 2, tiempo de implementación: 3, incertidumbre: 2).
4. Como dueño de la empresa, quiero que los equipos desarrollados puedan certificarse según normas industriales comunes, para asegurar la compatibilidad con estándares del sector.  
*Story points: 9* (dificultad: 3, tiempo de implementación: 3, incertidumbre: 3).
5. Como operador de mantenimiento, quiero recibir alertas en caso de desconexión prolongada de una estación remota, para poder actuar de forma preventiva ante fallas de comunicación.  
*Story points: 8* (dificultad: 3, tiempo de implementación: 3, incertidumbre: 2).
6. Como usuario integrador del sistema, quiero poder configurar desde software el comportamiento de las estaciones remotas, para adaptar su funcionamiento a distintas aplicaciones industriales.  
*Story points: 7* (dificultad: 2, tiempo de implementación: 3, incertidumbre: 2).
7. Como desarrollador de firmware, quiero contar con ejemplos de referencia y bibliotecas reutilizables, para acelerar el desarrollo de nuevas estaciones remotas.  
*Story points: 7* (dificultad: 2, tiempo de implementación: 3, incertidumbre: 2).

## 8. Entregables principales del proyecto

- Diagramas de circuitos esquemáticos de las estaciones central y remota.
- Listado de materiales (*Bill of Materials*, BOM) de las estaciones central y remota.
- Diseño de los circuitos impresos (*Printed Circuit Board*, PCB) y generación de archivos de fabricación (*gerbers* y archivos de ensamblado).
- Prototipos funcionales de al menos una estación central y dos estaciones remotas.
- Código fuente del firmware para estación central y estaciones remotas.
- Documentación de la API.
- Informe de avances.
- Memoria técnica del trabajo final.

## 9. Desglose del trabajo en tareas

### 1. Investigación preliminar (60 h)

- 1.1. Revisión del estado del arte de tecnologías inalámbricas para comunicación entre nodos (20 h).
- 1.2. Revisión de normativas industriales vigentes (compatibilidad electromagnética, alimentación, comunicaciones, etc.) (10 h).
- 1.3. Selección preliminar de microcontroladores para estación central y remotas. (10 h)
- 1.4. Estudio de alternativas de interfaz RS485 (10 h).
- 1.5. Revisión de opciones de alimentación y protección eléctrica para ambientes industriales (10 h).

### 2. Desarrollo de hardware (180 h)

- 2.1. Revisión de proyectos similares: esquemas eléctricos, placas comerciales, kits de desarrollo, datasheets, notas de aplicación (15 h).
- 2.2. Planteo de la estructura del sistema: definición de módulos, arquitectura general, diagrama de bloques, topología de conexión (10 h).
- 2.3. Selección definitiva de componentes principales (10 h).
- 2.4. Creación de librerías de componentes personalizados (*footprints*, símbolos) (15 h).
- 2.5. Diseño del esquemático eléctrico de la estación central (20 h).
- 2.6. Diseño del esquemático eléctrico de las estaciones remotas (20 h).
- 2.7. Ruteo del PCB de la estación central (25 h).
- 2.8. Ruteo del PCB de las estaciones remotas (20 h).
- 2.9. Generación de archivos *gerbers*, BOM y archivos de ensamblado (pick and place, etc.) (5 h).
- 2.10. Pedido de prototipos y compra de componentes (5 h).
- 2.11. Armado de prototipos (20 h).
- 2.12. Pruebas funcionales eléctricas y ajustes en el hardware (15 h).

3. Desarrollo de firmware (260 h)

- 3.1. Investigación y selección de un RTOS (20 h).
- 3.2. Definición de la estructura modular del firmware (drivers, lógica de aplicación, comunicación, etc.) (15 h).
- 3.3. Definición de la arquitectura del firmware de la estación central (20 h).
- 3.4. Definición de la arquitectura del firmware de las estaciones remotas (20 h).
- 3.5. Diseño e implementación de la API (35 h).
- 3.6. Programación de drivers (35 h).
- 3.7. Implementación del *stack* de comunicación RS485 (30 h).
- 3.8. Implementación del *stack* TCP/IP (30 h).
- 3.9. Desarrollo de funciones de adquisición, control de salidas y configuración remota (35 h).
- 3.10. Documentación técnica del firmware y la API (20 h).

4. Integración del sistema (60 h)

- 4.1. Integración de hardware y firmware en estación central (15 h).
- 4.2. Integración de hardware y firmware en estaciones remotas (15 h).
- 4.3. Integración del sistema inalámbrico: comunicación entre estaciones remotas y estación central. (20 h).
- 4.4. Ajustes de firmware y hardware tras integración inicial (10 h).

5. Pruebas de validación (40 h)

- 5.1. Diseño de casos de prueba funcionales y de comunicación (10 h).
- 5.2. Ejecución de pruebas generales sobre el sistema completo (20 h).
- 5.3. Evaluación del desempeño en condiciones simuladas (10 h).

6. Cierre del proyecto (50 h)

- 6.1. Desarrollo del informe de avances (10 h)
- 6.2. Escritura de la memoria técnica (30 h).
- 6.3. Elaboración de la presentación final (10 h).

Cantidad total de horas: 650 h

## 10. Diagrama de Activity On Node

La figura 2 presenta el diagrama *Activity On Node* (AoN) del proyecto.

## 11. Diagrama de Gantt

La figura 3 muestra el diagrama de Gantt del proyecto. En él, cada día representa una carga horaria estimada de 5 horas.

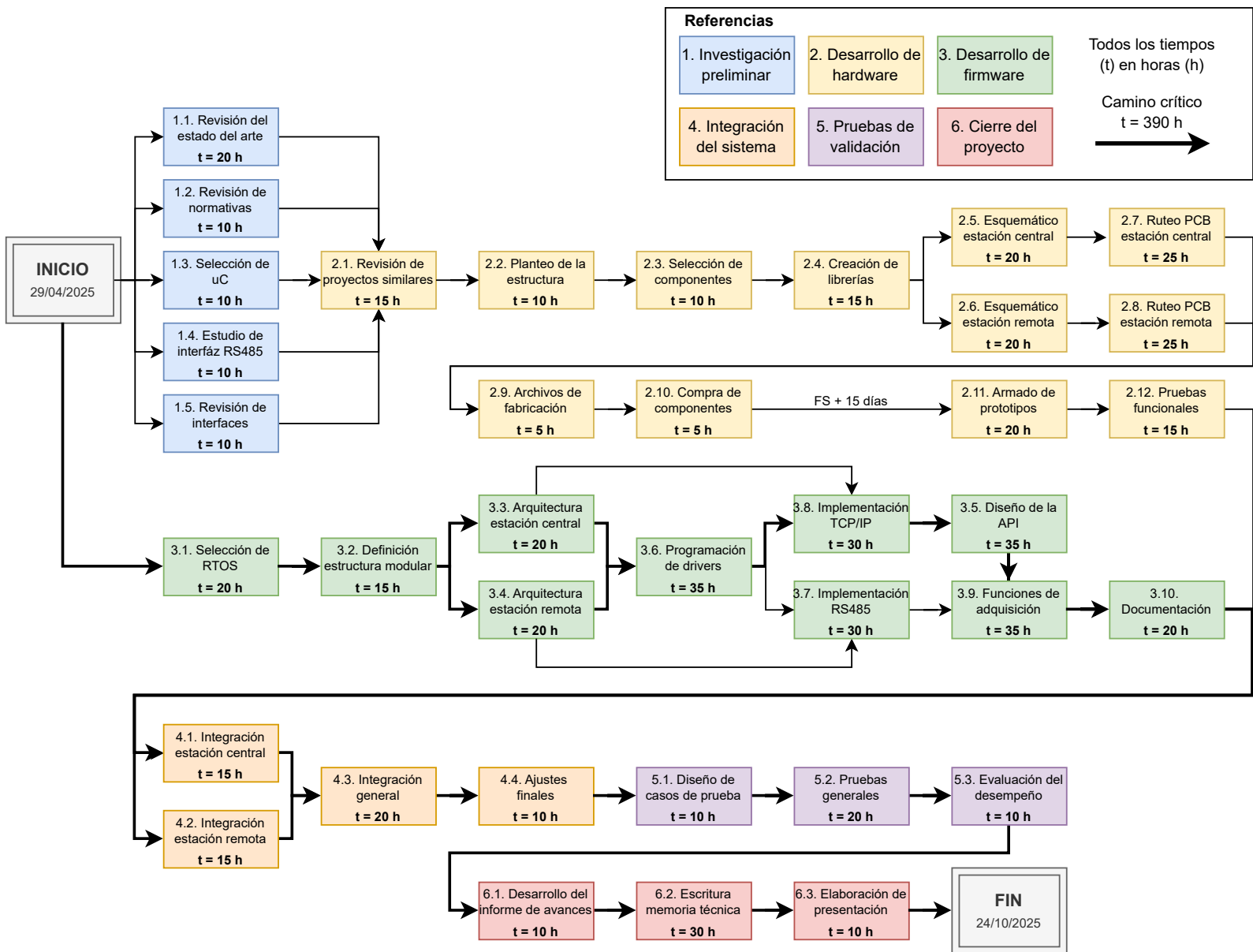


Figura 2. Diagrama de *Activity on Node*.

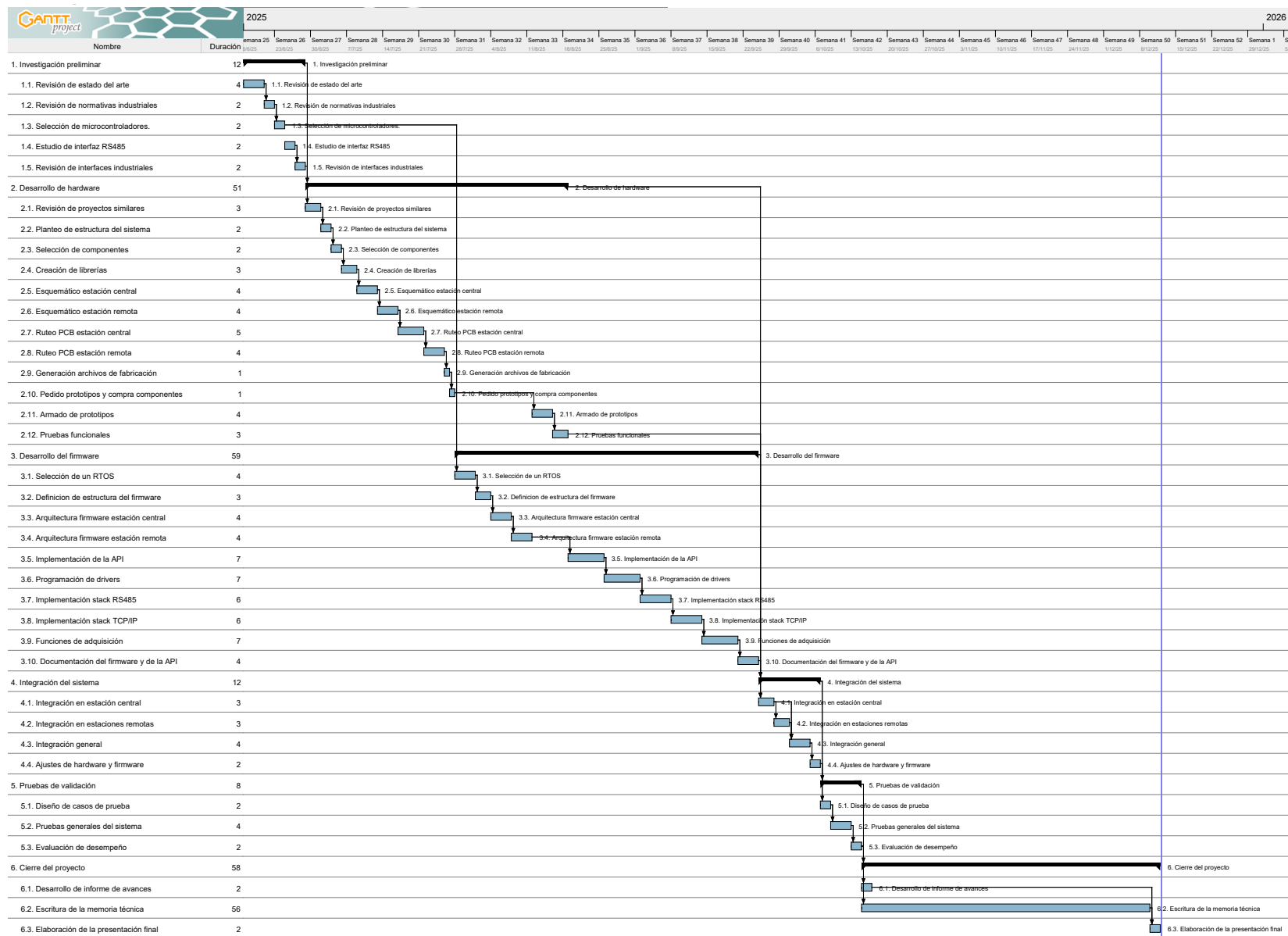


Figura 3. Diagrama de Gantt.

## 12. Presupuesto detallado del proyecto

COSTOS DIRECTOS			
Descripción	Cantidad	Valor unitario (2)	Valor total
PCB prototipo estación central (1)	1	35.000	35.000
PCB prototipo estación remota	2	35.000	70.000
Componentes estación central	1	100.000	100.000
Componentes estación remota	2	80.000	160.000
Horas profesionales (3)	650	15.000	9.750.000
SUBTOTAL			10.115.000
COSTOS INDIRECTOS			
Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Computadora para el desarrollo	1	700.000	700.000
Estación de soldado	1	400.000	400.000
Insumos para soldadura	1	100.000	100.000
Licencia anual para software de diseño de PCBs	1	4.912.600	4.912.600
SUBTOTAL			6.112.600
TOTAL			15.027.600

(1) Los precios de componentes y servicios de prototipado fueron estimados a partir de cotizaciones vigentes de proveedores nacionales e internacionales.

(2) Todos los precios están expresados en pesos argentinos (ARS) y fueron estimados en base a valores de mercado actualizados al 26/05/2025. Para los costos expresados originalmente en dólares, se utilizó un tipo de cambio oficial de 1 USD = 1.160 ARS, según el Banco Central de la República Argentina (BCRA).

(3) El valor de la hora profesional se estimó en 15.000 ARS, considerando una tarifa base calculada a partir de un salario mensual bruto de ARS 1.800.000, incrementada en un 30 % por tratarse de trabajo técnico realizado fuera del horario laboral en relación de dependencia.

## 13. Gestión de riesgos

a) Identificación de los riesgos y estimación de sus consecuencias:

Riesgo 1: falta de disponibilidad de componentes electrónicos clave

- Severidad (S): 10.

La indisponibilidad de microcontroladores, módulos inalámbricos o PCBs imposibilita completamente el desarrollo del sistema, ya que son elementos fundamentales sin los cuales no se puede avanzar en ninguna etapa significativa del proyecto.

- Ocurrencia (O): 2.

Aunque el contexto nacional presenta desafíos logísticos, actualmente existen canales relativamente estables para la importación de componentes a través de couriers, compras internacionales o proveedores especializados.

Riesgo 2: escasa experiencia en comunicaciones inalámbricas

- Severidad (S): 9.

Una elección inadecuada de la tecnología inalámbrica o un diseño mal dimensionado en



cuanto a alcance, interferencias o robustez puede comprometer seriamente el funcionamiento del sistema, afectando la confiabilidad del monitoreo y control remoto.

- Ocurrencia (O): 7.

Si bien se cuenta con conocimientos generales en sistemas embebidos, la experiencia específica en tecnologías inalámbricas industriales es limitada. Esto incrementa la probabilidad de subestimar restricciones técnicas o definir requerimientos poco realistas.

#### Riesgo 3: dedicación insuficiente del responsable del proyecto

- Severidad (S): 7.

La falta de tiempo suficiente para abordar las actividades planificadas podría generar demoras importantes en el avance del proyecto, especialmente en tareas críticas como el diseño, implementación y validación de hardware y firmware. Esto afectaría tanto el cumplimiento del cronograma como la calidad de los entregables.

- Ocurrencia (O): 5.

Si bien existe un compromiso asumido, la dedicación depende de múltiples factores personales y laborales que pueden variar a lo largo del tiempo. Esto introduce un nivel moderado de incertidumbre sobre la disponibilidad real de tiempo efectivo.

#### Riesgo 4: errores en el diseño de los prototipos

- Severidad (S): 8.

Errores en el diseño de los prototipos de la estación central o las estaciones remotas pueden requerir una reimplementación parcial o total del hardware. Esto generaría retrasos considerables en el cronograma y aumentos en los costos, tanto por repetición de tareas como por nuevas compras de materiales.

- Ocurrencia (O): 4.

El riesgo existe debido a la complejidad del sistema y la integración de múltiples tecnologías (comunicación inalámbrica, PoE, interfaces industriales, etc.). Sin embargo, la planificación contempla etapas de revisión y validación que disminuyen la probabilidad de fallos graves.

#### Riesgo 5: dificultades en la implementación de protocolos de comunicación

- Severidad (S): 9.

El proyecto depende del correcto funcionamiento de las comunicaciones TCP/IP, RS485 e inalámbricas. Problemas en la implementación de estos stacks podrían afectar gravemente la operatividad del sistema, comprometiendo la interoperabilidad entre módulos y el acceso remoto.

- Ocurrencia (O): 6.

La falta de experiencia específica en estos protocolos incrementa la probabilidad de errores de diseño o implementación. Aunque se prevé una etapa de investigación, el proceso de integración podría presentar obstáculos técnicos complejos y consumir más tiempo del estimado.

#### Riesgo 6: incumplimiento de normativas técnicas o industriales

- Severidad (S): 8.  
El incumplimiento de normativas vinculadas a compatibilidad electromagnética, seguridad eléctrica, comunicaciones o alimentación podría impedir el uso del sistema en entornos industriales reales, forzando rediseños o limitando su aplicabilidad.
- Ocurrencia (O): 2.  
Si bien se trata de un riesgo crítico, es poco probable, ya que el proyecto contempla desde etapas tempranas la investigación y seguimiento de las normativas vigentes, lo que permitirá tomar decisiones de diseño que aseguren el cumplimiento desde el inicio.

Riesgo 7: insuficiencia de recursos económicos para adquirir materiales

- Severidad (S): 9.  
La falta de capital disponible para la compra de componentes, PCBs, herramientas de desarrollo o insumos de laboratorio puede interrumpir o demorar sustancialmente el proyecto, ya que muchas tareas dependen directamente de estos recursos.
- Ocurrencia (O): 5.  
Al tratarse de un emprendimiento autofinanciado, existe una probabilidad moderada de que, por cuestiones económicas personales o variaciones de precios, no se pueda contar con los fondos necesarios en el momento oportuno para avanzar con ciertas etapas.

b) Tabla de gestión de riesgos:

Riesgo	S	O	RPN	S*	O*	RPN*
Riesgo 1	10	2	20			
Riesgo 2	9	7	63	7	4	28
Riesgo 3	7	5	35			
Riesgo 4	8	4	32			
Riesgo 5	9	6	54	8	3	24
Riesgo 6	8	2	16			
Riesgo 7	9	5	45	9	3	27

Criterio adoptado: Se tomarán medidas de mitigación en los riesgos cuyos números de RPN sean mayores a 40.

Nota: los valores marcados con (\*) en la tabla corresponden luego de haber aplicado la mitigación.

c) Plan de mitigación de los riesgos que originalmente excedían el RPN máximo establecido:

Riesgo 2: escasa experiencia en comunicaciones inalámbricas

- Plan de mitigación: la etapa inicial del proyecto incluirá una fase específica de investigación para analizar distintas tecnologías inalámbricas, sus limitaciones y ventajas. Se priorizará el uso de módulos con documentación precisa, fiable y soporte activo de la comunidad, y se prevé recurrir a asistencia técnica especializada (foros, expertos y tutorías) para validar decisiones clave.
- Severidad (S\*): 7.  
Aunque la elección errónea podría seguir afectando la confiabilidad del sistema, el impacto

global se reduce al contar con un proceso de validación temprana de tecnologías y decisiones de diseño, lo que permite detectar errores antes de avanzar a etapas más costosas.

- Ocurrencia ( $O^*$ ): 4.

La probabilidad disminuye significativamente con una planificación consciente del riesgo. Las acciones preventivas, como la capacitación autodidacta inicial, el uso de prototipos funcionales y la consulta con terceros, reducen la posibilidad de incurrir en una mala elección o de cometer errores graves de implementación.

#### Riesgo 5: dificultades en la implementación de protocolos de comunicación

- Plan de mitigación: se planificará una etapa temprana de desarrollo enfocada exclusivamente en la implementación y prueba de los protocolos de comunicación clave (TCP/IP, RS485 e inalámbricos), utilizando kits de desarrollo y ejemplos de referencia del fabricante. Además, se priorizará el uso de stacks probados y bien documentados, y se mantendrá una estrategia modular que permita aislar problemas y facilitar el diagnóstico. También se considerará el apoyo de comunidades técnicas y documentación oficial como recurso constante.

- Severidad ( $S^*$ ): 8.

Aunque el funcionamiento de los protocolos sigue siendo fundamental, una implementación modular, validada por etapas y basada en stacks existentes reduce el impacto de posibles errores, ya que permite corregirlos sin comprometer el sistema completo.

- Ocurrencia ( $O^*$ ): 3.

La ocurrencia baja al prever pruebas controladas, usar bibliotecas confiables y limitar la complejidad del código inicial. Esto permite una mejor comprensión progresiva del comportamiento de los protocolos antes de su integración definitiva.

#### Riesgo 7: insuficiencia de recursos económicos para adquirir materiales

- Plan de mitigación: el proyecto contará con un presupuesto detallado y priorizado desde su etapa de planificación. Se optará por una estrategia de compras progresiva según el avance real, limitando gastos iniciales. Además, se evaluarán opciones de reutilización de materiales, proveedores económicos y se reservará un fondo de contingencia para imprevistos. También se procurará seleccionar proveedores que dispongan de la mayoría de los componentes necesarios, a modo de reducir los costos de envío y los tiempos involucrados en la adquisición de insumos.

- Severidad ( $S^*$ ): 9.

El impacto de no contar con fondos sigue siendo muy alto, ya que sin los insumos físicos el avance se vería seriamente afectado.

- Ocurrencia ( $O^*$ ): 3.

La probabilidad se reduce considerablemente al contar con una planificación financiera anticipada, segmentar las compras y evaluar alternativas económicas. Estas medidas permiten adaptar el ritmo de avance a la disponibilidad real de fondos y disminuyen la posibilidad de interrupciones por falta de capital.

## 14. Gestión de la calidad

- Req #1: 1.3. La interfaz RS485 deberá cumplir con la norma TIA/EIA-485-A y ser capaz de operar a 115200 baudios en distancias de hasta 100 m.
  - Verificación: análisis del diseño eléctrico mediante revisión de esquemáticos y consulta de hojas de datos del transceptor RS485, con el fin de confirmar el cumplimiento de las recomendaciones de circuitos típicos y *layout*.
  - Validación: se realizarán pruebas funcionales con cables de hasta 100 m. Durante los ensayos se registrará la tasa de error a 115200 baudios en condiciones normales de operación.
- Req #2: 1.4. Cada estación remota deberá contar con entradas digitales compatibles con sensores industriales de 24 V.
  - Verificación: el diseño deberá basarse en circuitos ampliamente utilizados en aplicaciones industriales, con inclusión de aislamiento galvánico, protección contra inversión de polaridad y supresión de picos de tensión. Se revisarán los esquemáticos y los componentes seleccionados para confirmar su adecuación.
  - Validación: se realizarán pruebas de campo con sensores industriales de 24 V. Se comprobará la correcta detección de estados lógicos y el funcionamiento efectivo de las protecciones ante conexiones incorrectas.
- Req #3: 1.5. Las salidas digitales deberán soportar cargas de al menos 30 V y 500 mA, con aislamiento galvánico.
  - Verificación: se analizará el diseño del circuito de salida, el cual deberá contemplar aislamiento galvánico y condiciones térmicas adecuadas. Se evaluarán esquemáticos y hojas de datos para confirmar márgenes de operación seguros.
  - Validación: se llevarán a cabo mediciones con cargas reales. Se medirá el comportamiento de la conmutación, la disipación térmica y la respuesta efectiva de las protecciones ante sobrecarga.
- Req #4: 2.1. La comunicación entre la estación central y las estaciones remotas se realizará mediante un protocolo inalámbrico que asegure un alcance mínimo de 20 m en interiores.
  - Verificación: se examinarán la hoja de datos del módulo inalámbrico y la documentación del protocolo adoptado. Además, se estimará el alcance teórico en función de las condiciones típicas de instalación.
  - Validación: se efectuarán pruebas funcionales para comprobar la transmisión efectiva entre nodos situados a una distancia mínima de 20 m en distintos ambientes interiores.
- Req #5: 2.3. La estación central deberá contar con interfaz Ethernet 10/100 Mbps para la conexión con sistemas SCADA o de supervisión.
  - Verificación: análisis del diseño de hardware Ethernet para asegurar el cumplimiento de los circuitos típicos y las recomendaciones de *layout* provistas por el fabricante del circuito integrado. Además, se comprobará la configuración del *stack* TCP/IP para confirmar su conformidad con el estándar IEEE 802.3.
  - Validación: conexión a una red Ethernet real con monitoreo del sistema desde una PC.

- Req #6: 3.1. El firmware deberá estar basado en arquitectura en capas, con separación entre drivers, middleware y lógica de aplicación.
  - Verificación: análisis estructural del repositorio de código para asegurar la correcta organización modular según el modelo propuesto por Michael Barr, con capas bien definidas para abstracción de hardware, drivers, middleware y aplicación.
  - Validación: el firmware se ejecutará sobre prototipos y se comprobará su adecuado desempeño en distintas configuraciones de hardware y condiciones de uso.
- Req #7: 3.2. La estación central deberá ejecutar un sistema operativo de tiempo real (RTOS) con soporte para tareas concurrentes.
  - Verificación: revisión de la configuración del planificador, asignación de prioridades y correcto manejo de interrupciones en el código.
  - Validación: pruebas funcionales con múltiples tareas activas. Se analizará la capacidad de respuesta en escenarios de carga real.
- Req #8: 3.5. Se adoptarán buenas prácticas de programación modular y segura, inspiradas en lineamientos como MISRA-C.
  - Verificación: revisión del código fuente mediante análisis estático y auditoría interna según reglas seleccionadas de MISRA-C.
  - Validación: ejecución de pruebas funcionales del sistema completo. Se comprobará la estabilidad y ausencia de errores bajo condiciones normales de operación.
- Req #9: 6.1. El diseño del hardware deberá cumplir con las normas de seguridad eléctrica aplicables a equipos de baja tensión (por ejemplo IEC 61010 o IRAM equivalente).
  - Verificación: análisis de cumplimiento normativo mediante *checklist* de distancias de aislamiento, protecciones y selección de componentes.
  - Validación: se llevarán a cabo ensayos eléctricos simulando fallas típicas en condiciones controladas y se analizará el comportamiento seguro del sistema.
- Req #10: 6.2. Las placas de circuito impreso deberán diseñarse siguiendo la normativa IPC correspondiente (por ejemplo IPC-2221, IPC-7351).
  - Verificación: revisión del layout de PCB con el objetivo de asegurar el cumplimiento de normas IPC y validación por parte del fabricante.
  - Validación: inspección visual y funcional de las placas prototipo tras su fabricación, para lo cual se verificará la calidad de ensamblado y operación sin fallos.

## 15. Procesos de cierre

El proceso de cierre del proyecto comprenderá una serie de tareas orientadas a evaluar los resultados obtenidos, registrar las lecciones aprendidas y reconocer la participación de los distintos actores involucrados. Todas estas actividades estarán a cargo del responsable del proyecto.

En primer lugar, se verificará el cumplimiento de los requerimientos definidos en la planificación inicial y se compararán los tiempos planificados con los efectivamente registrados. Se identificarán las desviaciones más relevantes y se analizarán sus causas, con el fin de evaluar la calidad de la planificación y del proceso de ejecución.

A continuación, se realizará un análisis de las técnicas y metodologías aplicadas en el desarrollo del hardware y el software, evaluando su efectividad y adecuación al proyecto. Asimismo, se documentarán los principales problemas enfrentados durante la ejecución y las soluciones adoptadas. Toda esta información quedará consignada en la memoria técnica, como insumo para futuros proyectos de características similares.

Por último, en el marco de la presentación final del trabajo, se llevará a cabo un agradecimiento formal al director del proyecto, a los docentes del posgrado, a los colaboradores y a todas las personas que contribuyeron al desarrollo del sistema.