



Diseño e implementación de una red Bluetooth Mesh para la gestión de sensores en invernaderos

Autor:

Ing. Laura Andrea Moreno Rodríguez

Director:

Esp. Ing. Federico Roux (Globant)

*Esta planificación fue realizada en el curso de Gestión de proyectos
entre el 11 de marzo de 2025 y el 22 de abril de 2025.*

Índice

1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar	5
2. Identificación y análisis de los interesados	7
3. Propósito del proyecto	7
4. Alcance del proyecto	7
5. Supuestos del proyecto.	8
6. Requerimientos	9
7. Historias de usuarios (<i>Product backlog</i>).	11
8. Entregables principales del proyecto	13
9. Desglose del trabajo en tareas	13
10. Diagrama de Activity On Node.	15
11. Diagrama de Gantt	15
12. Presupuesto detallado del proyecto	16
13. Gestión de riesgos	17
14. Gestión de la calidad	19
15. Procesos de cierre	21

Registros de cambios

Revisión	Detalles de los cambios realizados	Fecha
0	Creación del documento	11 de marzo de 2025
1	Se completa hasta el punto 5 inclusive	19 de marzo de 2025
2	Se ajustan los puntos 1, 3 y 4 con las correcciones de Wentux Tecnoagro. Se completa hasta el punto 9 inclusive	26 de marzo de 2025
3	Se ajustan los puntos 6 y 7 con las correcciones de Wentux Tecnoagro. Se completa hasta el punto 12 inclusive	2 de abril de 2025
4	Se ajusta el cronograma en el punto 11. Se completa la planificación	9 de abril de 2025
5	Ajustes menores de forma.	13 de abril de 2025

Acta de constitución del proyecto

Buenos Aires, 11 de marzo de 2025

Por medio de la presente se acuerda con la Ing. Laura Andrea Moreno Rodríguez que su Trabajo Final de la Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos se titulará “Diseño e implementación de una red Bluetooth Mesh para la gestión de sensores en invernaderos” y consistirá en la implementación de una solución de transmisión de datos basada en Bluetooth Mesh para interconectar diferentes sensores y actuadores dentro de un invernadero, así como el desarrollo de un servidor web embebido en el nodo central para optimizar el monitoreo y control local de la red. El trabajo tendrá un presupuesto preliminar estimado de 600 horas y un costo estimado de \$ 9600 USD, con fecha de inicio el 11 de marzo de 2025 y fecha de presentación pública en diciembre 2025.

Se adjunta a esta acta la planificación inicial.

Dr. Ing. Ariel Lutenberg
Director posgrado FIUBA

Pablo Lodetti
Wentux Tecnoagro

Esp. Ing. Federico Roux
Director del Trabajo Final

1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar

Este proyecto surge como una necesidad de la empresa Wentux Tecnoagro, quien lo ha propuesto dentro del programa de vinculación con empresas de la Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos. La empresa se dedica a la fabricación y comercialización de diversos dispositivos para la automatización de salas de cultivo, siendo los sensores de temperatura, humedad y Co2, algunos de sus productos más destacados. Actualmente, los sensores y actuadores fabricados por Wentux Tecnoagro se conectan a un dispositivo central mediante un enlace cableado, el cual gestiona la recopilación de datos y los transmite a través de la red Wi-Fi del usuario final. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones en escalabilidad y flexibilidad, ya que el dispositivo central admite un máximo de tres sensores y seis actuadores, restringiendo la expansión del sistema y la facilidad de instalación.

El objetivo principal de este proyecto es implementar una solución de transmisión de datos basada en Bluetooth Mesh para reemplazar la conexión cableada entre los sensores, actuadores y el dispositivo central. Para ello, se aprovecharán las capacidades Bluetooth del microcontrolador ESP32-C3, el cual actúa como unidad de procesamiento central en todos los dispositivos fabricados por Wentux Tecnoagro. Esta tecnología permitirá ampliar la capacidad del sistema al facilitar la incorporación de sensores y actuadores adicionales sin necesidad de cableado, simplificando la instalación y mejorando la escalabilidad. Además, se desarrollará un servidor web embebido en el dispositivo central, accesible a través de la red Wi-Fi local, que permitirá la configuración y supervisión de la red en tiempo real. Esto proporcionará una interfaz intuitiva para la gestión del sistema, mejorando la eficiencia operativa y la experiencia del usuario final.

Es importante señalar que el desarrollo y las pruebas del sistema no se llevarán a cabo con los dispositivos comerciales de Wentux Tecnoagro. En su lugar, se emplearán ESP32-C3 adquiridos específicamente para este proyecto, ya que son suficientes para desarrollar y validar la prueba de concepto. El enfoque principal se centrará en el diseño e implementación de la comunicación Bluetooth Mesh y el servidor web local, dejando la integración del código con los dispositivos reales para una fase posterior a cargo de Wentux Tecnoagro. Esto significa, que no se requiere acceso al hardware o software de la empresa, pero sí acompañamiento e información oportuna para poder simular los datos que sean necesarios y crear un entorno de desarrollo adecuado. Por otra parte, el cliente tendrá acceso completo al software desarrollado y la licencia para integrarlo en sus dispositivos desde el inicio del proyecto.

La motivación de este proyecto radica en la oportunidad de aplicar conocimientos avanzados en el desarrollo de firmware y comunicación inalámbrica, con un enfoque en tecnologías ampliamente utilizadas en el Internet de las Cosas (IoT), como lo son el microcontrolador ESP32-C3 y la red Bluetooth Mesh. Además, el proyecto contribuye al crecimiento de la microempresa Wentux Tecnoagro, proporcionando una solución que agrega valor y mejora la competitividad de sus productos en el mercado.

Una red de sensores Bluetooth Mesh es un sistema de comunicación inalámbrica en el que múltiples dispositivos (nodos) se interconectan para formar una red descentralizada de amplio alcance. En este tipo de red, cada nodo retransmite los datos recibidos, lo que permite extender la cobertura de comunicación más allá del alcance de un único dispositivo. En el contexto de salas de cultivo, en donde cada sensor o actuador es un nodo de la red, esta arquitectura posibilita la transmisión eficiente de los datos entre los nodos hasta alcanzar un dispositivo central que actúa como nodo central de la red. Esto reduce la infraestructura necesaria y facilita la escalabilidad del sistema.

La figura 1 ilustra el principio de comunicación en la red Bluetooth Mesh a implementar en este proyecto, donde los nodos, que en este caso corresponden a los sensores y actuadores en el invernadero, colaboran para transmitir datos de manera eficiente hasta llegar al nodo central. La diferencia entre un nodo y un nodo central radica principalmente en la configuración asignada a cada dispositivo durante la instalación de la red.

En términos de hardware, todos los nodos están basados en el ESP32-C3, como se muestra en la figura 2, que representa una versión simplificada de la arquitectura interna de cada dispositivo. La única diferencia funcional entre un nodo y el nodo central es que este último incorporará un servidor web embebido, al que el usuario final podrá acceder para visualizar y gestionar la red en tiempo real. Como resultado, el nodo central es el único que requiere una conexión estable a Wi-Fi, permitiendo el acceso a la interfaz de monitoreo.

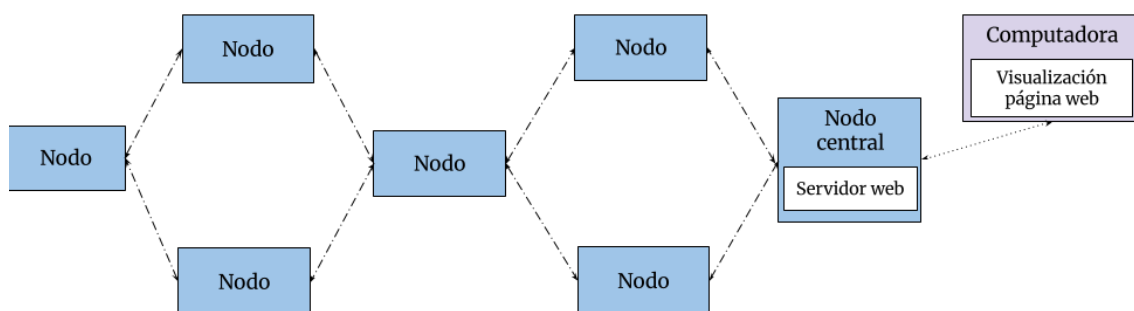


Figura 1. Diagrama de red Bluetooth Mesh.

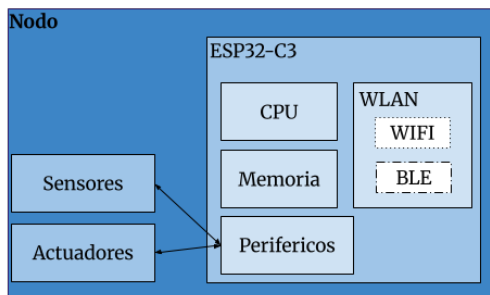


Figura 2. Diagrama en bloques de cada nodo en la red Bluetooth Mesh.

La implementación de la red Bluetooth Mesh se basará en el SDK proporcionado por Espressif, fabricante del microcontrolador ESP32-C3, el cual ya incluye los protocolos necesarios para la provisión, enrutamiento y gestión de los nodos. No obstante, el enfoque de este trabajo irá más allá de la implementación básica, ya que se personalizará la solución para cumplir con los requisitos específicos del cliente.

El desarrollo de este proyecto presenta varios desafíos, especialmente en la gestión eficiente de la comunicación entre nodos, asegurando una transmisión de datos estable en un entorno propenso a interferencias. Otro reto importante será la integración del protocolo de comunicación con el servidor web local, garantizando que la configuración y monitoreo de la red sean intuitivos para el usuario final. Finalmente, el código deberá ser modular y adaptable para que Wentux Tecnoagro pueda integrarlo en sus dispositivos reales sin modificaciones estructurales significativas, lo que requerirá una arquitectura bien diseñada y documentada para facilitar futuras expansiones.

Rol	Nombre y Apellido	Organización	Puesto
Cliente	Pablo Lodetti	Wentux Tecnoagro	Responsable técnico
Responsable	Ing. Laura Andrea Moreno Rodríguez	FIUBA	Alumno
Orientador	Esp. Ing. Federico Roux	Globant	Director del Trabajo Final

2. Identificación y análisis de los interesados

- **Cliente:** el señor Pablo Lodetti es el fundador de la empresa Wentux Tecnoagro y el responsable técnico de sus productos. Junto a él se definieron el alcance del proyecto y los entregables esperados.
- **Orientador:** el Esp. Ing. Federico Roux es especialista en Sistemas Embebidos y brindará orientación tanto en la arquitectura del sistema a implementar como en el desarrollo del firmware embebido.

3. Propósito del proyecto

El propósito de este proyecto es diseñar e implementar una red de comunicación basada en Bluetooth Mesh para reemplazar la conexión cableada entre los sensores, actuadores y el dispositivo central de Wentux Tecnoagro en invernaderos. Esta solución permitirá ampliar la capacidad del sistema, eliminando las restricciones de cableado y facilitando la integración de nuevos dispositivos. Además, se desarrollará un servidor web local en el nodo central, que permitirá la configuración y supervisión de la red en tiempo real, mejorando la escalabilidad, eficiencia y facilidad de uso del sistema para el cliente final.

4. Alcance del proyecto

Este proyecto incluye:

- Implementación de una red de sensores y actuadores Bluetooth Mesh utilizando el microcontrolador ESP32-C3, basada en el SDK de Espressif.
- Desarrollo de una biblioteca modular para la comunicación Bluetooth Mesh, permitiendo su fácil integración en los dispositivos del cliente.
- Implementación de un nodo central con servidor web local, que actuará como punto de recopilación de datos y permitirá la visualización y configuración de la red en tiempo real.
- Diseño de una arquitectura adaptable, asegurando que el firmware desarrollado pueda ser integrado posteriormente en los dispositivos reales sin modificaciones estructurales significativas.
- Desarrollo de una interfaz web intuitiva para el monitoreo y configuración de la red de sensores, accesible a través del nodo central.
- Validación del sistema en condiciones simuladas, asegurando su funcionamiento antes de la integración con los dispositivos del cliente.

- Escalabilidad del sistema, asegurando que la solución pueda soportar un número creciente de nodos sin afectar el rendimiento.
- Documentación técnica del proyecto, incluyendo la descripción de la arquitectura, instrucciones de integración y uso de la biblioteca y servidor web.

Este listado aclara qué aspectos quedan fuera del alcance del proyecto:

- Uso de los dispositivos reales de la empresa: se trabajará con microcontroladores ESP32-C3 adquiridos para el proyecto, simulando los datos de medición en lugar de utilizar los dispositivos comerciales de Wentux Tecnoagro.
- Desarrollo de hardware personalizado: el proyecto no incluye el diseño o modificación del hardware de los dispositivos actuales de la empresa, sino únicamente el desarrollo del software.
- Integración final con los dispositivos comerciales: la implementación en los dispositivos reales será responsabilidad del cliente, quien podrá integrar la biblioteca desarrollada.
- Soporte para otras tecnologías de comunicación: se trabajará exclusivamente con Bluetooth Mesh y Wi-Fi en el nodo central, sin incluir otros protocolos como LoRa, Zigbee o LTE.
- Acceso a software privativo de la empresa: no se requerirá acceso al firmware actual de los dispositivos comerciales de Wentux Tecnoagro.
- Implementación de seguridad avanzada: la seguridad de la red Bluetooth Mesh se manejará con las características estándar del SDK de Espressif, sin incluir desarrollos adicionales en cifrado o autenticación avanzada.
- Almacenamiento en la nube o acceso remoto: el servidor web será local y accesible solo dentro de la red Wi-Fi donde esté conectado el nodo central. No se incluirá conectividad con servicios en la nube ni acceso remoto externo.
- Soporte para aplicaciones móviles: la visualización y configuración se realizará a través de la interfaz web del nodo central, sin el desarrollo de una aplicación móvil dedicada.
- Mantenimiento o soporte post-proyecto: no se incluye una fase de soporte o mantenimiento continuo una vez entregado el código y la documentación.
- Validación en entornos reales: no se realizarán pruebas de alcance, latencia o consumo energético en un invernadero real; el sistema será validado en condiciones simuladas.

5. Supuestos del proyecto

- Disponibilidad de tiempo

La Ing. Laura Andrea Moreno Rodríguez cuenta con el tiempo suficiente para completar el desarrollo del proyecto dentro de un plazo de siete meses, con una dedicación promedio de 20 horas por semana.

No habrá interrupciones significativas en el desarrollo del proyecto debido a cambios en la disponibilidad del equipo de trabajo.

Se espera contar con la colaboración de Pablo Lodetti y Wentux Tecnoagro para responder consultas técnicas o aclaraciones necesarias durante el desarrollo.

- Disponibilidad de recursos materiales

Se dispone de al menos 4 microcontroladores ESP32-C3 para el desarrollo y pruebas del sistema.

Se cuenta con acceso a herramientas de desarrollo adecuadas, incluyendo computadoras, compiladores, depuradores y hardware de prueba.

Se dispone de un entorno adecuado para realizar pruebas de conectividad Bluetooth Mesh en condiciones similares a un invernadero.

Se asume que Wentux Tecnoagro proporcionará la información técnica necesaria sobre sus dispositivos y sus requisitos específicos de integración.

- Factibilidad técnica

El SDK de Espressif para Bluetooth Mesh funciona correctamente y cumple con las necesidades del proyecto sin requerir modificaciones profundas.

La red Bluetooth Mesh tendrá un rendimiento adecuado para transmitir los datos de los sensores y actuadores dentro de un invernadero típico, sin interferencias significativas.

La implementación del servidor web en el nodo central del sistema será viable y permitirá la visualización y gestión de la red en tiempo real.

La integración de la biblioteca desarrollada con los sensores de Wentux Tecnoagro podrá realizarse sin cambios estructurales en su firmware actual.

- Condiciones externas

No habrá cambios regulatorios o restricciones tecnológicas que afecten la implementación de Bluetooth Mesh en el entorno del cliente.

No se prevé escasez de microcontroladores ESP32-C3 u otros componentes electrónicos esenciales durante el desarrollo del proyecto.

No habrá fluctuaciones significativas en costos de hardware o herramientas necesarias que impacten la viabilidad del proyecto.

6. Requerimientos

1. Requerimientos funcionales

- 1.1. El nodo central debe actuar como coordinador de la red Bluetooth Mesh, recopilando datos de los sensores y enviando comandos a los actuadores.
- 1.2. Cada nodo de la red debe ser capaz de retransmitir datos para extender la cobertura.
- 1.3. El nodo central debe registrar logs básicos de actividad para diagnóstico y depuración.
- 1.4. El nodo central debe desplegar un servidor web local para la configuración y el monitoreo de la red.
- 1.5. El sistema debe detectar cuando un nodo se desconecta y reflejar su estado en la interfaz web.
- 1.6. Si un nodo se desconecta, debe intentar reconectarse automáticamente a la red.
- 1.7. El servidor web del nodo central debe ser accesible solo dentro de la red Wi-Fi local.
- 1.8. (Opcional) El servidor web del nodo central debe requerir autenticación mediante un usuario y una contraseña definidos por el usuario final para restringir el acceso.

- 1.9. (Opcional) Cada nodo debe desplegar una interfaz web local para configurar datos de identificación dentro de la red.

2. Requerimientos de interfaz

- 2.1. Desde la interfaz web del nodo central, el usuario debe poder:
 - Visualizar el estado actual de la red
 - Agregar o eliminar nodos de la red.
 - Visualizar los datos transmitidos y recibidos por cada nodo.
 - Visualizar datos de identificación de cada nodo.
 - Configurar datos de identificación de cada nodo.
- 2.2. La interfaz web debe ser intuitiva, con una estructura clara para la configuración y monitoreo de la red.
- 2.3. La interfaz web debe ser accesible desde dispositivos móviles y de escritorio.
- 2.4. Debe haber una representación gráfica o en lista del estado de cada nodo (activo/inactivo).
- 2.5. (Opcional) Desde la interfaz web de cada nodo, el usuario debe poder:
 - Asignar nombres personalizados al nodo.
 - Visualizar si el nodo está activo o inactivo dentro de la red.

3. Requerimientos no funcionales

- 3.1. La red de sensores y actuadores debe implementarse utilizando Bluetooth Mesh sobre microcontroladores ESP32-C3.
- 3.2. Se debe trabajar con microcontroladores ESP32-C3 adquiridos para el proyecto, en lugar de usar los dispositivos comerciales de Wentux Tecnoagro.
- 3.3. Se debe utilizar el SDK de Espressif para el desarrollo del firmware Bluetooth Mesh.
- 3.4. El servidor web se debe implementar con tecnologías compatibles con el ESP32-C3 (ej., ESP-IDF, AsyncWebServer).
- 3.5. El sistema debe soportar la conexión de al menos 5 nodos simultáneamente.
- 3.6. La implementación debe permitir escalar la red a más de 5 nodos con mínimas modificaciones en el software.
- 3.7. Cada nodo debe poder enviar y recibir datos del nodo central al menos cada 5 segundos.
- 3.8. El tiempo de respuesta del servidor web no debe exceder los 500 ms en condiciones normales de operación.
- 3.9. La comunicación entre nodos debe utilizar los mecanismos de seguridad estándar del SDK de Espressif para Bluetooth Mesh.
- 3.10. El código fuente debe ser modular y documentado, permitiendo futuras modificaciones e integraciones.

4. Requerimientos de validación

- 4.1. Se deben realizar pruebas funcionales para verificar la comunicación entre nodos.
- 4.2. Se debe validar que los nodos se agreguen y configuren correctamente desde la interfaz web.
- 4.3. Se deben realizar pruebas de estabilidad del sistema con el número máximo de dispositivos soportados.

- 4.4. Se debe verificar que el tiempo de respuesta del servidor web se mantenga dentro del límite establecido.
- 4.5. Se debe evaluar la distancia máxima entre nodos antes de perder conectividad.
5. Requerimientos de documentación
 - 5.1. Se debe entregar una documentación técnica con:
 - Descripción de la arquitectura de la red Bluetooth Mesh.
 - Instrucciones para integrar la biblioteca en futuros dispositivos.
 - Manual de uso de la interfaz web.
 - Guía de instalación y configuración del nodo central.
 - Documentación sobre las validaciones realizadas.

7. Historias de usuarios (*Product backlog*)

Para las siguientes historias de usuario, se identifican los siguientes roles principales:

- Administrador: es Wentux Tecnoagro como dueño y distribuidor del sistema. Tiene acceso al hardware y al software de los dispositivos conectados a la red Bluetooth Mesh.
- Usuario: es el usuario final al que Wentux Tecnoagro ofrecerá su solución. Interactúa con el sistema a través de la interfaz web del nodo central para gestionar, monitorear y visualizar el estado de la red en tiempo real.
- Desarrollador: es la Ing. Laura Andrea Moreno Rodríguez como encargada de diseñar e implementar el sistema. Garantiza que todos los requerimientos se cumplan, para que el firmware y la interfaz web funcionen correctamente.

Las historias de usuario se agrupan a continuación por funcionalidad y se han estimado con una puntuación basada en la relevancia, dificultad e incertidumbre de cada una. Cada criterio recibe un valor entre 1 y 3, y la puntuación total de la historia corresponde a la suma de estos valores. El puntaje mínimo es 1 y el máximo es 9, reflejando el esfuerzo relativo requerido para su implementación.

1. Red Bluetooth Mesh y nodo central

- 1.1. Como administrador, quiero que el nodo central actúe como coordinador de la red para recopilar datos de los sensores y enviar comandos a los actuadores. *Story points: 9* (relevancia: 3, dificultad: 3, incertidumbre: 3)
- 1.2. Como administrador, quiero que cada nodo pueda retransmitir datos para extender la cobertura de la red. *Story points: 7* (relevancia: 2, dificultad: 3, incertidumbre: 2)
- 1.3. Como administrador, quiero que el sistema detecte cuando un nodo se desconecta para reflejar su estado en la interfaz web. *Story points: 5* (relevancia: 2, dificultad: 2, incertidumbre: 1)
- 1.4. Como administrador, quiero que cada nodo intente reconectarse automáticamente si se desconecta de la red para mantener la estabilidad del sistema. *Story points: 6* (relevancia: 2, dificultad: 2, incertidumbre: 2)

- 1.5. Como administrador, quiero que el nodo central registre logs básicos de actividad para diagnóstico y depuración del sistema. *Story points*: 3 (relevancia: 1, dificultad: 1, incertidumbre: 1)
- 1.6. Como administrador, quiero que el nodo central tenga un servidor web local para configurar y monitorear la red. *Story points*: 9 (relevancia: 3, dificultad: 3, incertidumbre: 3)
- 1.7. Como administrador, quiero que cada nodo pueda enviar y recibir datos del nodo central al menos cada 5 segundos para asegurar una actualización constante de la información. *Story points*: 5 (relevancia: 2, dificultad: 2, incertidumbre: 1)
- 1.8. Como administrador, quiero que el tiempo de respuesta del servidor web no supere los 500 ms para garantizar una experiencia fluida. *Story points*: 5 (relevancia: 2, dificultad: 2, incertidumbre: 1)
- 1.9. Como desarrollador, quiero que el firmware sea modular y reutilizable para facilitar futuras implementaciones en hardware comercial. *Story points*: 5 (relevancia: 1, dificultad: 3, incertidumbre: 1)
2. Interfaz web del nodo central
 - 2.1. (Opcional) Como usuario, quiero acceder a la interfaz web mediante un usuario y una contraseña establecida previamente para garantizar la seguridad del sistema. *Story points*: 6 (relevancia: 0, dificultad: 3, incertidumbre: 3)
 - 2.2. Como usuario, quiero ver el estado actual de la red en la interfaz web para monitorear su funcionamiento. *Story points*: 9 (relevancia: 3, dificultad: 3, incertidumbre: 3)
 - 2.3. Como usuario, quiero visualizar una lista o representación gráfica del estado de cada nodo (activo/inactivo) para tener una visión clara de la red. *Story points*: 9 (relevancia: 3, dificultad: 3, incertidumbre: 3)
 - 2.4. Como usuario, quiero agregar nodos a la red desde la interfaz web para expandir el sistema. *Story points*: 8 (relevancia: 2, dificultad: 3, incertidumbre: 3)
 - 2.5. Como usuario, quiero eliminar nodos de la red desde la interfaz web para reorganizar el sistema según sea necesario. *Story points*: 8 (relevancia: 2, dificultad: 3, incertidumbre: 3)
 - 2.6. Como usuario, quiero visualizar los datos transmitidos y recibidos por cada nodo para monitorear su actividad. *Story points*: 5 (relevancia: 1, dificultad: 2, incertidumbre: 2)
 - 2.7. Como usuario, quiero visualizar los datos de identificación de cada nodo para reconocerlos fácilmente en la red. *Story points*: 5 (relevancia: 1, dificultad: 2, incertidumbre: 2)
 - 2.8. Como usuario, quiero configurar los datos de identificación de cada nodo para asignar nombres personalizados y roles dentro de la red. *Story points*: 7 (relevancia: 2, dificultad: 3, incertidumbre: 2)
 - 2.9. Como usuario, quiero que la interfaz web sea intuitiva para configurar y monitorear la red de manera sencilla. *Story points*: 6 (relevancia: 2, dificultad: 2, incertidumbre: 2)
3. (Opcional) Interfaz web de cada nodo
 - 3.1. Como usuario, quiero que cada nodo tenga una interfaz web local para configurar sus datos de identificación dentro de la red. *Story points*: 4 (relevancia: 0, dificultad: 2, incertidumbre: 2)

- 3.2. Como usuario, quiero asignar nombres personalizados a los nodos desde su interfaz web para identificarlos fácilmente. *Story points*: 2 (relevancia: 0, dificultad: 1, incertidumbre: 1)
- 3.3. Como usuario, quiero visualizar si un nodo está activo o inactivo en la red desde su interfaz web para asegurar su correcto funcionamiento. *Story points*: 2 (relevancia: 0, dificultad: 1, incertidumbre: 1)

4. Documentación

- 4.1. Como administrador, quiero recibir documentación técnica del sistema para comprender la arquitectura y el firmware desarrollado. *Story points*: 3 (relevancia: 1, dificultad: 1, incertidumbre: 1)
- 4.2. Como administrador, quiero recibir instrucciones claras para integrar la biblioteca en futuros dispositivos. *Story points*: 3 (relevancia: 1, dificultad: 1, incertidumbre: 1)
- 4.3. Como usuario, quiero un manual de uso de la interfaz web para configurar y monitorear la red correctamente. *Story points*: 3 (relevancia: 1, dificultad: 1, incertidumbre: 1)
- 4.4. Como administrador, quiero recibir documentación sobre las validaciones realizadas para asegurar la confiabilidad del sistema. *Story points*: 3 (relevancia: 1, dificultad: 1, incertidumbre: 1)

8. Entregables principales del proyecto

Los siguientes son los entregables de este proyecto:

- Código fuente del firmware para el nodo central y los nodos de la red.
- Código fuente del servidor e interfaz web del nodo central.
- Documentación técnica con los resultados de pruebas funcionales, descripción de la arquitectura de la red Bluetooth Mesh y explicación del firmware y sus módulos.
- Manual de desarrollador para integrar la biblioteca en futuros dispositivos.
- Manual de usuario para la configuración y monitoreo de la red a través de la interfaz web.
- Memoria del trabajo final.

9. Desglose del trabajo en tareas

Las siguientes son las tareas necesarias para cumplir con los entregables del proyecto y su duración estimada:

1. Planificación del proyecto (60 h)
 - 1.1. Definir requerimientos (10 h)
 - 1.2. Definir plan de trabajo (10 h)
 - 1.3. Escribir documento de planificación (40 h)

2. Preparación del entorno de desarrollo (45 h)
 - 2.1. Seleccionar y comprar componentes (5 h)
 - 2.2. Instalar el entorno de desarrollo (10 h)
 - 2.3. Ensamblar y realizar pruebas iniciales (30 h)
3. Desarrollo del firmware (230 h)
 - 3.1. Leer documentación sobre Bluetooth Mesh para ESP32-C3 (20 h)
 - 3.2. Probar ejemplos del SDK de Espressif para Bluetooth Mesh (40 h)
 - 3.3. Implementar el módulo para el nodo central de la red (40 h)
 - 3.4. Implementar el módulo para los otros nodos de red (40 h)
 - 3.5. Agregar test unitarios a la implementación (40 h)
 - 3.6. Probar y mejorar la implementación (40 h)
 - 3.7. Agregar logs para depuración (10 h)
4. Desarrollo del servidor web (160 h)
 - 4.1. Leer documentación sobre servidores web para ESP32-C3 (20 h)
 - 4.2. Probar ejemplos de servidores web (20 h)
 - 4.3. Leer documentación sobre interfaz web para ESP32-C3 (10 h)
 - 4.4. Probar ejemplos de interfaz web (10 h)
 - 4.5. Implementar el servidor web (40 h)
 - 4.6. Diseñar la interfaz web (20 h)
 - 4.7. Implementar la interfaz web (40 h)
5. Pruebas y validaciones (25 h)
 - 5.1. Probar la configuración del nodo central (5 h)
 - 5.2. Probar la comunicación entre nodos (5 h)
 - 5.3. Probar la escalabilidad del sistema (5 h)
 - 5.4. Probar la latencia y respuesta del servidor web (5 h)
 - 5.5. Probar la usabilidad de la interfaz web (5 h)
6. Documentación (80 h)
 - 6.1. Documentación técnica de la arquitectura (10 h)
 - 6.2. Documentación técnica del firmware (10 h)
 - 6.3. Manuales de usuario (10 h)
 - 6.4. Informe de validaciones (10 h)
 - 6.5. Memoria de trabajo final (40 h)

Cantidad total de horas: 600 h

10. Diagrama de Activity On Node

En la figura 3 se muestra el diagrama Activity On Node (AoN) construido a partir del desglose de tareas definido en el punto anterior. A pesar de que solo se dispone de un recurso humano a lo largo del proyecto, varias tareas relacionadas entre sí se pueden ejecutar en paralelo. Los diferentes colores en el diagrama representan cada grupo de tareas, y el tiempo está expresado en horas.

El camino crítico del proyecto, con una duración total de 430 horas, se representa con flechas más oscuras, destacando la secuencia de actividades que determinan la duración mínima del proyecto.

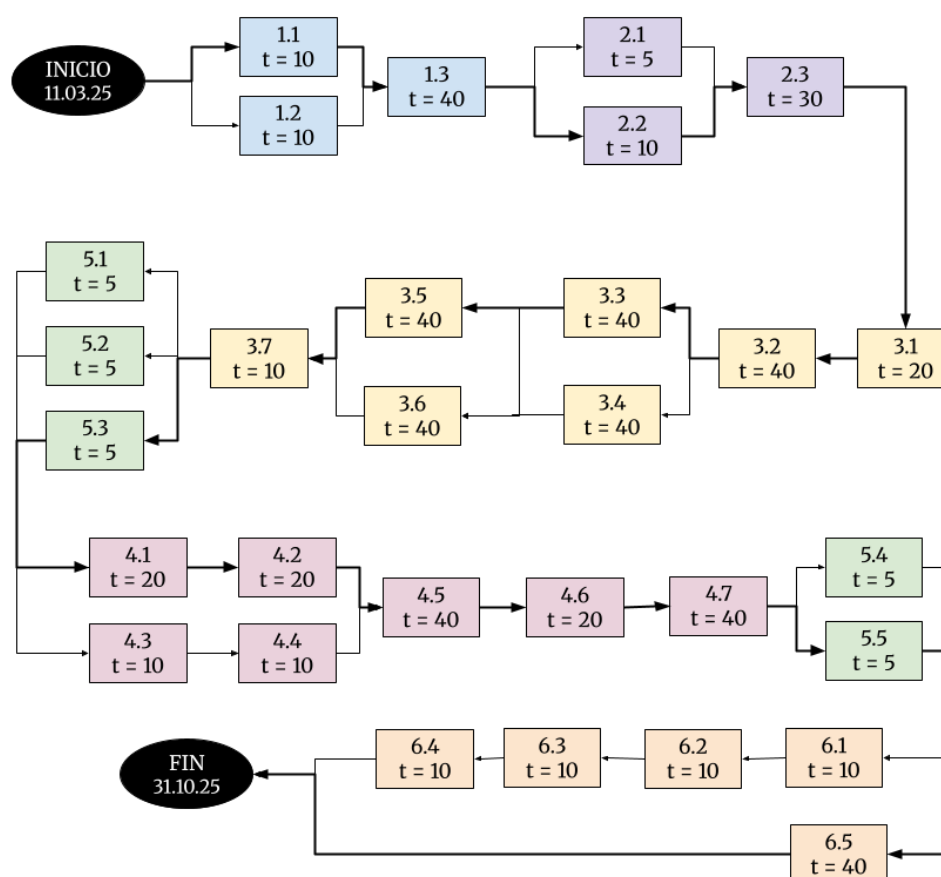


Figura 3. Diagrama de *Activity on Node*.

11. Diagrama de Gantt

En la figura 4 se presenta el diagrama de Gantt, elaborado a partir del desglose de tareas y del diagrama AoN definido en el punto anterior. Considerando la paralelización de tareas establecida, el diagrama muestra la fecha estimada de inicio y finalización de cada actividad, tomando en cuenta su duración y asumiendo una dedicación promedio de 20 horas semanales al desarrollo del proyecto.

Al igual que en el diagrama AoN, cada grupo de tareas está representado con un color diferente para facilitar su identificación. El proyecto tiene como fecha de inicio el 11 de marzo de 2025 y finalizará la semana del 31 de octubre de 2025.

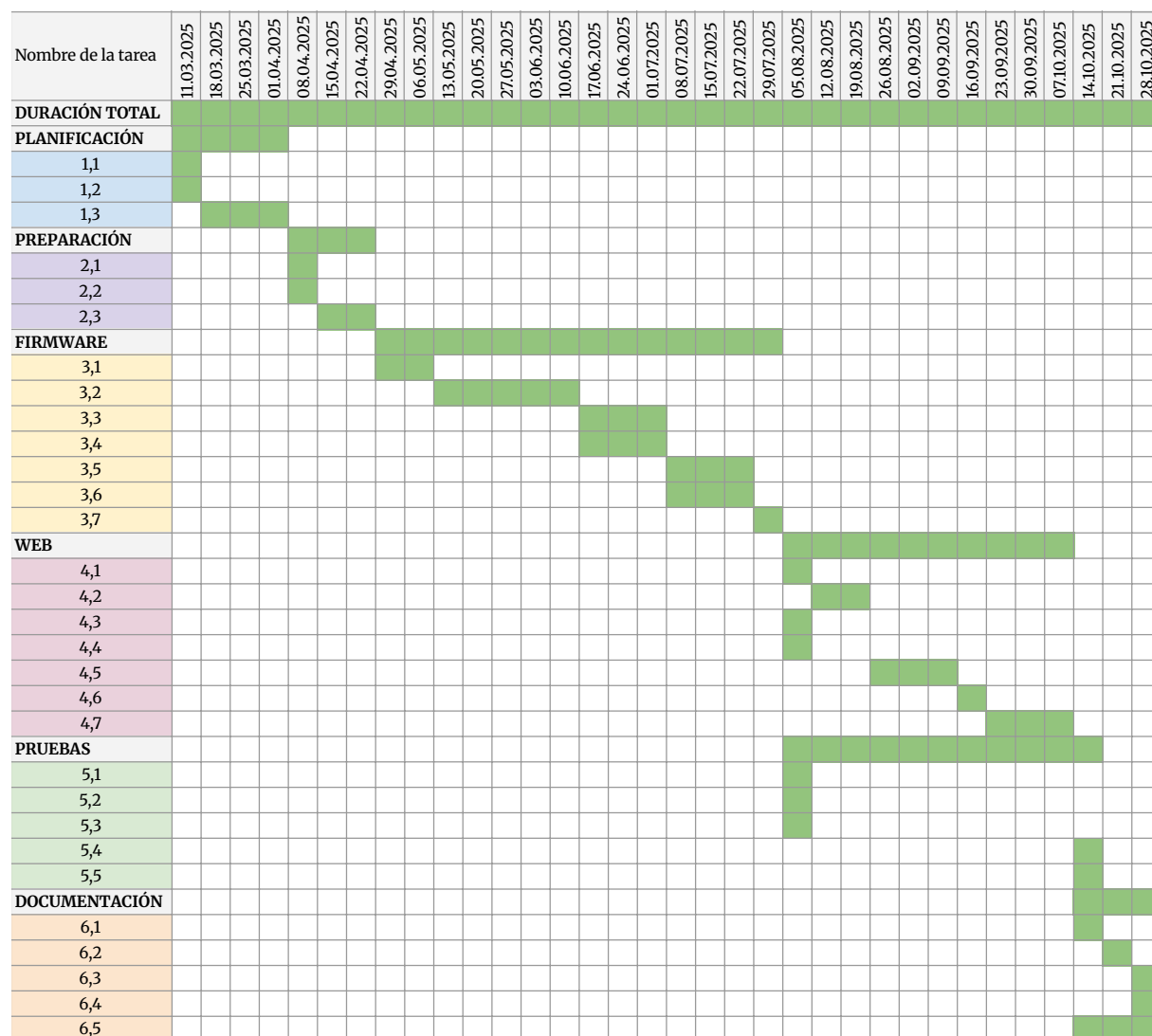


Figura 4. Diagrama de Gantt.

12. Presupuesto detallado del proyecto

A continuación, se presenta la tabla de costos directos e indirectos asociados a este proyecto. Los valores unitarios se encuentran expresados en dolares estadounidenses (USD). Los valores totales se encuentran en USD y en pesos argentinos (ARS).

Tasa de conversion: USD \$1 = ARS \$1072.87, correspondiente a la fecha 2 de abril de 2025.

COSTOS DIRECTOS			
Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Módulos ESP32-C3 mini	4	\$6	\$24
Componentes electrónicos adicionales	1	\$10	\$10
Computadora personal	1	\$400	\$400
Hora de trabajo ingeniera	600	\$10	\$6000
Hora de consultoria especialista	14	\$20	\$280
SUBTOTAL EN USD			\$6714
SUBTOTAL EN ARS			\$7'203.249
COSTOS INDIRECTOS			
Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Servicios de oficina mensual	7	\$25	\$175
Fondo de riesgos para ESP32-C3	2	\$6	\$12
SUBTOTAL EN USD			\$187
SUBTOTAL EN ARS			\$200.625
TOTAL EN USD			\$6901
TOTAL EN ARS			\$7'403.848

13. Gestión de riesgos

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

Riesgo 1: problemas en la implementación de la red Bluetooth Mesh

- Severidad (S): 10.
Afectaría la comunicación total del sistema y es el requerimiento principal del proyecto.
- Probabilidad de ocurrencia (O): 8.
La tecnología Bluetooth Mesh es compleja y no se cuenta con experiencia previa desarrollando firmware para ESP32-C3.

Riesgo 2: cambios constantes en requerimientos

- Severidad (S): 5.
Podría generar retrabajo y retrasos.
- Probabilidad de ocurrencia (O): 6.
Es común en proyectos con interfaces nuevas y pruebas de concepto.

Riesgo 3: baja disponibilidad del equipo de desarrollo

- Severidad (S): 8.
Puede ralentizar el avance del proyecto.
- Probabilidad de ocurrencia (O): 7.
Riesgo alto al tener una sola desarrolladora en el proyecto.

Riesgo 4: fallas en pruebas de validación

- Severidad (S): 7.
Sin validación, no se garantiza estabilidad ni confiabilidad en el sistema.
- Probabilidad de ocurrencia (O): 5.
Riesgo medio si no se cubren todos los requerimientos listados.

Riesgo 5: documentación incompleta

- Severidad (S): 6.
Dificulta mantenibilidad y transferencia de conocimiento.
- Probabilidad de ocurrencia (O): 7.
Suele dejarse para el final del trabajo con plazos justos.

Riesgo 6: subestimación del esfuerzo necesario para cada historia

- Severidad (S): 7.
Puede impactar cronograma y presupuesto.
- Probabilidad de ocurrencia (O): 8.
Siempre existe cierto grado de incertidumbre durante la planificación inicial.

Riesgo 7: presupuesto insuficiente para reemplazar hardware

- Severidad (S): 8.
Sin hardware funcional no se puede avanzar en el proyecto.
- Probabilidad de ocurrencia (O): 3.
Ya se conocen los costos aproximados y el hardware a adquirir.

b) Tabla de gestión de riesgos:

El número de prioridad de riesgo (RPN, por sus siglas en inglés) se calcula como $RPN = \text{Severidad (S)} \times \text{Probabilidad de ocurrencia (O)}$. Se priorizarán medidas de mitigación para aquellos riesgos cuyo RPN sea mayor a 50, por considerarse de impacto significativo. En la tabla, los valores marcados con un asterisco (*) corresponden a los niveles de severidad y probabilidad después de aplicar las acciones de mitigación.

Riesgo	S	O	RPN	S*	O*	RPN*
Problemas en la implementación de Bluetooth Mesh	10	8	80	10	5	50
Cambios constantes en requerimientos	5	6	30			
Baja disponibilidad del equipo de desarrollo	8	7	56	8	5	40
Fallas en pruebas de validación	7	5	35			
Documentación incompleta	6	7	42			
Subestimación del esfuerzo necesario para cada historia	7	8	56	7	5	35
Presupuesto insuficiente para reemplazar hardware	8	3	24			

c) Plan de mitigación:

A continuación, se detallan los riesgos priorizados cuyo RPN supera el umbral de 50, junto con sus respectivas estrategias de mitigación y la reevaluación de severidad y probabilidad tras aplicar dichas acciones.

Riesgo 1: problemas en la implementación de la red Bluetooth Mesh.

Mitigación: capacitación técnica previa, ejecución de pruebas con ejemplos oficiales, uso de bibliotecas estables y soporte del director del proyecto con experiencia en firmware para ESP32.

- Severidad (S^*): 10.
El impacto sigue siendo crítico si ocurre, ya que afectaría la funcionalidad base del sistema.
- Probabilidad de ocurrencia (O^*): 5.
Gracias a la preparación técnica y el acompañamiento experto, la probabilidad se reduce moderadamente.

Riesgo 3: baja disponibilidad del equipo de desarrollo

Mitigación: definición de un cronograma realista, considerando la disponibilidad semanal de la desarrolladora, así como vacaciones y feriados.

- Severidad (S^*): 8.
El impacto sigue siendo alto, pues podría generar retrasos importantes en el proyecto.
- Probabilidad de ocurrencia (O^*): 5.
Con una planificación adecuada, la posibilidad de que la desarrolladora no esté disponible disminuye significativamente.

Riesgo 6: subestimación del esfuerzo necesario para cada historia

Mitigación: planificación basada en iteraciones ágiles, con reevaluación y refinamiento periódico de las estimaciones a medida que avanza el proyecto.

- Severidad (S^*): 7.
El impacto continúa siendo considerable, ya que puede comprometer los tiempos de entrega y la calidad.
- Probabilidad de ocurrencia (O^*): 5.
La probabilidad se reduce mediante ciclos de revisión y mejora continua en las estimaciones.

14. Gestión de la calidad

- Req #1.1. El nodo central debe actuar como coordinador de la red Bluetooth Mesh, recopilando datos de los sensores y enviando comandos a los actuadores.
 - Verificación: enviar mensajes de prueba desde el nodo central a un nodo en específico y recibir respuesta del mismo, así como recibir constantemente mensajes de todos los nodos conectados. Revisar logs de tráfico de mensajes entre nodos y el nodo central.
 - Validación: comprobar desde la interfaz web que el nodo central recibe datos de los sensores y envía comandos a los actuadores.
- Req #1.2. Cada nodo de la red debe ser capaz de retransmitir datos para extender la cobertura.

- Verificación: ubicar los nodos a una distancia de 5 m entre sí y enviar mensajes de prueba desde el nodo central al nodo más lejano, asegurando que pase por un nodo intermedio y recibir respuesta del mismo. Enviar mensajes de prueba desde el nodo más lejano al nodo central, asegurando que pase por un nodo intermedio. Revisar logs de tráfico de mensajes entre nodos y el nodo central.
- Validación: ubicar los nodos a una distancia de 5 m entre sí y comprobar desde la interfaz web que el nodo central recibe datos del sensor más lejanos y envía comandos al actuador más lejano.
- Req #1.4. El nodo central debe desplegar un servidor web local para la configuración y monitoreo de la red.
 - Verificación: confirmar que el servidor web inicia al encender el nodo central y responde a peticiones locales.
 - Validación: acceder a la interfaz web desde un navegador utilizando la IP y puerto del nodo central y navegar por sus secciones.
- Req #1.5. El sistema debe detectar cuando un nodo se desconecta y reflejar su estado en la interfaz web.
 - Verificación: forzar la desconexión de un nodo y revisar en los logs que el sistema registre el evento en tiempo real. Verificar que el evento de desconexión se actualiza en la interfaz web.
 - Validación: desconectar o apagar un nodo y observar que la interfaz web lo marque como inactivo.
- Req #2.1.1. Desde la interfaz web del nodo central, el usuario debe poder visualizar el estado actual de la red
 - Verificación: verificar por medio de logs la estructura de datos que representa la red y si se actualiza en tiempo real. Verificar que los datos de la estructura son actualizados en la interfaz web.
 - Validación: abrir la interfaz web y observar los estados de todos los nodos en tiempo real.
- Req #2.1.2. Desde la interfaz web del nodo central, el usuario debe poder agregar o eliminar nodos de la red.
 - Verificación: verificar que el firmware procese correctamente las solicitudes de alta y baja de nodos utilizando pruebas locales.
 - Validación: usar la interfaz web para agregar o quitar nodos y confirmar los cambios en la red.
- Req #3.1. La red de sensores y actuadores debe implementarse utilizando Bluetooth Mesh sobre microcontroladores ESP32-C3.
 - Verificación: verificar que el firmware compile con ESP-IDF para ESP32-C3 y utilice el stack Mesh.
 - Validación: instalar el firmware en diferentes ESP32-C3 y comprobar desde la interfaz web que todos pueden ser agregados como nodos a la red.
- Req #3.5. El sistema debe soportar la conexión de al menos 5 nodos simultáneamente.
 - Verificación: probar la red con 5 nodos activos, monitoreando consumo de recursos, latencia y comprobando la comunicación con cada uno.

- Validación: verificar que los 5 nodos aparecen y funcionan correctamente desde la interfaz web.
- Req #3.7. Cada nodo debe poder enviar y recibir datos del nodo central al menos cada 5 segundos.
 - Verificación: revisar los timers y logs de envío/recepción de paquetes en los nodos.
 - Validación: observar actualizaciones periódicas de datos en la interfaz web, al menos cada 5 segundos.
- Req #3.10. El código fuente debe ser modular y documentado, permitiendo futuras modificaciones e integraciones.
 - Verificación: revisar la estructura del código, uso de funciones independientes y archivos reutilizables. Ejecutar test unitarios para garantizar la modularidad del código.
 - Validación: intentar hacer uso de algunas de las funciones desarrolladas en el hardware de Wentux Tecnoagro.
- Req #3.8. El tiempo de respuesta del servidor web no debe exceder los 500 ms en condiciones normales de operación.
 - Verificación: medir el tiempo de respuesta del servidor web con herramientas como curl, Postman y logs del servidor.
 - Validación: interactuar con la interfaz web y validar que las acciones respondan de forma imperceptible en tiempo real.

15. Procesos de cierre

Para culminar formalmente el proyecto, se realizará una reunión final de evaluación en la que se revisarán los objetivos alcanzados, las lecciones aprendidas y se reconocerá la labor del equipo. A continuación, se detallan las pautas de trabajo para llevar a cabo esta etapa:

- Evaluación del cumplimiento del plan del proyecto.

Responsable: el director del proyecto, el Esp. Ing. Federico Roux, será el encargado de analizar si se respetaron los lineamientos establecidos en la planificación inicial del trabajo.

Procedimiento: se compararán los requerimientos, cronograma y entregables definidos en el plan inicial con los resultados reales, utilizando métricas de desempeño (por ejemplo, cumplimiento de plazos, alcance técnico logrado y calidad del producto). Esta información se recopilará en una carta de cierre que será presentada y discutida en la presentación pública del trabajo final.
- Identificación de técnicas, procedimientos y resolución de problemas.

Responsable: el responsable del proyecto, la Ing. Laura Andrea Moreno Rodríguez, será la encargada de identificar las técnicas y procedimientos que resultaron útiles o ineficientes, así como los problemas más relevantes surgidos durante el proyecto.

Procedimiento: en la memoria del trabajo final se documentarán las prácticas exitosas, los obstáculos enfrentados y las soluciones adoptadas. Este documento quedará archivado como referencia para futuros proyectos similares.

- Acto de agradecimiento.

Responsable: el cliente, Pablo Lodetti, organizará una instancia de cierre virtual para agradecer la colaboración de todos los interesados, con especial atención al equipo de desarrollo y los colaboradores clave.

Financiación: no se presupuestan gastos asociados al ser un encuentro virtual.