



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

Autor:

Ing. Laura Andrea Moreno Rodríguez

Director:

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> ). . . . .	10
8. Entregables principales del proyecto . . . . .	10
9. Desglose del trabajo en tareas . . . . .	11
10. Diagrama de Activity On Node. . . . .	11
11. Diagrama de Gantt . . . . .	12
12. Presupuesto detallado del proyecto . . . . .	15
13. Gestión de riesgos . . . . .	15
14. Gestión de la calidad . . . . .	16
15. Procesos de cierre . . . . .	17

## 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

## 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 un protocolo de comunicación basado en Bluetooth Mesh para interconectar diferentes sensores dentro de un invernadero, así como el desarrollo de un servidor web embebido en el dispositivo 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 noviembre 2025.

Se adjunta a esta acta la planificación inicial.

Dr. Ing. Ariel Lutenberg  
Director posgrado FIUBA

Pablo Lodetti  
Wentux Tecnoagro

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  $\text{CO}_2$ , algunos de sus productos más destacados. Actualmente, los sensores fabricados por Wentux Tecnoagro utilizan el microcontrolador ESP32-C3 como procesador central y transmiten los datos de medición a través de la conexión Wi-Fi del usuario final. Sin embargo, este enfoque limita la instalación de los sensores en las salas de cultivo, ya que todos deben estar dentro del alcance de la red Wi-Fi para funcionar correctamente.

El objetivo principal de este proyecto es aprovechar las capacidades Bluetooth del ESP32-C3 para implementar una solución de transmisión de datos mediante una red de sensores Bluetooth Mesh. Esta tecnología permitirá superar la limitación de cobertura Wi-Fi, al proporcionar una red descentralizada donde cada sensor puede transmitir datos a través de otros nodos, extendiendo el alcance y mejorando la confiabilidad del sistema. Además, se desarrollará un servidor web embebido en el nodo central que facilitará la configuración y monitoreo de la red, optimizando la gestión y operación del sistema para el 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 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 sensores para invernaderos, en donde cada sensor es un nodo de la red, esta arquitectura posibilita la transmisión eficiente de los datos entre los nodos hasta alcanzar un nodo central. Esto mejora el consumo energético, reduce la infraestructura necesaria y facilita la escalabilidad del sistema.

La figura 1 ilustra el principio de comunicación en una red Bluetooth Mesh a implementar en este proyecto, donde los nodos, que en este caso corresponden a los sensores en el invernadero, colaboran para transmitir los datos recopilados 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 sensor. 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 los datos recopilados por la red. Como resultado, el nodo central es el único que requiere una conexión estable a Wi-Fi, permitiendo el acceso a la interfaz de monitoreo desde cualquier dispositivo conectado a la misma red, como una computadora o un teléfono inteligente.

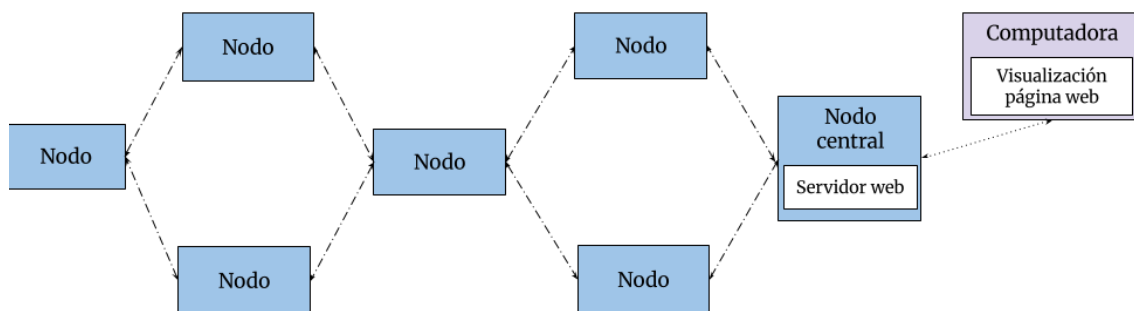


Figura 1. Diagrama de red Bluetooth Mesh.

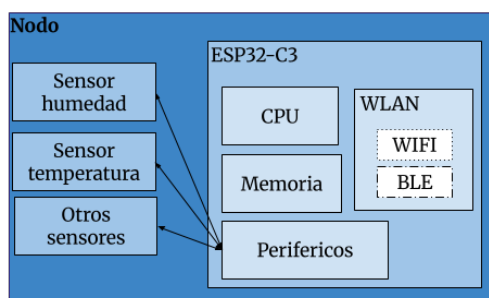


Figura 2. Diagrama en bloques de cada nodo en la red Bluetooth Mesh.

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. Se desarrollará una biblioteca modular, que facilitará la integración de la red Mesh en los sensores de Wentux Tecnoagro, y un servidor web local, funcionalidad que no está contemplada en la solución estándar de Espressif. Este servidor permitirá la gestión de la red de sensores en tiempo real a través de una interfaz web intuitiva, optimizando la experiencia del usuario y brindando un mayor control sobre el sistema.

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. Además, es fundamental optimizar el consumo energético de los dispositivos, ya que los sensores deben operar de manera eficiente sin afectar su autonomía. 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.

## 2. Identificación y análisis de los interesados

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

- **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 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 la interconexión de los sensores de Wentux Tecnoagro en invernaderos. Esta solución eliminará la dependencia de la cobertura Wi-Fi, ampliará el alcance de transmisión de datos y brindará mayor flexibilidad en la instalación de los sensores. Adicionalmente, se desarrollará un servidor web local en el nodo central, permitiendo la configuración y supervisión de la red, lo que optimizará la eficiencia y facilitará su uso para el cliente final.

## 4. Alcance del proyecto

Este proyecto incluye:

- Implementación de una red de sensores 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 de sensores.
- Simulación de datos de sensores en los microcontroladores ESP32-C3 adquiridos para el proyecto, en lugar de utilizar los sensores reales de la empresa.
- Optimización del consumo energético de los nodos sensores para mejorar su autonomía dentro de la red.
- Diseño de una arquitectura adaptable, asegurando que el firmware desarrollado pueda ser integrado posteriormente en los sensores 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.
- 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 sensores reales de la empresa: se trabajará con microcontroladores ESP32-C3 adquiridos para el proyecto, simulando los datos de medición en lugar de utilizar los sensores comerciales de Wentux Tecnoagro.
- Desarrollo de hardware personalizado: el proyecto no incluye el diseño o modificación del hardware de los sensores actuales de la empresa, sino únicamente el desarrollo del software.
- Integración final con los dispositivos comerciales: la implementación en los sensores 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 sensores 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.
- Pruebas de alcance, latencia y consumo energético en diferentes escenarios de implementación.
- Evaluación del rendimiento en un entorno de invernadero real.

## 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 22 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 sensores 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 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

Los requerimientos deben enumerarse y de ser posible estar agrupados por afinidad, por ejemplo:

1. Requerimientos funcionales:

- 1.1. El sistema debe...

- 1.2. Tal componente debe...

- 1.3. El usuario debe poder...

2. Requerimientos de documentación:

- 2.1. Requerimiento 1.

- 2.2. Requerimiento 2 (prioridad menor)

3. Requerimiento de testing...
4. Requerimientos de la interfaz...
5. Requerimientos interoperabilidad...
6. etc...

Leyendo los requerimientos se debe poder interpretar cómo será el proyecto y su funcionalidad.

Indicar claramente cuál es la prioridad entre los distintos requerimientos y si hay requerimientos opcionales.

**!!!No olvidarse de que los requerimientos incluyen a las regulaciones y normas vigentes!!!**

Y al escribirlos seguir las siguientes reglas:

- Ser breve y conciso (nadie lee cosas largas).
- Ser específico: no dejar lugar a confusiones.
- Expresar los requerimientos en términos que sean cuantificables y medibles.

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

Descripción: en esta sección se deben incluir las historias de usuarios y su ponderación (*history points*). Recordar que las historias de usuarios son descripciones cortas y simples de una característica contada desde la perspectiva de la persona que desea la nueva capacidad, generalmente un usuario o cliente del sistema. La ponderación es un número entero que representa el tamaño de la historia comparada con otras historias de similar tipo.

Se debe indicar explícitamente el criterio para calcular los *story points* de cada historia.

El formato propuesto es:

1. “Como [rol] quiero [tal cosa] para [tal otra cosa].”  
*Story points*: 8 (complejidad: 3, dificultad: 2, incertidumbre: 3)

## 8. Entregables principales del proyecto

Los entregables del proyecto son (ejemplo):

- Manual de usuario.
- Diagrama de circuitos esquemáticos.
- Código fuente del firmware.

- Diagrama de instalación.
- Memoria del trabajo final.
- etc...

## 9. Desglose del trabajo en tareas

El WBS debe tener relación directa o indirecta con los requerimientos. Son todas las actividades que se harán en el proyecto para dar cumplimiento a los requerimientos. Se recomienda mostrar el WBS mediante una lista indexada:

### 1. Grupo de tareas 1 (suma h)

- 1.1. Tarea 1 (tantas h)
- 1.2. Tarea 2 (tantas h)
- 1.3. Tarea 3 (tantas h)

### 2. Grupo de tareas 2 (suma h)

- 2.1. Tarea 1 (tantas h)
- 2.2. Tarea 2 (tantas h)
- 2.3. Tarea 3 (tantas h)

### 3. Grupo de tareas 3 (suma h)

- 3.1. Tarea 1 (tantas h)
- 3.2. Tarea 2 (tantas h)
- 3.3. Tarea 3 (tantas h)
- 3.4. Tarea 4 (tantas h)
- 3.5. Tarea 5 (tantas h)

Cantidad total de horas: tantas.

**¡Importante!:** la unidad de horas es h y va separada por espacio del número. Es incorrecto escribir “23hs”.

**Se recomienda que no haya ninguna tarea que lleve más de 40 h.** De ser así se recomienda dividirla en tareas de menor duración.

## 10. Diagrama de Activity On Node

Armar el AoN a partir del WBS definido en la etapa anterior.

Una herramienta simple para desarrollar los diagramas es el Draw.io (<https://app.diagrams.net/>). Draw.io

Indicar claramente en qué unidades están expresados los tiempos. De ser necesario indicar los caminos semi críticos y analizar sus tiempos mediante un cuadro. Es recomendable usar colores y un cuadro indicativo describiendo qué representa cada color.



Figura 3. Diagrama de *Activity on Node*.

## 11. Diagrama de Gantt

Existen muchos programas y recursos *online* para hacer diagramas de Gantt, entre los cuales destacamos:

- Planner
- GanttProject
- Trello + *plugins*. En el siguiente link hay un tutorial oficial:  
<https://blog.trello.com/es/diagrama-de-gantt-de-un-proyecto>
- Creately, herramienta online colaborativa.  
<https://creately.com/diagram/example/ieb3p3ml/LaTeX>
- Se puede hacer en latex con el paquete *pgfgantt*  
<http://ctan.dcc.uchile.cl/graphics/pgf/contrib/pgfgantt/pgfgantt.pdf>

Pegar acá una captura de pantalla del diagrama de Gantt, cuidando que la letra sea suficientemente grande como para ser legible. Si el diagrama queda demasiado ancho, se puede pegar primero la “tabla” del Gantt y luego pegar la parte del diagrama de barras del diagrama de Gantt.

Configurar el software para que en la parte de la tabla muestre los códigos del EDT (WBS).  
Configurar el software para que al lado de cada barra muestre el nombre de cada tarea.  
Revisar que la fecha de finalización coincida con lo indicado en el Acta Constitutiva.

En la figura 4, se muestra un ejemplo de diagrama de gantt realizado con el paquete de *pgfgantt*. En la plantilla pueden ver el código que lo genera y usarlo de base para construir el propio.

Las fechas pueden ser calculadas utilizando alguna de las herramientas antes citadas. Sin embargo, el siguiente ejemplo fue elaborado utilizando [esta hoja de cálculo](#).

Es importante destacar que el ancho del diagrama estará dado por la longitud del texto utilizado para las tareas (Ejemplo: tarea 1, tarea 2, etcétera) y el valor *x unit*. Para mejorar la apariencia del diagrama, es necesario ajustar este valor y, quizás, acortar los nombres de las tareas.

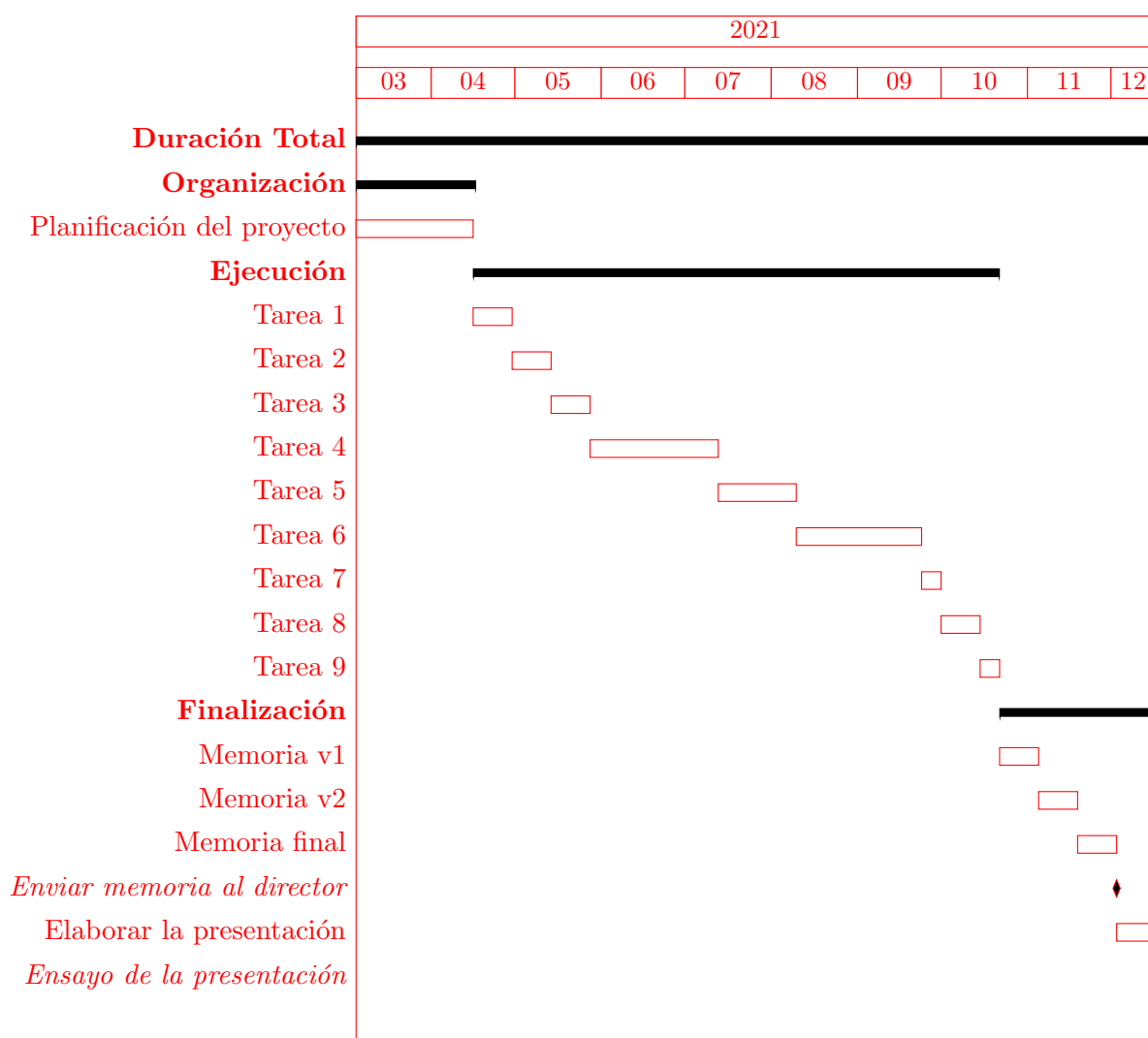


Figura 4. Diagrama de gantt de ejemplo

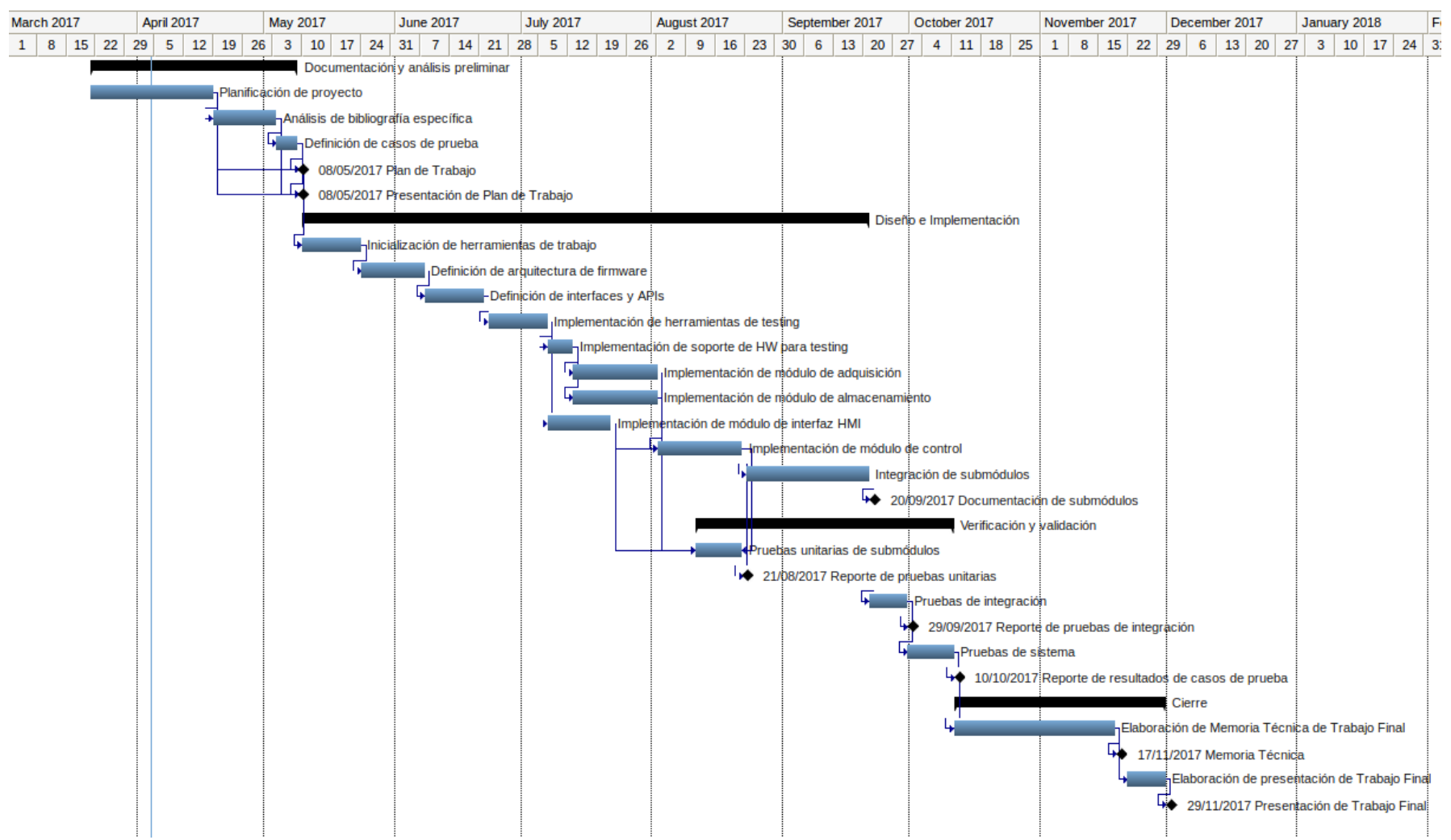


Figura 5. Ejemplo de diagrama de Gantt (apaisado).

## 12. Presupuesto detallado del proyecto

Si el proyecto es complejo entonces separarlo en partes:

- Un total global, indicando el subtotal acumulado por cada una de las áreas.
- El desglose detallado del subtotal de cada una de las áreas.

**IMPORTANTE:** No olvidarse de considerar los **COSTOS INDIRECTOS**.

Incluir la aclaración de si se emplea como moneda el peso argentino (ARS) o si se usa moneda extranjera (USD, EUR, etc). Si es en moneda extranjera se debe indicar la tasa de conversión respecto a la moneda local en una fecha dada.

COSTOS DIRECTOS			
Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
SUBTOTAL			
COSTOS INDIRECTOS			
Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
SUBTOTAL			
TOTAL			

## 13. Gestión de riesgos

a) Identificación de los riesgos (al menos cinco) y estimación de sus consecuencias:

Riesgo 1: detallar el riesgo (riesgo es algo que si ocurre altera los planes previstos de forma negativa)

- Severidad (S): mientras más severo, más alto es el número (usar números del 1 al 10). Justificar el motivo por el cual se asigna determinado número de severidad (S).
- Probabilidad de ocurrencia (O): mientras más probable, más alto es el número (usar del 1 al 10). Justificar el motivo por el cual se asigna determinado número de (O).

Riesgo 2:

- Severidad (S): X.  
Justificación...

- Ocurriencia (O): Y.  
Justificación...

Riesgo 3:

- Severidad (S): X.  
Justificación...
- Ocurriencia (O): Y.  
Justificación...

b) Tabla de gestión de riesgos: (El RPN se calcula como  $RPN=S \times O$ )

Riesgo	S	O	RPN	S*	O*	RPN*

Criterio adoptado:

Se tomarán medidas de mitigación en los riesgos cuyos números de RPN sean mayores a...

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 1: plan de mitigación (si por el RPN fuera necesario elaborar un plan de mitigación).  
Nueva asignación de S y O, con su respectiva justificación:

- Severidad (S\*): mientras más severo, más alto es el número (usar números del 1 al 10). Justificar el motivo por el cual se asigna determinado número de severidad (S).
- Probabilidad de ocurrencia (O\*): mientras más probable, más alto es el número (usar del 1 al 10). Justificar el motivo por el cual se asigna determinado número de (O).

Riesgo 2: plan de mitigación (si por el RPN fuera necesario elaborar un plan de mitigación).

Riesgo 3: plan de mitigación (si por el RPN fuera necesario elaborar un plan de mitigación).

## 14. Gestión de la calidad

Elija al menos diez requerimientos que a su criterio sean los más importantes/críticos/que aportan más valor y para cada uno de ellos indique las acciones de verificación y validación que permitan asegurar su cumplimiento.

- Req #1: copiar acá el requerimiento con su correspondiente número.



- Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente. Detallar.
- Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido. Detallar.

Tener en cuenta que en este contexto se pueden mencionar simulaciones, cálculos, revisión de hojas de datos, consulta con expertos, mediciones, etc.

Las acciones de verificación suelen considerar al entregable como “caja blanca”, es decir se conoce en profundidad su funcionamiento interno.

En cambio, las acciones de validación suelen considerar al entregable como “caja negra”, es decir, que no se conocen los detalles de su funcionamiento interno.

## 15. Procesos de cierre

Establecer las pautas de trabajo para realizar una reunión final de evaluación del proyecto, tal que contemple las siguientes actividades:

- Pautas de trabajo que se seguirán para analizar si se respetó el Plan de Proyecto original:
  - Indicar quién se ocupará de hacer esto y cuál será el procedimiento a aplicar.
- Identificación de las técnicas y procedimientos útiles e inútiles que se emplearon, los problemas que surgieron y cómo se solucionaron:
  - Indicar quién se ocupará de hacer esto y cuál será el procedimiento para dejar registro.
- Indicar quién organizará el acto de agradecimiento a todos los interesados, y en especial al equipo de trabajo y colaboradores:
  - Indicar esto y quién financiará los gastos correspondientes.