



Medidor de material particulado fino

Autor:

Mg. Luis Alberto Gómez Parada

Director:

Ing. Juan Manuel Cruz (FIUBA)

Codirector:

John Doe (FIUBA)

*Esta planificación fue realizada en el curso de Gestión de proyectos
entre el 22 de agosto de 2023 y el 12 de octubre de 2023.*

Índice

1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar	5
1.1 Destalles del equipo, la tecnología del sensor y muestreo estadístico	6
2. Identificación y análisis de los interesados	7
3. Propósito del proyecto	7
4. Alcance del proyecto	7
5. Supuestos del proyecto.	9
5.1 Otros Supuestos	9
6. Requerimientos	10
6.1 Requerimientos funcionales	10
6.2 Requerimientos de hardware	11
6.3 Requerimientos de software	11
6.4 Requerimientos de interfaz de usuario	11
6.5 Requerimientos de alimentación	12
6.6 Requerimientos de gabinete	12
6.7 Requerimientos de evaluación	12
6.8 Requerimientos de documentación	12
7. Historias de usuarios (<i>Product backlog</i>).	12
7.1 Historia de usuario 1: monitoreo de concentraciones	13
7.2 Historia de administrador 1: registro funcionamiento de sensores	13
7.3 Historia de usuario 2: alarmas por concentración	13
7.4 Historia de administrador 2: precisión de la concentración	14
8. Entregables principales del proyecto	14
9. Desglose del trabajo en tareas	14
10. Diagrama de Activity On Node.	16
11. Diagrama de Gantt	17
12. Presupuesto detallado del proyecto	19
13. Gestión de riesgos	20
13.1 Identificación de los riesgos y estimación de sus consecuencias:	20
13.2 Plan de mitigación de los riesgos	22
13.3 Gestión de riesgos	24
14. Gestión de la calidad	24
15. Procesos de cierre	26
15.1 Pautas de trabajo para analizar el respeto al Plan de Proyecto original	27
15.2 Identificación de técnicas y procedimientos y solución de problemas	27
15.3 Acto de agradecimiento	27
15.4 Cronograma de cierre	27

Registros de cambios

Revisión	Detalles de los cambios realizados	Fecha
0	Creación del documento	22 de agosto de 2023
1	Se completa hasta el punto 5: <ul style="list-style-type: none">- Acta de constitución del proyecto- Descripción del proyecto a realizar- Identificación y análisis de los interesados- Propósito del proyecto- Alcance del proyecto- Supuestos del proyecto	07 de septiembre de 2023
2	Se completa hasta el punto 9 inclusive: <ul style="list-style-type: none">- Requerimientos- Historias de usuario- Entregables principales- Desglose de trabajo	14 de septiembre 2023
3	Se completa hasta el punto 12 inclusive: <ul style="list-style-type: none">- Diagrama de Activity On Node- Diagrama de Gantt- Presupuesto detallado del proyecto	20 de septiembre 2023

Acta de constitución del proyecto

Buenos Aires, 22 de agosto de 2023

Por medio de la presente se acuerda con el Mg. Luis Alberto Gómez Parada que su Trabajo Final de la Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos se titulará “Medidor de material particulado fino”, consistirá esencialmente en el desarrollo de un instrumento capaz de medir, almacenar y transmitir las concentraciones atmosféricas de material particulado fino MP2,5, que tendrá un presupuesto preliminar estimado de 730 horas de trabajo y 10.228 USD, con fecha de inicio 22 de agosto de 2023 y fecha de presentación pública 15 de Junio de 2024.

Se adjunta a esta acta la planificación inicial.

Dr. Ing. Ariel Lutenberg
Director posgrado FIUBA

Dr. Zoë Fleming
Centro del Clima y la Resiliencia CR2, Universidad de Chile

Ing. Juan Manuel Cruz
Director del Trabajo Final

1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar

En el contexto actual de gestión ambiental de las grandes ciudades, los instrumentos para medir el material particulado fino (MP2,5) se han convertido en herramientas esenciales. La creciente contaminación atmosférica se cuenta entre las principales causas de muertes prematuras en el mundo, de manera directa e indirecta. Sin embargo, lograr una medición precisa del MP2,5 representa un desafío significativo debido a los elevados costos y los complejos requisitos técnicos involucrados. En muchas áreas urbanas, especialmente en las menos desarrolladas, persiste la incertidumbre acerca de los niveles de exposición al MP2,5 a los que está sometida la población. En respuesta a este desafío, la presente propuesta de proyecto busca diseñar un instrumento para la medición del MP2,5 que, utilizando sensores de bajo costo, aspire a acercarse a los estándares de los equipos analíticos de alto rendimiento que se emplean actualmente, pero a un precio notablemente reducido. Este proyecto está íntimamente ligado a la trayectoria y formación profesional del autor del presente trabajo, como químico atmosférico especializado en la calidad del aire urbano.

Con base en lo anteriormente expuesto, el objetivo de este proyecto es desarrollar un instrumento especializado en la medición del material particulado fino atmosférico urbano (MP2,5). Este instrumento no solo será capaz de almacenar y transmitir los datos recopilados, sino que también se espera superar la precisión que ofrecen los sensores de bajo costo actualmente en el mercado. Como innovación, se propone emplear un conjunto de tres sensores de MP2,5 en un mismo instrumento, coordinados por un microprocesador. Este último será encargado de realizar los cálculos, coordinar el almacenamiento y transmisión de los datos (ver figura 1). Al utilizar tres sensores ópticos de MP2,5 operando en simultáneo, se prevé la obtención de mediciones replicadas, lo que permitirá ejecutar análisis estadísticos en tiempo real. Esto facilitará la obtención de promedios y la validación o descarte de datos atípicos. Se hipotetiza que esta estrategia mejorará tanto la precisión como la exactitud de las mediciones y, además, añadirá robustez al sistema. Es decir, si un sensor llegara a fallar, el mal funcionamiento podría detectarse rápidamente, mitigando el riesgo de una interrupción completa del sistema.

Dada la creciente preocupación pública sobre la contaminación atmosférica urbana, tanto desde la perspectiva ambiental como de salud, es probable que autoridades a nivel municipal y gubernamental encuentren este tipo de sistemas de monitoreo altamente relevantes. Estos instrumentos, siendo más asequibles que las tecnologías de monitoreo tradicionales, facilitarían una mayor cobertura en áreas que actualmente carecen de mediciones. Este incremento en la cobertura permitiría evaluar la exposición humana al MP2,5 y podría aportar datos cruciales para monitorear la efectividad de políticas públicas, como los planes de descontaminación atmosférica implementados en diversas ciudades. Adicionalmente, estos sistemas pueden ayudar, como parte del fundamento, a la puesta en marcha de medidas preventivas y correctivas en relación con las emisiones y las concentraciones de MP2,5.

Dentro del contexto de las soluciones para el monitoreo ambiental, estos dispositivos podrían ser una alternativa coste-efectiva para la gestión de la calidad del aire en entornos urbanos. Su asequibilidad económica, en comparación con los sistemas de monitoreo tradicionales, unida a una mayor precisión y robustez, podría ser valorada positivamente por entidades públicas. Se estima que su implementación facilitaría la gestión de la calidad del aire, sin generar una carga financiera excesiva en los recursos públicos.

1.1. Destalles del equipo, la tecnología del sensor y muestreo estadístico

En la figura 1, se presenta el diagrama en bloques del instrumento. En él, se puede apreciar un microcontrolador central responsable de gestionar: tres sensores de MP2,5, encargados de medir el contaminante; un sistema de almacenamiento de datos local y un sistema encargado de la transmisión de los registros hacia un servidor remoto. Además, incluye un reloj de tiempo real (RTC) que registra el momento de cada medición y un sistema de alimentación, compatible con la red eléctrica.

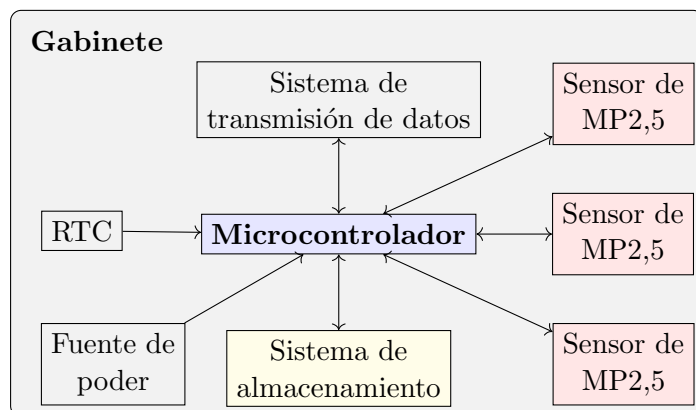


Figura 1. Esquema de bloques del instrumento.

El funcionamiento de los sensores escogidos para esta investigación se fundamenta en el fenómeno de la difracción de luz láser. Concretamente, cuando una partícula en suspensión intercepta un haz láser, se produce una dispersión angular de la luz, la cual es proporcional al tamaño de la partícula involucrada. El patrón de dispersión óptica resultante se captura mediante un detector. Este enfoque presenta algunas mejoras sobre los métodos gravimétricos convencionales, al ofrecer ventajas como la reducción de costos y un incremento notable en la velocidad de muestreo. Sin embargo, es imperativo reconocer ciertas limitaciones inherentes a esta tecnología, tales como una menor precisión y exactitud en comparación con técnicas estándar. Cabe señalar que los instrumentos ópticos todavía no han obtenido la certificación de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) como métodos analíticos estándar para la cuantificación de partículas finas en el aire.

Para evaluar cómo el número de muestras (n) afecta la precisión y la exactitud de un sensor de material particulado fino, se deben considerar las métricas como media, varianza y desviación estándar de la muestra. De acuerdo a esto, la precisión se relaciona con la dispersión de las mediciones y se puede estimar mediante la desviación estándar muestral (s). A medida que n aumenta, el error estándar de la media (SEM) disminuye, lo cual se puede expresar como:

$$\text{SEM} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Por lo tanto, un incremento en n resultará en una disminución de SEM, mejorando así la precisión del instrumento.

Para evaluar la exactitud, podemos usar el valor medio muestral (\bar{x}) y compararlo con un valor de referencia conocido (μ). La diferencia absoluta entre \bar{x} y μ proporciona una medida de la exactitud del instrumento. Dado que \bar{x} es un estimador insesgado de μ , su exactitud mejora con un mayor número de muestras, acercándose más al valor verdadero μ debido al Teorema del Límite Central.

2. Identificación y análisis de los interesados

Cuadro 1. Identificación de los interesados.

Rol	Nombre y Apellido	Organización	Puesto
Cliente	Dr. Zoë Fleming	Centro del Clima y la Resiliencia CR2, Universidad de Chile	Investigadora
Responsable	Mg. Luis Alberto Gómez Parada	FIUBA	Alumno
Orientador	Ing. Juan Manuel Cruz	FIUBA	Director Trabajo final
Usuario final	Comunidades afectadas	-	-

Cliente: doctora en Química Ambiental especializada en monitoreo de calidad del aire. Actualmente lidera proyectos de relevancia nacional en Chile, como Fodequip Mayor y Fodecyt, enfocados en la implementación y evaluación de sensores de bajo costo para el monitoreo ambiental. Se espera su aporte en cuanto a definir características y requerimientos necesarios para un instrumental orientado a estimar las concentraciones de MP2,5.

Orientador: ingeniero electrónico con amplia experiencia tanto en el ámbito profesional como en la docencia. Su contribución será fundamental en el diseño de la placa electrónica que soportará el instrumental y en la optimización de la programación del microcontrolador.

Usuario Final: el usuario final está constituido principalmente por la población urbana expuesta a episodios de contaminación atmosférica relacionados con MP2,5. Estos episodios son especialmente prevalentes durante ciertos días de invierno y pueden representar un riesgo significativo para la salud de grupos vulnerables, como niños, ancianos y personas con enfermedades preexistentes.

3. Propósito del proyecto

El propósito de este proyecto es desarrollar un equipo de medición de material particulado fino (MP2,5) que brinde una mayor precisión y exactitud que los sensores ópticos de bajo costo, mediante técnicas estadísticas de muestreo. El dispositivo también contará con características para almacenar y transmitir datos de forma remota. Se pretende elaborar una solución económica y fiable que pueda integrarse en las redes de control de calidad del aire, comúnmente gestionadas por autoridades ambientales o gobiernos locales. Con esto se espera contribuir a la mejora de la salud pública en entornos urbanos.

4. Alcance del proyecto

En este proyecto se incluyen las siguientes actividades:

a) Diseño y desarrollo del hardware

- Diseño y dimensionamiento del hardware acorde a los niveles de consumo eléctrico, necesidad de cómputo, almacenamiento y transmisión de datos.

- Selección y adquisición los sensores ópticos de MP2,5, y el microcontrolador central, adecuado a los requerimientos de cómputo y administración del sistema.
- Diseño del sistema de almacenamiento de datos y del mecanismo de transmisión de información. Cada dato deberá contar con hora y fecha. Esta información debe ser proporcionada a partir de la implementación del RTC.
- Dimensionamiento del sistema de alimentación eléctrica acorde a los requerimientos del hardware .

b) Desarrollo de software

- Programación del microprocesador para realizar cálculos y transmitir resultados.
- Desarrollo de algoritmos para efectuar estadísticas en tiempo real.
- Generación de algoritmo para el chequeo del funcionamiento de los sensores e implementación de códigos de error en caso de que alguno falle.

c) Pruebas de calibración

- Calibración inicial de los sensores con estaciones de monitoreo de referencia o instrumentos de referencia disponibles.

d) Recolección de datos

- Periodo de recolección de datos de MP2,5 para evaluar el funcionamiento y rendimiento del dispositivo.

e) Análisis de datos

- Evaluación de precisión y exactitud del dispositivo en comparación con los métodos ópticos tradicionales y los de referencia.

f) Documentación

- Generación de informes técnicos que validen el rendimiento y robustez del dispositivo.

El presente proyecto no incluye las siguientes actividades:

a) Despliegue a gran escala

- Este proyecto no incluye la fabricación en masa ni la distribución a gran escala del dispositivo.

b) Mantenimiento prolongado

- El mantenimiento del dispositivo más allá del periodo de pruebas no está incluido.

c) Formación o capacitación

- No se incluye la formación o capacitación para usuarios finales o para entidades gubernamentales.

d) Adopción por parte de las autoridades

- Aunque se espera que las autoridades consideren esta tecnología, su adopción oficial no está garantizada dentro del alcance de este proyecto.

e) Investigaciones futuras

- No se incluye el seguimiento a largo plazo de la efectividad del dispositivo en políticas públicas o investigaciones futuras.

5. Supuestos del proyecto

Mediante la implementación simultánea de tres sensores ópticos dedicados a la cuantificación de partículas finas atmosféricas (MP2,5), se espera generar conjunto de datos replicados que permitan realizar análisis estadísticos en tiempo real. Este diseño metodológico no solamente facilita la obtención de valores promedio más confiables, sino que también posibilita un proceso de validación o exclusión de observaciones anómalas que se desvíen significativamente de la media poblacional. Desde una perspectiva estadística, se espera que un mayor volumen muestral contribuirá al incremento tanto de la precisión como de la exactitud en las mediciones. Concretamente, se espera lograr una reducción en el Error Estándar de la Media (ESM) y un acercamiento más preciso al valor verdadero de la media poblacional (μ), conforme a los principios del Teorema del Límite Central.

En términos de robustez del sistema, la presencia de múltiples sensores se estima que proporcione una capa adicional de confiabilidad. En caso de mal funcionamiento de algún sensor, el sistema de microcontrolador estará diseñado para detectar el problema, lo que permite la implementación de soluciones preventivas antes de una posible interrupción completa del equipo.

Finalmente, aunque estos sensores ópticos no están actualmente reconocidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) como una técnica analítica estándar para la medición de MP2,5, su adopción por parte de autoridades y entidades gubernamentales ayudaría como un complemento eficaz y económico a las redes de monitoreo existentes. Esta incorporación no solo fortalecería las estrategias de monitoreo actualmente en uso, sino que también podría servir como un primer paso para establecer estaciones de monitoreo en áreas que actualmente carecen de ellas.

5.1. Otros Supuestos

- **Calibración con estaciones de referencia:** se espera que los sensores puedan calibrarse utilizando estaciones de referencia EPA certificadas por instituciones con competencia.
- **Precisión de datos históricos:** se asume que los datos obtenidos durante los procesos de calibración con sistemas gravimétricos o estaciones de monitoreo existentes son precisos y representativos. Además, se espera que estos datos sean comparables a pesar de las diferencias en las frecuencias de muestreo entre las tecnologías.
- **Mantenimiento de la calibración:** una vez calibrados, se espera que los sensores mantengan su calibración durante todo el periodo de recolección de datos, sin requerir ajustes frecuentes para mantener su precisión y exactitud.
- **Estabilidad de condiciones ambientales:** se asume que las condiciones ambientales, como temperatura y humedad, no afectarán significativamente la precisión y la capacidad de medición de los sensores durante periodos prolongados.
- **Ausencia de interferencias:** se presupone que otras partículas o sustancias en el ambiente, como los aerosoles de agua, no interferirán significativamente en la medición del material particulado de interés.
- **Energía y conectividad constantes:** se espera contar con un suministro constante y fiable de energía y conectividad de datos durante la ejecución del proyecto.
- **Aceptación por parte de los interesados:** se anticipa que autoridades ambientales y otros grupos de interés estarán abiertos a considerar y, posiblemente, adoptar esta tecnología si se demuestra su eficacia.

- **Escalabilidad del sistema:** se prevé que el sistema podrá funcionar en exteriores y escalarse para cubrir áreas geográficas más grandes o para incorporar tipos de mediciones ambientales adicionales sin cambios significativos en su arquitectura.
- **Futura conformidad regulatoria:** aunque los sensores no están actualmente estandarizados por la EPA, se espera que futuras regulaciones puedan incluir este tipo de tecnologías. Es relevante señalar que la Comunidad Económica Europea está evaluando actualmente esta posibilidad.
- **Participación comunitaria:** si los datos recolectados se utilizaran para la toma de decisiones a nivel comunitario, se espera un nivel adecuado de compromiso y participación por parte de la comunidad local.
- **Costos operativos controlables:** se estima que los costos operativos y de mantenimiento del sistema se mantendrán dentro de un rango predecible y manejable durante su vida útil.

6. Requerimientos

En esta sección, se enumeran los requisitos del sistema de acuerdo a la experiencia del equipo ejecutor, características de la competencia y conversaciones con potenciales clientes. Los requisitos se clasifican en distintas categorías: requerimientos funcionales, requerimientos de hardware, requerimientos de software, requerimientos de interfaz de usuario, requerimientos de alimentación, requerimientos de evaluación y requerimientos de documentación. A cada requisito se le asigna una etiqueta de prioridad, como se muestra a continuación:

P1 : obligatorio, este requisito es crucial y debe implementarse tal como se describe.

P2 : importante, es necesario implementar este requisito, aunque se pueden considerar alternativas razonables.

P3 : recomendado, su implementación es deseable, pero no esencial, y su omisión debe ser justificada.

P4 : opcional, este es un requisito que puede ser implementado a discreción del equipo de desarrollo.

6.1. Requerimientos funcionales

- a) El instrumento debe incorporar al menos tres sensores dedicados a la medición de MP2,5. Prioridad: [P1].
- b) El dispositivo debe almacenar localmente los datos de MP2,5, ofreciendo la opción de consultar y vaciar la memoria cuando sea necesario. Prioridad: [P1]
- c) El sistema debe calcular automáticamente los parámetros estadísticos relevantes, como el promedio, la desviación estándar, valores mínimos y máximos, y detectar valores fuera de rango. Prioridad: [P2]
- d) La comunicación entre el nodo sensor y el servidor debe ser flexible, admitiendo conexiones cableadas o inalámbricas mediante protocolos como Wi-Fi (IEEE 802.11n) o LoRa. Prioridad: [P3]

- e) Cada instrumento debe ser identificable de manera única dentro del sistema, permitiendo garantizar una correcta asociación de los datos recolectados con el sensor. Prioridad: [P2]
- f) Todas las mediciones deben ser acompañadas de una stampa temporal proporcionada por un Reloj de Tiempo Real (RTC). Prioridad: [P1]
- g) El instrumento debe ofrecer funcionalidades de monitoreo remoto que permitan verificar su estado operativo, calibraciones y ajustes. Prioridad: [P4]
- h) El sistema debe ser capaz de generar y almacenar promedios temporales de las mediciones, tanto en intervalos de 60 minutos como en periodos de 24 horas. Prioridad: [P2]

6.2. Requerimientos de hardware

- a) Se usará una placa de desarrollo compatible con algún sistema de comunicación inalámbrica como Wi-Fi o LoRa. Prioridad: [P3]
- b) La placa de desarrollo deberá permitir conectar múltiples sensores para medir MP2,5, administrando y calculado los datos provenientes tanto de los sensores como el RTC. Prioridad: [P1]
- c) La comunicación entre los sensores y la placa será mediante protocolo I2C u otro similar que esté de acuerdo a las características del sensor y la placa. Prioridad: [P1]
- d) Rango de operación mínima de concentración del MP2,5: 0 a 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y precisión de medición: $\pm 10\%$. Prioridad: [P2]

6.3. Requerimientos de software

- a) Las variables en la que se administrarán los datos de MP2,5 serán del tipo “constante punto flotante”. Por lo tanto, el almacenamiento y las operaciones como promedio, mínimo, máximo u otro, deben también ser compatibles con este tipo de variable. Prioridad: [P1]
- b) Debido a que se utilizará un servidor remoto para almacenar y visualizar los datos, deberán implementarse los protocolos de comunicación acordes con el sistema de transmisión seleccionado. Prioridad: [P4]
- c) El programa deberá generar alarmas de funcionamiento y de fallas, que permitan al operador identificar el estado de operación del instrumento. Prioridad: [P3]

6.4. Requerimientos de interfaz de usuario

- a) El usuario debe poder acceder a los datos históricos medidos por el instrumento, ya sea leyendo la memoria incorporada en el instrumento o revisando los registros en el servidor. Prioridad: [P2]
- b) Debe generar alertas y notificaciones basadas en umbrales predefinidos de concentración de MP2,5. Por ejemplo, niveles críticos de medición, valores fuera de rango de medición, etc. Prioridad: [P4]
- c) Deberá permitir poner el sistema en modo de ahorro de energía, cuando exista una desconexión del sistema eléctrico. Prioridad: [P3]

6.5. Requerimientos de alimentación

- a) El instrumento contará con una fuente de energía compatible con la red doméstica de 220 V. Prioridad: [P1]
- b) El servidor y otros componentes anexos al instrumento estarán alimentados principalmente con 220 V mediante tomacorriente. Prioridad: [P2]
- c) A modo de seguridad, el instrumento podrá funcionar en un modo de ahorro y por tiempo reducido, mediante una batería recargable de al menos 2000 mAh. Prioridad: [P4]

6.6. Requerimientos de gabinete

- a) Los componentes del instrumento deben estar dispuestos en un gabinete individual de material plástico, con acceso a alimentación eléctrica y la entrada y salida de aire hacia y desde el sensor de MP2,5. Prioridad: [P1]
- b) El gabinete debe ser estanco con clasificación acorde a IP65 o superior. Es decir, el gabinete debe ser adecuado para su uso en exteriores, con exposición al polvo y al agua en forma de lluvia. Prioridad: [P2]
- c) Facilidades para que el equipo pueda ser montado sobre postes, paredes o techos. [P3]

6.7. Requerimientos de evaluación

- a) Se debe probar el sistema en diversas condiciones atmosféricas, como humedad, temperatura, lluvias, etc. Prioridad:[P2]
- b) La conexión inalámbrica debe tener un área de cobertura mínima de 0,2 km. Prioridad:[P4]
- c) Se deben realizar pruebas de calibración con sensores certificados, antes de la implementación completa. Prioridad: [P1]

6.8. Requerimientos de documentación

- a) Elaborar un manual con las características principales del instrumento, mantenimiento y sus limitaciones. Prioridad:[P1]
- b) La generación de tablas con posibles fallas, códigos de error y soluciones. Prioridad:[P3]
- c) Esquemáticos con la distribución de componentes, conexiones y alimentación eléctrica del instrumento. Prioridad: [P1]

7. Historias de usuarios (*Product backlog*)

A continuación, se describen diversas historias de usuario junto con su correspondiente ponderación de esfuerzo relativo o *story points* (SP). Para la ponderación de la historia utilizamos la fórmula:

$$SP = \text{Fibo}(PtCarga + 1,5 \times PtCompl + 2 \times PtIncert)$$

donde:

- **SP**: Story points
- **Fibo**: Función que asigna el número de Fibonacci más cercano al argumento.
- **PtCarga**: Puntaje por carga de trabajo (1 a 5).
- **PtCompl**: Puntaje por complejidad (1 a 5).
- **PtIncert**: Puntaje por incertidumbre (1 a 5).

Notar que los puntajes son multiplicados por factores de ponderación antes de ser sumados.

7.1. Historia de usuario 1: monitoreo de concentraciones

“Como usuario quiero poder ver las concentraciones horarias y diarias de MP2,5 que registra el sensor.”

- $PtCarga = 2$
- $PtCompl = 1$
- $PtIncert = 1$

$$SP = 8$$

7.2. Historia de administrador 1: registro funcionamiento de sensores

“Como administrador quiero que los sensores puedan generar una señal de alerta cuando uno de ellos comienza a fallar o deja de registrar.”

- $PtCarga = 3$
- $PtCompl = 4$
- $PtIncert = 2$

$$SP = 13$$

7.3. Historia de usuario 2: alarmas por concentración

“Como usuario quiero que el instrumento me indique cuando existen valores críticos de concentración, que puedan ser riesgosos para la salud de la población.”

- $PtCarga = 4$

- $Pt_{Compl} = 3$

- $Pt_{Incert} = 3$

$SP = 21$

7.4. Historia de administrador 2: precisión de la concentración

“Como administrador quiero conocer la precisión de los valores que estoy registrando.”

- $Pt_{Carga} = 4$

- $Pt_{Compl} = 3$

- $Pt_{Incert} = 3$

$SP = 21$

8. Entregables principales del proyecto

Los entregables del proyecto con sus fechas propuestas son:

- Escrito con proyecto de tesis (13 octubre 2023)
- Prototipo funcional (6 de marzo del 2024)
- Manual de uso (8 de mayo del 2024)
- Informe final (22 de mayo del 2024)
- Diapositivas con presentación del instrumento (22 de mayo del 2024)

9. Desglose del trabajo en tareas

En el siguiente apartado, se llevará a cabo un desglose detallado de las actividades y tareas propuestas para la ejecución del proyecto de tesis de la Carrera. Cada actividad será identificada utilizando la numeración del work breakdown structure (WBS) para asegurar una organización y seguimiento efectivos. Adicionalmente, se especificarán tanto los tiempos parciales como los tiempos totales requeridos para cada tarea, expresados en formato de hora.

Esta estructuración tiene como objetivo proporcionar una visión completa y ordenada del proyecto, permitiendo una asignación y gestión eficiente de los recursos temporales. Como se muestra a continuación, se estima el trabajo total del proyecto de tesis en unas 740 horas cronológicas, divididas en ocho secciones.

1. Gestión del proyecto (100 hs)

1.1. Generación de requerimientos (20 hs)

1.2. Planificación del proyecto (40 hs)

- 1.3. Planificación de entregables (10 hs)
- 1.4. Revisión y ajustes de planificación (30 hs)
- 2. Diseño general (60 hs)**
 - 2.1. Ajuste al diseño conceptual (10 hs)
 - 2.2. Diagramas de flujo y arquitectura (20 hs)
 - 2.3. Revisión y pruebas de diseño (30 hs)
- 3. Construcción del hardware (120 hs)**
 - 3.1. Selección de componentes (20 hs)
 - 3.2. Diseño de circuitos (40 hs)
 - 3.3. Montaje y soldadura (30 hs)
 - 3.4. Pruebas iniciales (30 hs)
- 4. Diseño del firmware (110 hs)**
 - 4.1. Diseño de la arquitectura del software (20 hs)
 - 4.2. Implementación de la medición de MP2,5 (30 hs)
 - 4.3. Implementación de almacenamiento y comunicación (30 hs)
 - 4.4. Implementación de funciones auxiliares (30 hs)
- 5. Realización de pruebas (80 hs)**
 - 5.1. Diseño de casos de prueba (20 hs)
 - 5.2. Ejecución de pruebas (40 hs)
 - 5.3. Análisis de resultados (20 hs)
- 6. Ajustes finales instrumento (40 hs)**
 - 6.1. Depuración de errores (20 hs)
 - 6.2. Ajustes de performance (20 hs)
- 7. Escritura de memoria y manuales (180 hs)**
 - 7.1. Marco teórico (40 hs)
 - 7.2. Metodología (20 hs)
 - 7.3. Implementación (20 hs)
 - 7.4. Resultados y conclusiones (20 hs)
 - 7.5. Introducción, resumen y otros (30 hs)
 - 7.6. Manual de usuario (20 hs)
 - 7.7. Manual técnico (20 hs)
- 8. Entregas del trabajo final (40 hs)**
 - 8.1. Preparación de la presentación (20 hs)
 - 8.2. Entrega y presentación del trabajo final (20 hs)

Cantidad total de horas: 730 hs

10. Diagrama de Activity On Node

En la figura 2 se ilustra un diagrama de flujo que expone una estructura general para la ejecución del proyecto de tesis. Este proceso inicia con la gestión del proyecto y delinea una ruta cronológica que engloba el diseño, la construcción de hardware y la programación de firmware, aconteciendo estas de manera concurrente. Estas fases convergen en una etapa de pruebas, la cual es seguida por ajustes finales y la redacción de documentación académica. Finalmente, el proyecto concluye con la entrega del trabajo final. Es importante notar que cada una de las celdas del diagrama de flujo especifica el tiempo estimado para las actividades y el tiempo acumulado general, presentado en el formato: *“tiempo bloque actividades” / “tiempo total acumulado paralelizable / tiempo total acumulado sin paralizar”* en horas.

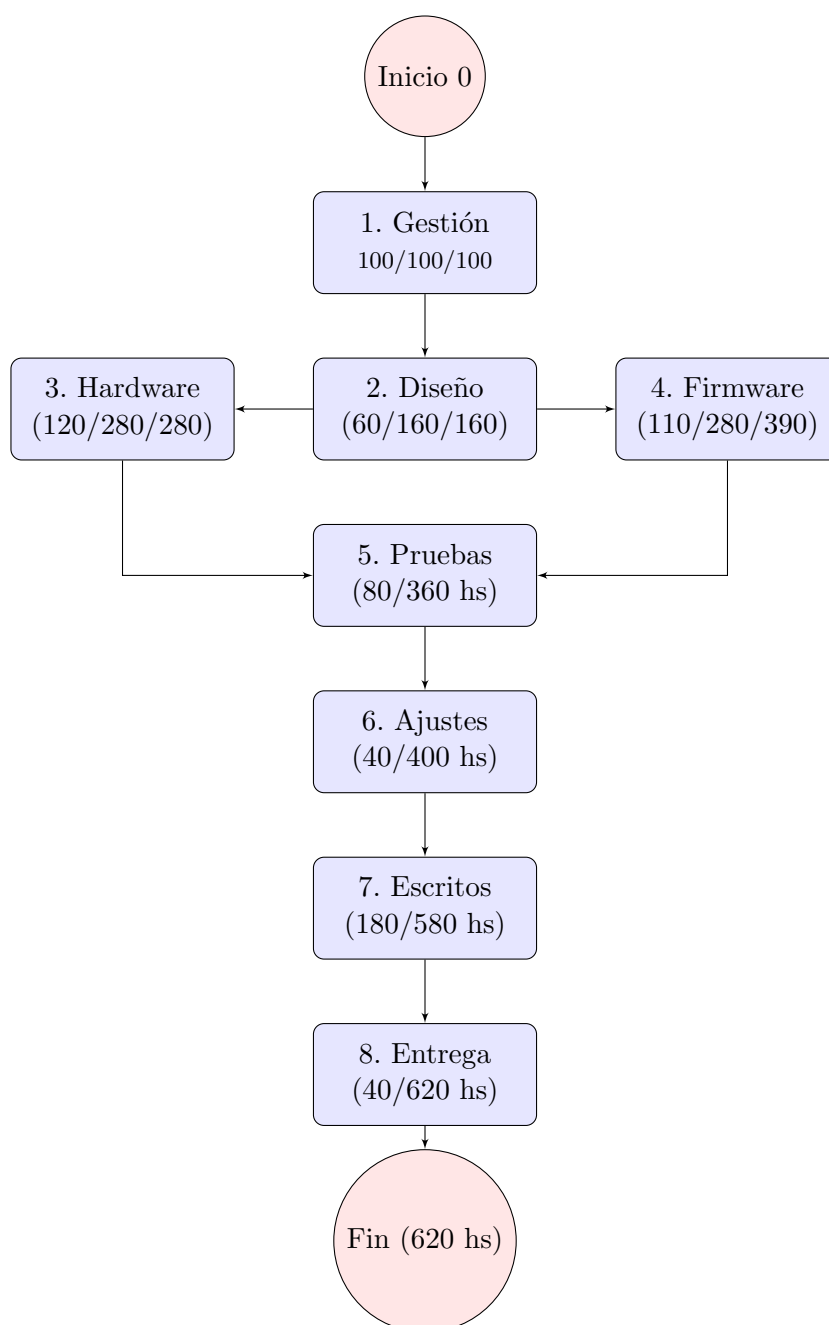
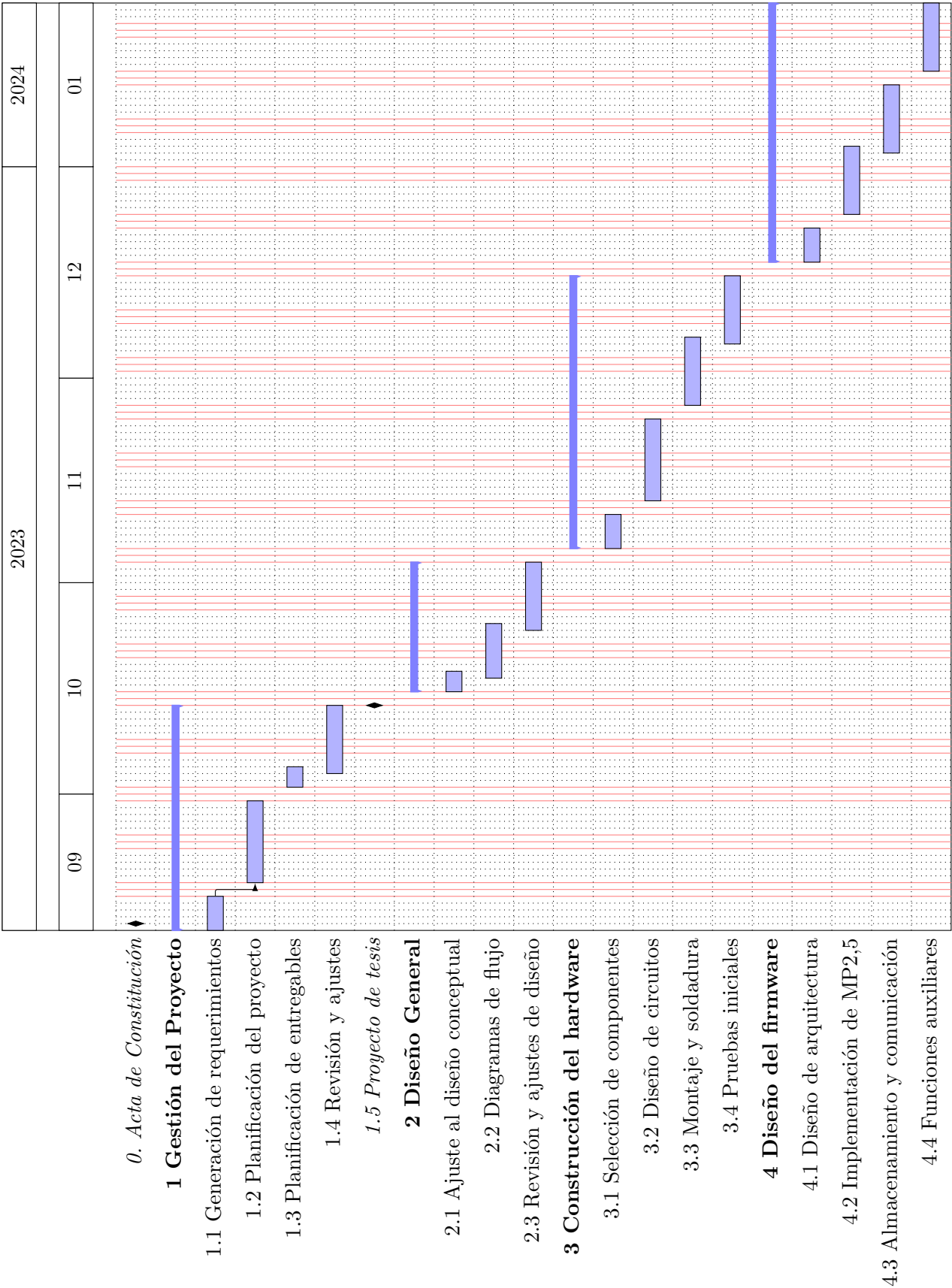
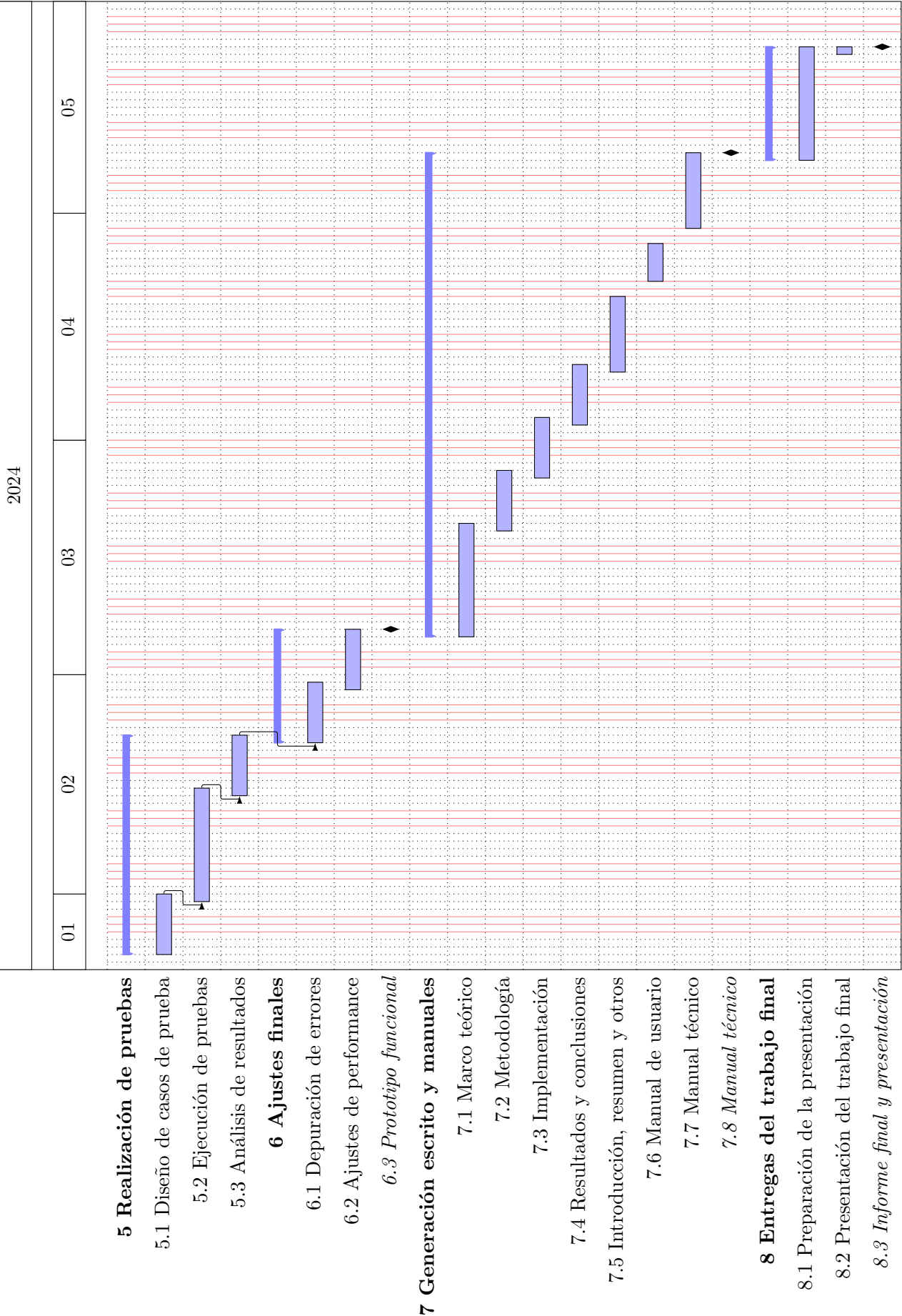


Figura 2. Diagrama de flujo para la gestión del proyecto

11. Diagrama de Gantt





12. Presupuesto detallado del proyecto

En el cuadro 2 se ofrece un desglose de los costos asociados a la presente tesis, todos presentados en dólares estadounidenses (USD). Los costos directos se dividen en categorías: mano de obra y honorarios (\$6.500 USD), materiales y suministros (\$888 USD), viajes y desplazamientos (\$480 USD), equipos y maquinaria (\$300 USD), y otros costos directos asociados a imprevistos (\$1.000 USD), sumando un subtotal de \$8,428 USD. Se incluyen también los costos indirectos, que comprenden arriendo y servicios públicos, con un subtotal de \$1.800 USD. El costo total estimado del proyecto es de \$10.228 USD.

Cuadro 2. Costos del proyecto de tesis.

COSTOS DIRECTOS			
Descripción	Cantidad	Valor unitario \$ USD	Valor total \$ USD
MANO DE OBRA, HONORARIOS			
Gestión del Proyecto	100	10	1.000
Diseño General	60	10	600
Construcción del hardware	120	10	1.200
Diseño del firmware	110	10	1.100
Realización de pruebas	120	10	1.200
Ajustes finales	40	10	400
Generación escrito de memoria y manuales	180	10	1800
Entregas del trabajo final	40	10	400
MATERIALES Y SUMINISTROS			
Placas de desarrollo	4	50	200
Reloj de tiempo real	4	2	8
Placa comunicación	4	10	40
Memoria flash	4	5	20
Fuente poder	4	5	20
Gabinete	4	10	40
Batería	4	10	40
Sensor MP2.5	16	30	480
Modem comunicación	1	100	100
VIAJES Y DESPLAZAMIENTOS			
Transporte terreno y reuniones	2	100	200
Alojamiento terreno	4	50	200
Alimentación	8	10	80
EQUIPOS Y MAQUINARIA			
Uso y compra de equipamiento	3	100	300
OTROS COSTOS DIRECTOS			
Imprevistos (~10 % del total del proyecto)	1	1.000	1.000
SUBTOTAL COSTOS DIRECTOS			8.428
COSTOS INDIRECTOS			
Descripción	Cantidad	Valor unitario \$ USD	Valor total \$ USD
Arriendo parcial espacio	8	100	800
Luz, agua, comunicación y calefacción	10	100	1.000
SUBTOTAL COSTOS INDIRECTOS			1.800
TOTAL			10.228

13. Gestión de riesgos

Los riesgos se clasificarán mediante una escala lineal que opera en un rango de 1 a 10, fundamentándose en las características distintivas que se describen a continuación:

Severidad (S): Se asignará un valor numérico más elevado a aquellos riesgos que presenten un mayor nivel de severidad.

Probabilidad de Ocurrencia (O): Los riesgos con una mayor probabilidad de ocurrencia recibirán un número más alto.

El número de prioridad de riesgo (RPN) se derivará mediante el producto de la Severidad (S) y la Probabilidad de Ocurrencia (O), siguiendo la fórmula:

$$S \times O = RPN$$

Como resultado de la fórmula anterior, el 0 simboliza la prioridad más baja y el 100 la más alta, como se muestra en la tabla 3. De forma arbitraria, se ha definido el 30 como el nivel crítico tolerable de RPN, por debajo del cual (valores menores a 30), no es imperativo implementar medidas para eliminar, mitigar o transferir el riesgo.

Cuadro 3. Escala de número de prioridad del riesgo (RPN)

Descriptor	RPN
BAJO	0-9
ACEPTABLE	10-19
TOLERABLE	20-29
CRÍTICO	30-40
PELIGROSO	40-50
PELIGROSO	50-60
PELIGROSO	60-70
MUY ALTO	70-80
MUY ALTO	80-90
ALTISIMO	90-100

13.1. Identificación de los riesgos y estimación de sus consecuencias:

Riesgo 1: Mal funcionamiento de los sensores de MP2,5

■ **Severidad (S): 9**

Justificación: un mal funcionamiento en los sensores de MP2,5 podría generar mediciones imprecisas en la concentración de partículas. Estas mediciones erróneas pueden conducir a decisiones inadecuadas en relación con la gestión de la calidad del aire, con potenciales implicancias en la salud pública.

■ **Probabilidad de ocurrencia (O): 7**

Justificación: la utilización de sensores de bajo costo aumenta significativamente la probabilidad de fallos y, por ende, de mediciones incorrectas.

- **Número de prioridad de riesgo (RPN): 63**

Riesgo 2: Autoridades no aceptan como válidas las mediciones realizadas con sensores de MP2,5 de bajo costo

- **Severidad (S): 7**
Justificación: los sensores ópticos no están actualmente reconocidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) como una técnica analítica estándar para la medición de MP2,5.
- **Probabilidad de ocurrencia (O): 8**
Justificación: muchos países mantienen los métodos gravimétricos como una técnica analítica normada para la medición de las concentraciones MP2,5 atmosférico.
- **Número de prioridad de riesgo (RPN): 56**

Riesgo 3: Fallo en la transmisión de datos en línea

- **Severidad (S): 6**
Justificación: un fallo en la transmisión de datos puede provocar una pérdida de información momentánea en el servidor central encargado de administrar los datos. Esta situación podría ocasionar la pérdida de la oportunidad de tomar decisiones informadas y a tiempo respecto a la calidad del aire o del funcionamiento del instrumento.
- **Probabilidad de ocurrencia (O): 5**
Justificación: es común experimentar pérdidas en la conexión inalámbrica debido a diversas fallas como interrupciones del servicio de internet, cortes de suministro eléctrico, impago de la cuenta de internet, entre otros.
- **Número de prioridad de riesgo (RPN): 30**

Riesgo 4: Interrupción de energía en el sistema

- **Severidad (S): 8**
Justificación: una interrupción en el suministro de energía puede llevar a pérdidas de medición durante periodos de tiempo determinados, afectando la continuidad y la integridad de los datos registrados.
- **Probabilidad de ocurrencia (O): 4**
Justificación: aunque la posibilidad de interrupciones en el suministro de energía es real, en entornos urbanos la frecuencia de estos eventos tiende a ser baja, debido a la infraestructura y los respaldos energéticos existentes.
- **Número de prioridad de riesgo (RPN): 32**

Riesgo 5: Manipulación o actos vandalismo en las estaciones de monitoreo

- **Severidad (S): 8**
Justificación: la manipulación indebida o actos de vandalismo dirigidos a las estaciones de monitoreo podrían comprometer la calidad y confiabilidad de los datos recabados, afectando la integridad del sistema de monitoreo y, por ende, la validez de los análisis subsiguientes.

- **Probabilidad de ocurrencia (O): 3**

Justificación: a pesar de que las estaciones se localizan en zonas consideradas seguras y sujetas a vigilancia, la posibilidad de incidencias de vandalismo o manipulación indebida persiste, aunque a un nivel reducido.

- **Número de prioridad de riesgo (RPN): 24**

Riesgo 6: Pérdida de sincronización del Reloj de Tiempo Real (RTC)

- **Severidad (S): 7**

Justificación: la pérdida de sincronización del reloj de tiempo real (RTC) conlleva que los datos adquiridos pierdan exactitud en sus etiquetas temporales. Esto impide discernir el instante de cada medición, lo cual puede degradar significativamente la utilidad y relevancia de los datos recopilados, afectar calibraciones y, en casos extremos, volver los datos inservibles.

- **Probabilidad de ocurrencia (O): 3**

Justificación: los RTC actuales, como el DS3231, son robustos y mantienen una precisión considerable, con desviaciones menores al minuto a lo largo de un año, lo que hace que la probabilidad de desincronización sea relativamente baja, pero existente.

- **Número de prioridad de riesgo (RPN): 21**

13.2. Plan de mitigación de los riesgos

Se implementarán estrategias de mitigación para los riesgos que presenten Número de prioridad de riesgo (**RPN**) superiores a 25. Dichas estrategias estarán detalladas a continuación y afectarán directamente tanto a la severidad (**S**) como a la probabilidad de ocurrencia (**O**) de los riesgos identificados. La severidad y probabilidad de ocurrencia modificadas tras la implementación del plan de mitigación se denotarán como **S*** y **O***, respectivamente. Estas modificaciones podrán dar como resultado un nuevo **RPN***, el que deberá, en la medida de lo posible, ajustarse al criterio de aceptabilidad previamente establecido, es decir, ser inferior a 25.

Riesgo 1: Mal funcionamiento de los sensores de MP2,5

- **Plan de mitigación:** para cada equipo, se incorporarán tres sensores, y, en caso de fallo de alguno de ellos, se remitirá un código de falla al administrador.

- **Severidad (S*): 9**

Efecto de la medida: A pesar de las medidas de mitigación, la severidad del efecto en caso de fallo del sensor se mantiene.

- **Probabilidad de ocurrencia (O*): 2**

Efecto de la medida: se anticipa una reducción en la probabilidad de fallo integral del instrumento. La inclusión de múltiples sensores permite que, en caso de fallo de uno, los demás continúen operativos, permitiendo el aviso inmediato al administrador mediante el envío de un código de falla, lo que previene interrupciones totales en la medición.

- **Número de prioridad de riesgo (RPN*): 18**

Riesgo 2: Autoridades no aceptan como válidas las mediciones realizadas con sensores de MP2,5 de bajo costo

- **Plan de mitigación:** realización de pruebas de calibración con sensores que cuenten con la aprobación EPA o su equivalencia para MP2,5. Mostrar a las autoridades, mediante estudios y pruebas de calibración, que este tipo de instrumentos pueden ser puntos de medición complementarios, que aportan mayor densidad de muestreo a las actuales redes de monitoreo de calidad del aire. Y mostrar la robustez del sistema estadístico planteado y el bajo costo que implica esta tecnología.
- **Severidad (S*): 6**
Efecto de la medida: sobre la base los antecedentes aportados por la calibración y los costos comparados de esta tecnología, los servicios ambientales y gobiernos locales acepten emplear este tipo de tecnologías como métodos alternativos y complementarios para sus monitoreos de la calidad del aire. cabe mencionar que esta tecnología presenta incertidumbre de operación en un rango amplio de concentraciones. Por ejemplo en concentraciones muy altas por lo que la severidad no desaparecerá del todo.
- **Probabilidad de ocurrencia (O*): 4**
Efecto de la medida: en actualidad, en base a resultados de investigaciones y pruebas pilotos, algunos servicios ambientales y gobiernos locales se están abriendo a emplear metodologías de bajo costo para ampliar sus redes de monitoreo o tener primeras aproximaciones de las calidad del aire en centros urbanos.
- **Número de prioridad de riesgo (RPN*): 24**

Riesgo 3: Fallo en la transmisión de datos en línea

- **Plan de mitigación:** se sugiere equipar el instrumento con un sistema de almacenamiento local de datos, lo que permitiría recuperar los datos ausentes en caso de una desconexión.
- **Severidad (S*): 2**
Efecto de la medida: dado que los datos pueden ser recuperados mediante el almacenamiento local de datos, la severidad del problema se reduce significativamente.
- **Probabilidad de ocurrencia (O*): 5**
Efecto de la medida: no se anticipan cambios en la frecuencia de interrupciones, ya que se continuará utilizando el mismo sistema de conexión.
- **Número de prioridad de riesgo (RPN*): 10**

Riesgo 4: Interrupción de energía en el sistema

- **Plan de mitigación:** se implementará un sistema de respaldo energético, como baterías, para asegurar una autonomía limitada en caso de cortes de energía. Asimismo, se planea habilitar opciones de modo de bajo consumo para el instrumento, durante los cortes, pueda apagar componentes de transmisión de datos o reducir la frecuencia de muestreo, por ejemplo.
- **Severidad (S*): 6**
Efecto de la medida: la implementación de un respaldo energético permitirá mantener el instrumento en funcionamiento durante cortes de energía, probablemente por algunos minutos adicionales.
- **Probabilidad de ocurrencia (O*): 2**
Efecto de la medida: Se anticipa que los cortes breves de energía, comunes en algunos sistemas eléctricos, no afectarán el funcionamiento normal del instrumento. Sin embargo, los cortes prolongados de energía pueden seguir siendo problemáticos.

- Número de prioridad de riesgo (RPN*): 12

13.3. Gestión de riesgos

A partir de los resultados adquiridos del análisis de riesgo y su respectiva gestión, se exhibe el Cuadro 4. En él se sintetizan, tanto de forma numérica como gráfica, los impactos de las estrategias de mitigación en el **RPN**. El Cuadro 4 evidencia que las estrategias de gestión propuestas consiguen reducir el riesgo a niveles aceptables, conforme a los criterios previamente establecidos.

Cuadro 4. Resumen de la gestión del riesgos con el resultado de las medidas de mitigación.

Riesgo	S	O	RPN	S*	O*	RPN*
Mal funcionamiento de los sensores	9	8	72	5	4	20
Autoridades no aceptan mediciones	7	8	56	4	4	16
Fallo en la transmisión de datos	6	5	30	3	2	6
Interrupción de energía	8	4	32	4	2	8
Manipulación o actos vandalismo	8	3	24	-	-	-
Pérdida de sincronización del RTC	7	3	21	-	-	-

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

14. Gestión de la calidad

Se eligieron diez requerimientos que a nuestros criterio son los más relevantes y que aportan valor al cliente. Para cada uno de ellos se indicarán las acciones de verificación y validación que permitan asegurar su cumplimiento.

Req #1: exactitud y precisión del instrumento para estimar las concentraciones atmosféricas de MP2,5.

Verificación: Se deben realizar al menos tres pruebas comparativas con el fin de asegurar que los sensores proporcionan medidas de las concentraciones de MP2,5 con la precisión y exactitud requeridas. El éxito de la verificación se determinará al lograr una precisión y exactitud que se encuentre en un rango aceptable entre los sensores de bajo costo y los métodos de referencia estandarizados. Esta condición puede ser validada a través de una prueba de hipótesis.

Validación: Los resultados de las pruebas comparativas se presentarán a los clientes para su evaluación y aprobación, asegurando así que las mediciones cumplen con sus expectativas y requisitos.

Req #2: transmisión de datos segura y sin fallos desde los sensores hasta la base de datos.

Verificación: Se llevarán a cabo pruebas de transmisión de datos bajo diversas condiciones y con distintos volúmenes de datos, con el objetivo de evaluar la robustez y fiabilidad del sistema de transmisión, y asegurarse de que puede manejar variaciones en la carga y en el entorno operativo sin errores ni pérdidas de datos.

Validación: Se efectuarán pruebas de transmisión de datos en tiempo real con el cliente para verificar que los datos se reciben de manera íntegra y en el tiempo adecuado, corroborando así el cumplimiento del requerimiento a satisfacción del cliente.

Req #3: sistema de alimentación energética fiable.

Verificación: Se efectuarán pruebas de estrés al sistema de alimentación, evaluando su resiliencia y capacidad para mantenerse operativo durante distintos intervalos de tiempo en situaciones de interrupción de energía. Asimismo, se determinará el periodo de autonomía del equipo en ausencia de aporte energético, para asegurar su fiabilidad en condiciones de fallo de suministro eléctrico.

Validación: Junto con el cliente, se llevarán a cabo pruebas controladas para demostrar que el sistema es capaz de operar de forma ininterrumpida y efectiva, incluso cuando se presentan interrupciones en el suministro de energía externa, confirmando así la satisfacción del cliente respecto a la fiabilidad del sistema de alimentación energética.

Req #4: almacenamiento de datos en el instrumento.

Verificación: se verificará la integridad y cantidad de los datos almacenados en la memoria local durante un periodo ininterrumpido de 48 horas. Los datos serán clasificados como válidos o no válidos, siendo los válidos aquellos que cumplen con el formato y rango adecuados.

Validación: se realizarán pruebas controladas en presencia del cliente para demostrar la capacidad del sistema de operar de forma continua y efectiva, asegurando el correcto almacenamiento de datos, incluso en situaciones de interrupciones en el suministro de energía externa.

Req #5: datos que cuentan con un índice temporal sincronizado con la hora actual.

Verificación: se verificará que cada uno de los datos cuente con un índice temporal sincronizado con la hora y fecha previamente programadas. Se preferirá que el RTC (Reloj en Tiempo Real) pueda sincronizarse con un servidor NTP en hora UTC o GMT. En la medida de lo posible, se evaluará cualquier pérdida de sincronización del RTC con el servidor NTP.

Validación: Se presentará el formato del índice temporal de los datos al cliente para su validación, asegurando que cumple con sus expectativas y requerimientos.

Req #6: funcionamiento efectivo del equipo bajo diversas condiciones ambientales.

Verificación: Se evaluará el desempeño del equipo en diversas condiciones ambientales exteriores, incluyendo, pero no limitándose a, bajas temperaturas (igual o inferiores a 0 grados Celsius), alta humedad relativa (100 % de humedad relativa del aire), precipitaciones y viento. El objetivo es asegurar la precisión en la medición y registro de datos bajo estas condiciones, determinando así un rango óptimo de condiciones de funcionamiento.

Validación: Se presentarán al cliente los rangos de condiciones óptimas de funcionamiento determinados, para su validación y acuerdo, asegurando que el equipo cumple con sus expectativas y necesidades en los distintos escenarios ambientales previstos.

Req #7: disponibilidad de un manual de usuario comprensivo.

Verificación: se comprobará la disponibilidad de un manual de usuario completo, que incluirá la descripción del funcionamiento básico del equipo, requisitos de suministro energético, condiciones ambientales operativas, diagnóstico y resolución de problemas, procesos de configuración y encendido, características de los datos de salida, especificaciones de emplazamiento, entre otros aspectos relevantes. El manual deberá ser claro, conciso y suficientemente detallado para permitir la operación independiente del equipo por parte del usuario.

Validación: Se presentará el manual de usuario al cliente para su revisión, a fin de asegurar que cumple con los requerimientos mínimos y proporciona la información necesaria para la operación adecuada del instrumento, ajustándose según las observaciones y sugerencias del cliente.

Req #8: disponibilidad de parámetros básicos de registro de concentración de MP2,5.

Verificación: se evaluará mediante observación que el monitor o instrumento deberá almacenar datos en valores de concentración horaria, diaria y promedio móvil de 24 horas de MP2,5, con sus respectivas desviaciones estándar.

Validación: se presentará los registros al cliente para ver el grado de conformidad de estos.

Req #9: Implementación de buenas prácticas de programación en el software del instrumento.

Verificación: Se realizará una revisión exhaustiva y se documentará el cumplimiento de buenas prácticas de programación, conforme a estándares reconocidos internacionalmente, tales como MISRA C o Linux Kernel Coding Style. Se evaluará la consistencia en el estilo de codificación, la adecuación y claridad de los comentarios y la documentación del código, y la implementación de revisiones periódicas de código y herramientas automatizadas para la identificación y corrección de errores y desviaciones del estilo de codificación adoptado.

Validación: Se presentará al cliente un informe detallando con las horas de operación continua del sistema y la ocurrencia de códigos de error durante su funcionamiento, demostrando así la robustez y fiabilidad del software implementado.

Req #10: Verificación de consumos eléctricos y de datos.

Verificación: Se medirá y documentará el consumo eléctrico y de datos en condiciones normales de funcionamiento del equipo, asegurando que se mantengan dentro de los límites establecidos.

Validación: Se presentará al cliente un informe detallado con las mediciones de consumos eléctricos y de datos, para su revisión y aprobación.

15. Procesos de cierre

Se realizará una reunión final para evaluar el proyecto, analizar el cumplimiento del Plan de Proyecto original, identificar técnicas y procedimientos útiles, abordar los problemas surgidos y organizar un acto de agradecimiento para todos los participantes.

15.1. Pautas de trabajo para analizar el respeto al Plan de Proyecto original

- **Responsable:** El Jefe de Proyecto.
- **Procedimiento:** Comparar los resultados obtenidos con los objetivos establecidos en el Plan de Proyecto original, documentar desviaciones y analizar sus causas.
- **Registro:** Documento final de análisis comparativo.

15.2. Identificación de técnicas y procedimientos y solución de problemas

- **Responsable:** El Jefe de Proyecto.
- **Procedimiento:** Realizar reuniones de retrospectiva para discutir y documentar las lecciones aprendidas y los problemas surgidos.
- **Registro:** Documento de "Lecciones Aprendidas".

15.3. Acto de agradecimiento

- **Organizador:** El Jefe de Proyecto.
- **Procedimiento:** Ceremonia de agradecimiento y entrega de certificados de reconocimiento.

15.4. Cronograma de cierre

- **Reunión de Evaluación del Proyecto:** [Fecha a determinar]
- **Entrega de Documento de Análisis Comparativo:** [Fecha a determinar]
- **Entrega de Documento de Lecciones Aprendidas:** [Fecha a determinar]
- **Ceremonia de Agradecimiento:** [Fecha a determinar]

Participantes

Todos los miembros del equipo de proyecto, colaboradores, interesados y patrocinadores están invitados a participar en las actividades de cierre.