



Proyecto Final de Ingeniería Electrónica

Red de nodos de sensores para la medición del
índice de calidad del aire (AQI)

Autores: Larroque, Matías Agustín (56597)
Fernandez, Lucero Guadalupe (57485)
Mollón, Manuel Fernando (58023)
Vijande, Ezequiel (58057)

Tutores: Orchessi, Walter
Pingitore, Ricardo
Ugarte, Alejandro

Fecha: 12/02/2022

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a los profesores, familiares, compañeros y amigos que nos acompañaron durante la carrera. Se agradece a los titulares de la cátedra por impulsarnos a mejorar continuamente el proyecto. También se destacan las autoridades del ITBA que nos impulsaron a desarrollar nuestras capacidades.

Por último, se agradece especialmente a Paula Mollón por brindarnos el lugar donde se desarrolló el proyecto y al Dr Damian Bikiel por su disposición, ayuda y asesoramiento en el área de calidad del aire y sensado de contaminantes.

1 Índice

Índice	3
Acrónimos y Definiciones	6
Resumen	7
Introducción	8
Antecedentes	8
Contexto del proyecto	9
Objetivos	11
Finalidad del Proyecto	11
Planteamiento del Problema a Resolver	11
Alcance	11
Definición de Producto	12
Requerimientos de Cliente	12
Relevamiento de Datos	12
Casa de Calidad	14
Requerimientos finales para trazabilidad	15
Diagrama Funcional de Interfaces	16
Especificaciones de Diseño	16
Especificaciones Funcionales	17
Especificaciones de Interfaz	18
Especificaciones de Performance	19
Especificaciones de Implementación	20
Especificaciones de Servicio (RAMS)	21
Plan de Validación	22
Diseño de Bancos de Pruebas	22
Banco de Pruebas TB1	22
Banco de Pruebas TB2	22
Especificaciones de Tests	24
Especificaciones de TB1	24
Especificaciones de TB2	24
Diseño de y especificaciones de simulaciones	26
Matriz de Trazabilidad de Validación	26

Análisis de Factibilidad	28
Factibilidad tecnológica	28
Esquema Modular	28
Propuesta de alternativas de diseño	28
Medición de PM	28
Centro de control y procesamiento	30
Comunicación	32
Medición de temperatura, humedad y presión	34
Almacenamiento	35
Alimentación	36
Medición de nivel de batería	39
Elección de una solución	40
DFMEA	41
Factibilidad de tiempos	42
Gantt - PERT - CPM	43
Factibilidad económica (Mercado, costos, ciclo de vida, VAN, TIR)	45
VAN y TIR de modelo de negocio de producto	45
Factibilidad legal y responsabilidad civil (regulaciones y licencias)	49
Tipo de Sociedad Mercantil	49
COPITEC	50
Contaminación Electromagnética	50
Ley Nacional de Telecomunicaciones	50
Alarma de contaminación atmosférica	50
Artículo 1113 – Código Civil	51
Certificación de Componentes	51
Estado del Arte – Artículo 1.757	51
Seguro ante responsabilidad Civil	52
Ingeniería de Detalle	53
Hard	53
Diagrama de bloques	53
Descripción de cada bloque	53
Medición de PM	53
Medición Temperatura y Humedad	55
Comunicación	56

Almacenamiento	58
Microcontrolador	59
Sincronización de niveles de tensión	60
Alimentación	60
Medición de nivel de batería	62
Consideraciones para el diseño del hardware	62
Plan de Pruebas de cada módulo	63
Alimentación	63
Controlador	63
Medición de PM	63
Medición de Temperatura y Humedad	63
Medición de nivel de batería	64
Comunicación	64
Almacenamiento	64
Soft	64
Diagrama de estados y flujogramas	69
Descripción de subrutinas	72
Plan de prueba de módulos y depuración de soft	73
Construcción del prototipo	76
Diseño de los circuitos	76
Diseño mecánico	77
Detalles de construcción y precauciones especiales de montaje	78
Validación del prototipo	79
Estudios de confiabilidad de hardware y software	89
Hardware	89
Alimentación	90
Sensor de Humedad y Temperatura	90
Sensor de PM	91
Centro de Control	91
Comunicación	91
Confiabilidad del sistema	92
Software	92
Conclusiones	94

2 Acrónimos y Definiciones

Acrónimo	Descripción
PM	Material particulado
CABA	Ciudad Autónoma de Buenos Aires
APrA	Agencia de Protección Ambiental
OMS	Organización Mundial de la Salud
EPA	Environmental Protection Agency
INQUIMAE	Instituto Nacional de Química y Física
AQI	Air Quality Index
MAE	Mean Absolute Error

Tabla 2.1: Acrónimos

Acrónimo	Descripción
PM	Se denomina PM a las partículas en suspensión que se encuentran dispersas en la atmósfera. Pueden ser de origen antropogénico tanto como natural. Dentro del PM se puede distinguir el PM10 como aquellas partículas en suspensión con un diámetro aerodinámico menor a 10µm y el PM2.5 con diámetro menor a 2.5µm.
EPA	Es la agencia de protección ambiental a nivel nacional de Estados Unidos. Sus protocolos y estándares ambientales suelen tomarse como referencia en muchos países de América.

Tabla 2.2: Definiciones

Nota: el término *nodo* se usa para referirse al dispositivo, puesto que el dispositivo es un nodo de medición, con un conjunto de sensores, es decir, en este informe nodo y dispositivo se usan como sinónimos.

3 Resumen

Este informe de proyecto final de la carrera de Ingeniería Electrónica se enfoca en las problemáticas existentes en la contaminación del aire. Se trata del monitoreo de la calidad del aire mediante una red de nodos que funcionan con baterías y sensan la concentración del contaminante PM10, condiciones de humedad, temperatura y presión y publican estas mediciones junto con el nivel de carga de batería cada hora a un servidor con interfaz web.

Esto permite que la información sobre los contaminantes que respiran las personas sea más accesible. Es de importancia ya que recientemente se ha puesto un mayor foco en la protección ambiental y su impacto en la calidad de vida de las personas.

Se analizaron los requerimientos y especificaciones del producto tomando en consideración al cliente: la agencia gubernamental APrA (Agencia de Protección Ambiental).

Además se diseñó y construyó un prototipo al cual se puso bajo prueba para validar el cumplimiento de las especificaciones.

Finalmente se logró realizar un proyecto en el que intervienen el desarrollo de software, diseño de hardware, soluciones de integración, manejo de tiempos, de datos y recursos.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, no solo por el dispositivo funcional logrado, si no también por las capacidades que fueron necesarias adquirir para desarrollarlo. Fue necesario utilizar conocimientos previos de la carrera de ingeniería electrónica y también se debió aprender nuevas habilidades de diseño, comunicación y de resolver con criterio de ingeniería. Deseamos que este proyecto sea la base para nuevos futuros desarrollos.

4 Introducción

4.1 Antecedentes

En el pasado se han realizado monitoreos sobre las concentraciones de PM en el aire de CABA en los cuales se concluye que las mismas igualan o superan los niveles de alerta de US-EPA (Bogo y otros, 2003), y que es muy frecuente que los valores promedios de PM_{2.5}¹ superen el nivel guía de exposición crónica establecido por la OMS (Greenpeace, 2018).

Hoy en día predominan las estaciones de monitoreo, complejas y costosas para el monitoreo de la calidad del aire con fines regulatorios (Snyder y otros, 2013). Sin embargo, se han elaborado redes de monitoreo basadas en nodos de medición con sensores Low-Cost. Estos sensores son elaborados en su totalidad por empresas extranjeras por lo que tienen precios elevados para países con altos costos de importación. Por otro lado, las características de los sensores de bajo costo no cumplen en su totalidad con las regulaciones de los entes ambientales internacionales.

Los equipos que existen en la actualidad pueden medir partículas con tres métodos diferentes:

1. Infrarrojo: Es el usado por la mayoría de los detectores de bajo costo para uso doméstico. Este mismo es una cámara con una corriente de aire pasando por ella. De un lado de la cámara, hay un emisor de una señal infrarroja y de otro lado se encuentra el sensor. Cuando las partículas se interponen en el medio de la señal estas atenúan la misma y basado en cuanto se atenuó la señal se puede sacar un estimado de la cantidad de partículas en el aire. El problema con esta tecnología es que no se puede saber el diámetro de las partículas que están siendo medidas ni cuantas son, por lo que solo sirve para un estimado rápido de la calidad de aire general, pero no para obtener datos concretos.
2. Monitoreo de atenuación beta: Es el método usado por las estaciones de medición más robustas, siendo estos los dispositivos más caros y grandes en dimensión. Pueden llegar a costar cientos de miles de dólares. Son apropiados para la medición de aire ambiente. Su funcionamiento se basa en capturar una muestra de aire a través de un filtro de papel. Este papel es luego expuesto a radiación beta. El material particulado absorbe radiación y se mide la variación de la radiación del otro lado. Con estos datos y la temperatura y humedad, se calcula la masa de material particulado. Como puede atravesar materia la radiación, se pueden obtener datos sobre la densidad y diámetro de las partículas en el aire.
3. Difracción láser: Es el método usado por los medidores de uso portátil profesional y funciona para medir a través de aire, líquido o en vacío. Funciona disparando un láser, y cuando este choca con una partícula, el haz se difracta. Esta difracción es relativa al tamaño de la partícula. Finalmente, un sensor detecta la intensidad y ángulo del haz difractado y con un algoritmo que tiene en cuenta la temperatura y humedad, se calcula el material particulado presente. Produce un muy buen resultado, pero se debe calibrar muy bien el sensor para lograr esto.

A continuación, se presentan brevemente algunos modelos actuales en el mercado:

- Contador De partículas Amtast Amf079: Es un dispositivo portátil para la medición de PM_{2.5}, temperatura y humedad. Cuenta con una pantalla LCD para la visualización de datos y usa baterías recargables. Fue diseñado para ser usado a mano y se apaga automáticamente tras 2 min de no ser usado. Por lo que es útil para mediciones rápidas.

¹ PM_{2.5} (por sus siglas en inglés) son partículas muy pequeñas en el aire que tiene un diámetro de 2.5 micrómetros (aproximadamente 1 diez milésimas de pulgada) o menos de diámetro.

- Flow 2 (Plume Labs): Es la segunda generación de la empresa Plume Labs que se dedica a estimar la calidad del aire en base a PM10 en todas las regiones del mundo. Esta empresa utiliza sus propios dispositivos y también mediciones de agencias de gestión pública para obtener datos del contaminante en determinadas regiones del espacio y luego estiman la calidad del aire de todo el mundo en base al viento y con modelos predictivos de datos.
- PurpleAir PA-II-SD: Es un modelo de la empresa Purple Air, la cual vende dispositivos para uso doméstico. Estos funcionan por Wifi y se enchufan a la red eléctrica. Miden PM2.5 y PM10 y actualizan los resultados en una red mundial a la cual se puede acceder por la web. Aunque hay cientos de unidades vendidas en USA/Europa, esta tecnología difícilmente llega a América Latina, habiendo menos de 25 unidades en dicho territorio y 0 en el territorio argentino.
- CamBike: El proyecto CamBike de la universidad de Cambridge consistió en la elaboración de un módulo portátil que incluye GPS y un sensor de PM, entre otras funcionalidades. El objetivo de CamBike fue que dicho módulo pueda montarse sobre una bicicleta y que pueda estimar de manera confiable las concentraciones de PM a las que está expuesto el ciclista a lo largo de su ruta y se lo comunique mediante una plataforma online.
- AQMesh: Sensor de calidad de aire pequeño para uso externo o interno y ofrece información y análisis de datos en tiempo real. Este mismo es de mayor costo que los anteriores ya que mide varios componentes y gases en el aire (NO, NO₂, O₃, PM₁₀, PM₄, etc.).

Algunas empresas fabricantes de estos dispositivos, como por ejemplo Plume Labs de Estados Unidos, o los promotores del proyecto CamBike en Inglaterra, complementan las mediciones de sus propios sensores con datos obtenidos por estaciones de medición de gestión pública para extender al máximo las regiones que tienen información sobre la calidad del aire.

4.2 Contexto del proyecto

CABA tiene en total 200 km^2 que equivalen a 20 millones de m^2 o lo que es igual a 2000 hectáreas (ha).

El número de 2000 ha se compone de 600 ha de microcentro y alrededores donde la concentración de PM tiene mayor variabilidad según la actividad humana de la zona. El resto de CABA representa las 1400 ha restantes.

Actualmente existen tan solo tres estaciones de monitoreo de la calidad del aire para cubrir toda la zona de CABA, una se encuentra en Parque Centenario, otra en La Boca y la en Recoleta. Se puede ver en el mapa como puntos negros estos centros de monitoreo:

5 Objetivos

5.1 Finalidad del Proyecto

Este proyecto resultará en la posibilidad de que APrA pueda complementar su red de monitoreo ya existente con nodos de bajo costo. Al igual que las estaciones de monitoreo existentes, que miden PM_{10} , la red de sensores propuesta medirá este material particulado pero además temperatura, humedad y presión, ya que son de utilidad al momento de interpretar las mediciones anteriormente mencionadas y así poder obtener un resultado sobre la calidad del aire preciso.

De esta manera se podrá tener información sobre la calidad del aire en una mayor cantidad de regiones de CABA y así se tendrán mejores estimaciones sobre el estado ambiental de la ciudad y además se podrán identificar las regiones con mayor contaminación para poder priorizar acciones correctivas en estas últimas.

5.2 Planteamiento del Problema a Resolver

El problema principal a resolver es la baja resolución espacial para el contaminante PM_{10} que tiene en la actualidad la red de monitoreo de APrA. Este proyecto pretende resolver el problema con la elaboración de nodos que estimen la calidad del aire cumpliendo los protocolos de precisión requeridos por APrA y que tengan una frecuencia de mantenimiento lo suficientemente baja para que su implementación sea económicamente viable.

La mayor dificultad de esto es asegurar que los dispositivos puedan garantizar su correcto funcionamiento sin la necesidad de intervenciones como cambio de fuente de energía en lapsos cortos de tiempo. Además los nodos deben publicar sus mediciones de manera que la forma de visualización y acceso a las mismas sea sencilla y periódica.

5.3 Alcance

El desarrollo del proyecto contempla el diseño del nodo de medición, así como también el algoritmo empleado para interpretar las mediciones de los sensores. También está contemplado dentro del proyecto la elaboración del diseño del servidor de datos on-premise de las mediciones y la representación visual de ellos en la página web. En este proyecto también se consideran los análisis económicos y de factibilidad tecnológica.

El producto final en resumen consta de un nodo de medición que conforma una base de datos donde son guardadas las mediciones y una página web donde son procesados y representados los datos para sean visualizados/utilizados por el usuario.

El proyecto no contempla la instalación y mantenimiento asociado al hardware del servidor de la base de datos ni tampoco la unificación de los datos generados por el nodo de medición con la red de APrA ya existente.

6 Definición de Producto

6.1 Requerimientos de Cliente

6.1.1 Relevamiento de Datos

El equipo se puso en contacto con APrA donde nos informaron que las mediciones de interés son del contaminante PM_{10} . A su vez se manifestó la necesidad de que el nodo de medición sea autónomo en su forma de realizar las mediciones y comunicarla en el mismo día que fueron medidas para que no haga falta tener que asistir físicamente para que el dispositivo pueda mantenerse encendido o para visualizar los resultados. En este sentido APrA considera aceptable una autonomía del nodo de treinta días..

APrA también necesita que los datos que se obtengan deben ser promedios por hora como ya se obtienen en sus estaciones de medición. Además deben asegurarse la continuidad de las mediciones, es decir que debe generarse un valor por hora sin perder ningún valor de las 24 horas del día. En caso de que alguna medición no pueda comunicarse de manera remota, tiene que existir una manera de recuperar ese valor de algún dispositivo de memoria física.

Por otro lado, en cuanto a la instalación del nodo, APrA necesita instalarlo en zonas abiertas y debe ser versátil para sujetarlo a soportes y el tamaño debe ser tal que pueda ser trasladado colocado por una sola persona.

Otro punto importante discutido con el cliente es el tamaño de la red. Para el mismo se basó en papers publicados sobre la variabilidad espacial del PM para determinar el tamaño aproximado del radio que debe cubrir cada nodo_{[4][6]}. Se llegó a la conclusión de que en las áreas más transitadas cada nodo sensa el PM de un radio de 75 metros mientras que en espacios menos transcurridos (y por lo tanto con menos contaminación del aire) cada nodo sensa un diámetro de 150 metros de radio. A partir de este radio se calcula el área que cubre un nodo con la fórmula del área de un círculo:

$$A = \pi * r^2$$

Por lo que se obtiene:

$$A_1 = \pi * 75^2 = 17671 m^2 = 2 ha$$

$$A_2 = \pi * 150^2 = 70868 m^2 = 7 ha$$

Ahora tomamos en cuenta el hecho de que en CABA tenemos 600 hectáreas (ha) de mucho movimiento y 1400 ha de zonas menos transitadas. Por lo que se obtiene que en cada área se necesitan:

$$N_1 = \frac{600 ha}{2 ha} = 300 nodos$$

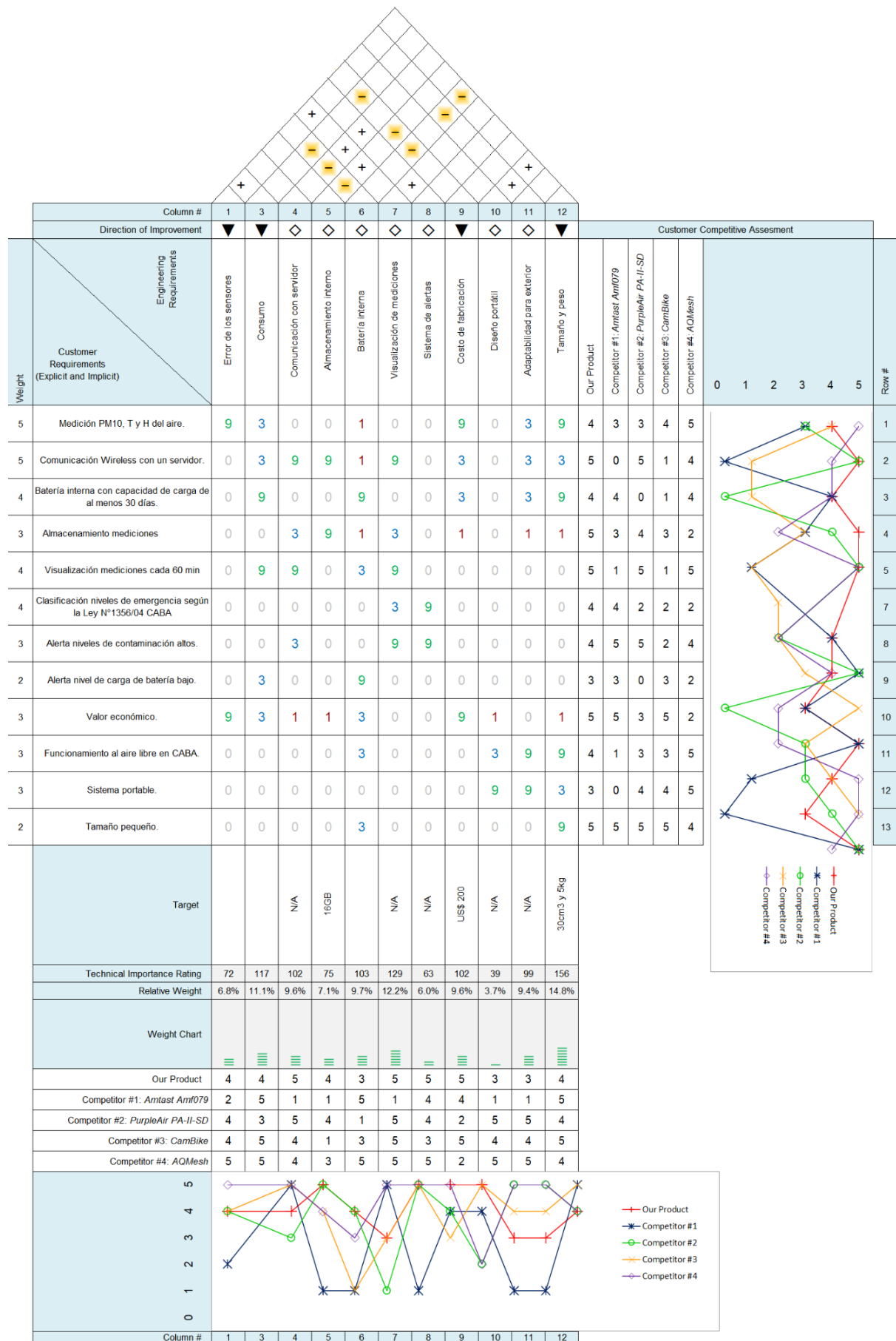
$$N_2 = \frac{1400 ha}{7 ha} = 200 nodos$$

Por lo que se llega a la conclusión de que se debe construir una red de:

$$N_T = N_1 + N_2 = 500 nodos$$

Finalmente, para incorporar aún más información útil para la definición del producto se logró una comunicación con el Dr. Damián Bikiel, del INQUIMAE-CONICET quien aportó el dato de que las mediciones de PM_{10} se correlacionan con la temperatura, humedad y presión por lo que al momento de ponderar las mediciones de PM es esencial contar con estas magnitudes.

6.1.2 Casa de Calidad



6.2 Requerimientos finales para trazabilidad

ID	Descripción	Origen
REQ-01	Deberá medir concentraciones de PM10, temperatura, humedad y presión del aire simultáneamente.	Cliente – Explícito
REQ-02	Debe contar con conectividad y comunicación Wireless con un servidor	Cliente – Tácito
REQ-03	Deberá funcionar con una batería interna, con un compartimiento para poder ser intercambiada, con una capacidad de carga de al menos 30 días.	Cliente – Tácito
REQ-04	Será adecuado para funcionar al aire libre en CABA, resistiendo sus climas mientras estos no sean extremos.	Cliente – Tácito
REQ-05	El dispositivo debe ser portátil.	Cliente - Tácito
REQ-06	Su tamaño deberá ser pequeño, sin superar los 30 cm en ninguna dirección.	Cliente – Tácito
REQ-07	El dispositivo deberá clasificar correctamente niveles de emergencia según la Ley N°1356/04 CABA	Cliente – Explícito (Ley CABA)
REQ-08	Se debe alertar al usuario cuando los valores de contaminación aérea excedan niveles aptos para la salud.	Cliente - Tácito
REQ-09	Su valor deberá ser económico, siendo menor a 400 USD	Cliente - Explícito
REQ-10	Debe almacenar mediciones en caso de falla de comunicación sin perderse ninguna medición.	Cliente - Tácito
REQ-11	Debe permitir visualizar nuevas mediciones en el servidor con una frecuencia de una medición cada 60 minutos.	Cliente – Tácito
REQ-12	Debe alertar cuando el nivel de carga de la batería se encuentre por debajo del 30% de su capacidad total.	Cliente – Tácito.

Tabla 6.1: Requerimientos

6.3 Diagrama Funcional de Interfaces

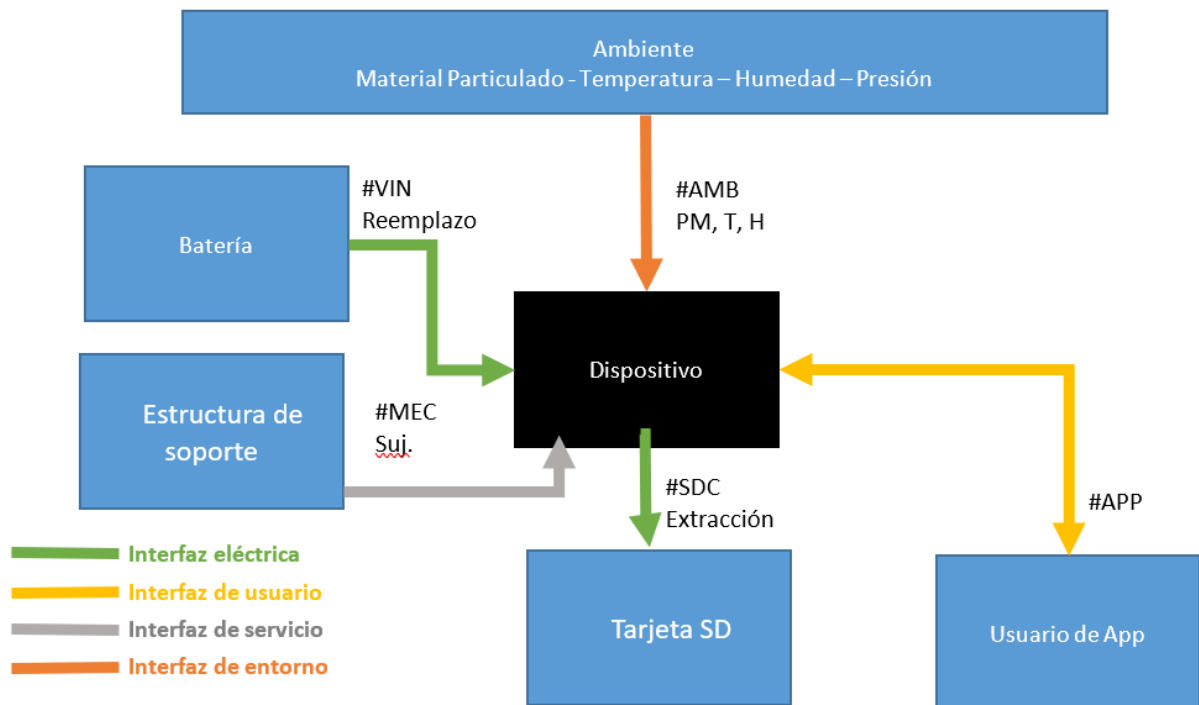


Figura 6.1: Diagrama Funcional de Interfaces

6.4 Especificaciones de Diseño

Leyenda para Especificaciones	
Aplicabilidad	Validación
DP: Dispositivo, Prototipo	I: Inspección Visual
IP: Instalación, Prototipo	D: Documentación de Diseño
DF: Dispositivo, Producto Final	S: Simulación
IF: Instalación, Producto Final	T: Test

Tabla 6.2: Leyenda de uso en especificaciones

6.4.1 Especificaciones Funcionales

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
FUN-AMB -01	Medirá concentraciones de PM10	REQ-01	DP, DF D
FUN-AMB-03	Medirá la temperatura del ambiente .	REQ-01	DP, DF D
FUN-AMB-04	Medirá humedad del ambiente.	REQ-01	DP, DF D
FUN-AMB-05	Medirá la presión del ambiente.	REQ-01	DP, DF D

Tabla 6.3: Especificaciones Funcionales AMB

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
FUN-APP -01	Mostrará la información de mediciones en función del tiempo en un servidor web.	REQ-11	DP, DF T
FUN-APP -02	Alertará en el servidor web cuando la concentración de PM de un nodo exceda el nivel de alerta.	REQ-07 REQ-08	DP, DF T

Tabla 6.4: Especificaciones Funcionales APP

6.4.2 Especificaciones de Interfaz

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
INT-SER-01	Debe comunicarse con un servidor web que pueda ser accedido mediante un smartphone o computadora.	REQ-02	DP, IP, DF, IF, T

Tabla 6.5: Especificaciones de Interfaz SER

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
INT- APP -03	Deberá mostrar el nivel de batería del nodo.	REQ-02	DP, DF T
INT- APP -05	Deberá permitir la configuración de los datos de ubicación y nombre del nodo.	REQ-02	DP, DF T
INT-APP-06	Debe distinguir entre distintas categorías de peligrosidad de concentración de PM10	REQ-07 REQ-11	DP, DF T

Tabla 6.6: Especificaciones de Interfaz APP

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
INT-SUJ-01	El dispositivo debe estar cubierto de manera que soporte precipitaciones según el grado de protección IP65.	REQ-04	DP, IP, DF, IF I, D, T

Tabla 6.7: Especificaciones de Interfaz SUJ

6.4.3 Especificaciones de Performance

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
PER-AMB-01	El equipo deberá tener una frecuencia de muestreo no menor a 15 minutos (de manera de obtener mediciones menos ruidosas y actualizar la página web cada 60 minutos)	REQ-11	DP, DF T
PER-AMB -02	Medirá concentraciones de PM10 hasta 450 ug/l con precisión de +/- 5ug/l	REQ-01	DP, DF D, T
PER-AMB -03	Medirá presión con precisión de +/-5 hPa	REQ-01	DP, DF T
PER-AMB-04	Medirá temperatura con precisión de +/- 5°C	REQ-01	DP, DF D
PER-AMB-05	Medirá humedad con precisión +/- 10% RH	REQ-01	DP, DF D

Tabla 6.8: Especificaciones de Performance AMB

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
PER- SER-01	Cada nodo deberá contar con memoria interna para poder almacenar los datos correspondientes a toda las mediciones en caso de falla de comunicación (tarjeta SD, tamaño > 8Gb)	REQ-10	DP, DF T

Tabla 6.9: Especificaciones de Performance SER

6.4.4 Especificaciones de Implementación

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-OPE-01	El dispositivo deberá poder operar normalmente cuando la temperatura ambiente sea: $-10^{\circ}\text{C} < T_{\text{amb}} < 50^{\circ}\text{C}$.	REQ-04	DP, IP, DF, IF I, D, T
IMP-OPE-02	El dispositivo deberá poder operar normalmente cuando la humedad sea: $0\% < RH < 100\%$	REQ-04	DP, IP, DF, IF I, D, T
IMP-OPE-03	El dispositivo debe soportar lluvias de hasta 180 mm resguardando los módulos eléctricos.	REQ-04	DP, IP, DF, IF I, D, T

Tabla 6.10: Especificaciones de Operación

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-DIM-01	El dispositivo no deberá exceder las siguientes dimensiones: Largo < 30 cm Ancho < 30 cm Alto < 30 cm	REQ-06	DP, IP, DF, IF I, D
IMP-DIM-02	El dispositivo no deberá pesar más de 5 Kg	REQ-05	DP, IP, DF, IF I, D

Tabla 6.11: Especificaciones Dimensionales y de Peso

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
IMP-COS-01	El costo de las partes que conforman el producto no deberá ser superior a 200 USD	REQ-09	DP, DF D
IMP-COS-02	El precio de venta del producto deberá ser inferior a 400 USD	REQ-09	DP, IP, DF, IF I, D

Tabla 6.12: Especificaciones de costos

6.4.5 Especificaciones de Servicio (RAMS)

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
RAM-CON-01	El producto deberá contar con una autonomía mayor a 30 días.	REQ-03	DP, IP, DF, IF S, T

Tabla 6.13: Especificaciones de Confiabilidad

ID	Descripción	Origen	Aplicabilidad Validación
RAM-MAN-02	Debe alertar al servidor cuando el nivel de batería sea bajo, es decir, antes de que el dispositivo sea incapaz de cumplir sus funciones.	REQ-12	DP, IP, DF, IF I, D, S, T
RAM-MAN-03	Deberá haber una indicación visual clara cuando el equipo está energizado.	REQ-12	DP, IP, DF, IF I, S, T
RAM-MAN-05	Debe contar un compartimiento para alojar e intercambiar baterías.	REQ-03	DP, IP, DF, IF I, S, T

Tabla 6.14: Especificaciones de Mantenibilidad

7 Plan de Validación

7.1 Diseño de Bancos de Pruebas

7.1.1 Banco de Pruebas TB1

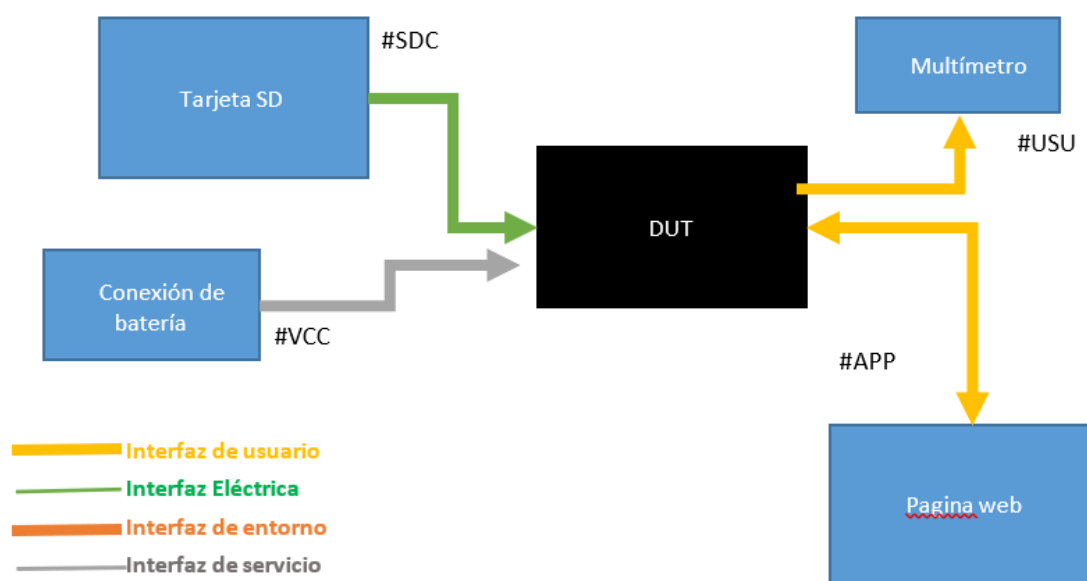
El dispositivo se debe encontrar preparado para publicar información a la web según se requiera en las pruebas.

La interfaz de usuario es una computadora que tiene la capacidad de acceder al servidor web y mostrar la información del nodo.

El dispositivo debe tener incorporado un led que indique el estado del dispositivo según está energizado o realizando una acción de comunicación.

La otra interfaz de usuario que posee el banco de pruebas es un multímetro. El mismo debe poder usarse para medir diferencia de tensión entre pines de interés del DUT.

La tarjeta SD se debe conectar al compartimiento de tarjeta SD del dispositivo, y también se puede extraer del dispositivo para luego conectarla en una computadora. En la tarjeta SD se almacena cada hora las mediciones que realiza el dispositivo, especificando tipo de medición, unidades, fecha y hora.



7.1.2 Banco de Pruebas TB2

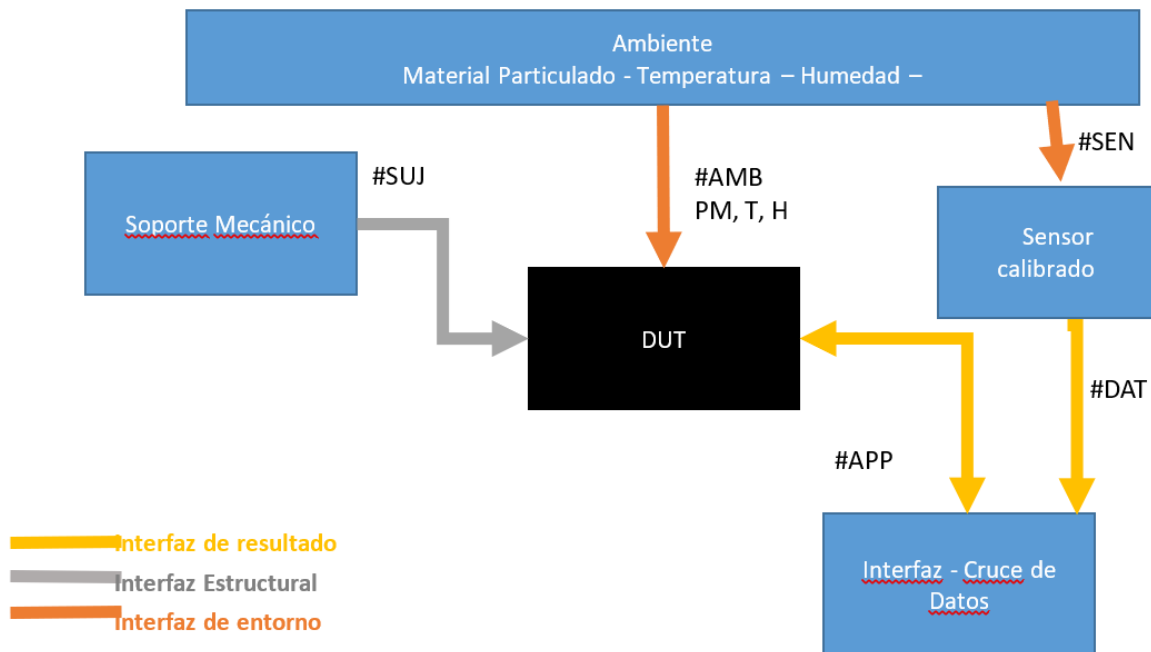
El DUT de este test bench consiste en el prototipo completo del nodo de medición. Se debe apoyar el nodo de medición sobre una superficie plana a una altura de entre 1m y 3m del suelo. Además, se debe asegurar que el nodo se encuentre a una distancia de por lo menos un metro del edificio más cercano para asegurar un buen flujo de aire.

El dispositivo se debe encontrar preparado para tomar mediciones y publicar resultados en la página web desarrollada en este proyecto. A su vez, se debe contar con una interfaz que obtenga los

resultados de la página web y los pueda comparar con resultados de mediciones de sensor calibrados.

La red de sensores utilizada como sensores de referencia es de la empresa Plume Labs.

La interfaz para el cruce de datos consiste en una computadora que accede a datos web y además se cargan en planillas estilo Excel los datos de las mediciones del sensor calibrado de referencia.



7.2 Especificaciones de Tests

7.2.1 Especificaciones de TB1

ID Aplicabilidad	Procedimiento	Criterio
<p>Precondiciones:</p> <p>Para T-INT-05 deberá haber pasado con éxito T-INT-01.</p> <p>Procedimiento General: Para todas estas pruebas, se deberá conectar el DUT al banco de pruebas #1. Asegurarse de contar con un nivel de batería mayor al 50% de carga. Verifique que la inserción de la tarjeta SD se haya realizado correctamente. Corroborar la visibilidad de los leds del DUT. Los tests comienzan con todos los artefactos ya conectados y encendidos.</p>		
T-INT-01 Proto	<ol style="list-style-type: none">1. Visualizar leds de encendido, corroborar que estén prendidos.2. Corroborar que esté enviando el nivel de batería al servidor web.3. Medir el nivel de batería con multímetro	Se encienden los leds, y el nivel de batería que indica el servidor web coincide con el del multímetro en $\pm 50\text{mV}$
T-INT-05	<ol style="list-style-type: none">1. Encender el DUT y dejar en funcionamiento durante 2 horas2. Luego extraer tarjeta SD y abrir el archivo de texto que contiene con una computadora.3. Corroborar que el archivo contenga las mediciones de las últimas 2 horas.	Se visualizan las mediciones en la tarjeta SD y coinciden con los resultados mostrados con los de la página web.

Tabla 7.1: Tests de Funcionalidad

7.2.2 Especificaciones de TB2

ID Aplicabilidad	Procedimiento	Criterio
<p>Precondiciones: Para realizar los tests deben haberse realizado previamente los tests relacionados al banco de prueba TB1.</p> <p>Procedimiento General: Ubicar al nodo a una distancia de entre uno y tres metros del suelo. Además, se debe asegurar que el nodo se encuentre a una distancia de por lo menos un metro del edificio más cercano para asegurar un buen flujo de aire.</p> <p>El soporte mecánico en el cual se sitúa el nodo de medición debe encontrarse a una distancia de entre uno y diez metros del sensor de referencia. El sensor de referencia debe medir la concentración promedio de PM en una hora. Una vez que el nodo esté sujetado correctamente se lo debe encender y dejar en esta configuración por un lapso de 12 horas.</p>		

Una vez transcurrido el lapso de 12 horas se deben tomar las mediciones del nodo disponibles en la aplicación web y contrastarlas con las mediciones. Todas las mediciones utilizadas deben estar expresadas en ug/l.

Se calcula el MAE (Mean Absolute Error) del test como:

$$MAE = \frac{\sum_i |e_i|}{n}$$

Donde e_i son las diferencias entre la medición i-ésima del nodo y la medición i-ésima de la estación de monitoreo, y n es el número de mediciones.

T-FUN-01	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar la instalación descrita en el procedimiento general. 2. Verificar que el dispositivo esté encendido y funcionando. 3. Esperar el lapso de 12 horas. 4. Obtener de la aplicación web las mediciones de las concentraciones promedio por hora de PM10 del DUT correspondientes a los últimos 12 horas. 5. Comparar las mediciones del DUT con las mediciones de las últimas 12 horas del sensor de referencia. 6. Calcular el MAE 	El MAE debe ser menor a $5 \frac{ug}{m^3}$
T-FUN-02	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar el mismo procedimiento de T-FUN-01 pero obteniendo humedad, temperatura y presión para el paso 4. 	MAE debe ser menor a 10 %HR, 5°C, 10HPa para humedad, temperatura y presión respectivamente.
T-APP-01 Proto	<ol style="list-style-type: none"> 1. Esperar a que el nodo comunique una medición de PM10 al servidor. 2. Corroborar que el servidor muestre el valor de PM10 indicado con el color correspondiente al valor según el rango de peligrosidad. 	Se muestra color bordo para valores peligrosos, o morado para el rango muy insalubre, rojo para insalubre, naranja, amarillo o verde para insalubre para sensible, moderado y bueno respectivamente.

Tabla 7.2: Tests relacionados al banco de pruebas TB2

7.3 Diseño de y especificaciones de simulaciones

ID Aplicabilidad	Procedimiento	Criterio
<p>Precondiciones: Para realizar la simulación previamente deben haberse configurado todos los periféricos del microcontrolador y deben estar definidos en la herramienta de desarrollo todos los pines utilizados.</p> <p>El software debe estar completamente desarrollado y compilado, y debe cumplirse que el programa sea cíclico cada una hora.</p> <p>Procedimiento General:</p> <p>Descargar MCU Power estimation tool (página oficial www.nxp.com) y seleccionar el MCU sometido a validación.</p>		
SIM-INT-01	<ol style="list-style-type: none"> 1. Abrir MCU Power estimation tool 2. Seleccionar MCU MK64FN1M0XXX12 3. Seleccionar y configurar batería utilizada 4. Selección de power profile 5. Selección de periféricos en todo el programa 6. Configurar duración del modo RUN del programa 7. Configurar duración del modo STOP del programa 8. Seleccionar periféricos utilizados en modo RUN 9. Seleccionar periféricos utilizados en modo STOP 10. Obtener resultado de corriente media del MCU para el programa 	La corriente media simulada debe ser menor a 4mA para que el microcontrolador en conjunto con los demás módulos del nodo (para los que se estima un consumo medio de 5mA) no superen los 9 mA de corriente media consumida.

7.4 Matriz de Trazabilidad de Validación

Origen	REQ ID <i>Descripción corta</i>	ESP ID	TEST ID o SIM ID
Tácito	REQ-01	FUN-AMB-01	T-FUN-01
		FUN-AMB-03	T-FUN-02
		FUN-AMB-04	-
Tácito	REQ-07	FUN-APP-02	T-APP-01
	REQ-08	FUN-AMB-5	
	REQ-11	FUN-APP-01	T-INT-05
	<u>Funcionalidad</u>		
Tácito	REQ-02	INT-SER-01	T-INT-01

	REQ-07		
	REQ-11	INT- APP -03	T-INT-01
	REQ-12		
		INT- APP -05	
		INT- APP -06	T-INT-05
	REQ-04		
	Interfaz		
Tácito	REQ-12	PER-AMB-01	T-INT-05
	REQ-07	PER-AMB-02	T-FUN-01
		PER-AMB-03	T-FUN-02
	REQ-01	PER-AMB-04	-
		PER-AMB-05	-
Explícito	REQ-10	PER-SER-01	T-FUN-05
	<i>Performance</i>		
Tácito	REQ-04	IMP-OPE-01	T-FUN-01
		IMP-OPE-02	T-FUN-02
			T-FUN-04
		IMP-OPE-3	
Explícito	REQ-06	IMP-DIM-01	--
Explícito	REQ-05	IMP-DIM-02	--
Tácito	REQ-09	IMP-COS-01	--
	Implementación	IMP-COS-02	--
Tácito	REQ-03	RAM-CON-01	SIM-INT-01
		RAM-MAN-04	
		RAM-MAN-05	
Explícito	REQ-12	RAM-MAN-01	
Tácito		RAM-MAN-02	
	Servicio	RAM-MAN-03	T-INT-01

Tabla 7.6: Matriz de Trazabilidad para Validación

8 Análisis de Factibilidad

8.1 Factibilidad tecnológica

8.1.1 Esquema Modular

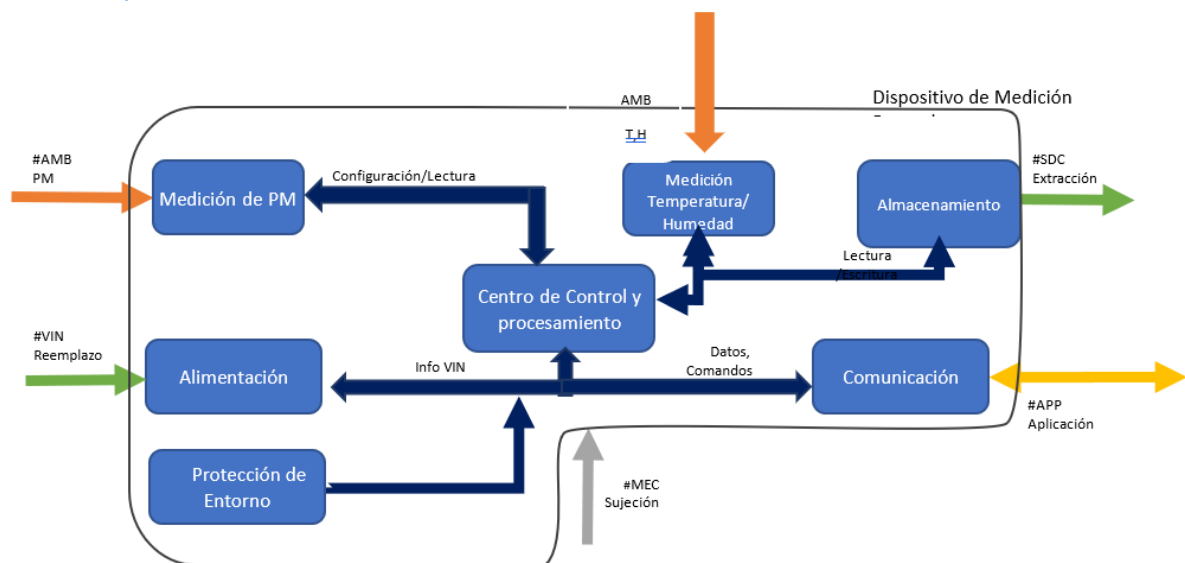


Figura 8.1: Diagrama Modular

8.1.2 Propuesta de alternativas de diseño

A continuación, se presentan distintas opciones para los componentes principales que conformarán cada módulo del equipo. Se expondrán características relacionadas con la performance y el costo en formatos de tablas a modo de comparar las distintas alternativas, para luego elegir el componente que definirá el entorno y las interfaces de cada módulo del diagrama que se corresponde con la figura 8.2.

Aclaración: todos los costos se encuentran en dólares (USD) por unidad.

8.1.2.1 Medición de PM

Los sensores de PM Low-Cost que se presentan en la siguiente tabla se eligieron ya que cumplen como mínimo las especificaciones: FUN-AMB-01, PER-AMB-01, PER-AMB-02 (en el rango de medición), PER-AMB-03 (en el rango de medición), IMP-OPE-01.

Todos los modelos presentados en la siguiente tabla necesitan una tensión de alimentación de 5V.

Modelo	Parámetros medidos	Interfaces	Salida Digital	Consumo(mA)	Costo(USD)	Disponibilidad en el país
OPC-N3 (Alphasense)	PM1, PM2.5 PM10,PM4.25	SPI	Sí	180 (Medición) 45(Standby)	-	No
SPS30 (Sensirion)	PM1, PM2.5, PM10, PM4	UART, I2C	Sí	55 (Medición) 0.33 (Idle) 0.038 (Sleep)	30	No
SDS011 (Nova Fitness)	PM2.5, PM10	UART	Sí	70 (Medición) 4 (Sleep)	30	No
PMS5003 (Plantower)	PM1, PM2.5, PM10	UART	Sí	100 (Activo) 0.2 (Sleep)	18	No
DSM501A	PM1,PM2.5,PM10	Analógica	No	90	15	Si
Gp2y1010au0f (Sharp)	PM1,PM2.5,PM10	Analógica	No	11	13	Si

Proceso de puntuación

De la tabla anterior asignamos un puntaje relativo de 0 a 5 para las siguientes categorías:

1. Salida Digital
2. Consumo
3. Precio
4. Disponibilidad

La numeración se corresponde con el orden de importancia de cada factor.

Modelo	Salida Digital(A)	Consumo(C)	Precio(P)	Disponibilidad(D)
OPC-N3 (Alphasense)	3	2	0	0
SPS30 (Sensirion)	5	5	1	0
SDS011 (Nova Fitness)	3	3	2	0
PMS5003 (Plantower)	2	4	3	0
DSM501A	0	0	4	5
Gp2y1010au0f (Sharp)	0	1	5	5

Pesamos cada atributo con la misma proporción ya que se los consideran iguales en importancia:

$$Puntaje = 0.25D + 0.25P + 0.25C + 0.25A$$

Con lo que el puntaje final de cada opción resulta:

Modelo	Puntaje
OPC-N3 (alphasense)	1.25
SPS30 (Sensirion)	2.75
SDS011 (Nova Fitness)	2.0
PMS5003 (Plantower)	2.25
DSM501A	2.25
Gp2y1010au0f (Sharp)	2.75

Como se puede ver, las dos soluciones preferenciales según el puntaje establecido son el SPS30 de “Sensirion” y el sensor de “Sharp”.

El sensor de marca Sharp logró un puntaje alto debido a su disponibilidad en el país y además por su precio accesible, mientras que el SPS30 posee un puntaje elevado debido a su buena característica en consumo y en su interfaz digital.

Elección final

En adelante, se asumirá como sensor elegido para el producto final al SPS30 debido a su mejor característica técnica, pero se tendrá en cuenta al sensor de PM “Sharp” para los posibles prototipos debido a su bajo coste y su inmediata accesibilidad.

Sensor elegido: SPS30 (Sensirion).

8.1.2.2 Centro de control y procesamiento

Para este módulo se buscó un microcontrolador económico el cual sea capaz de recibir la información de los nodos, procesar y actualizar la base de datos con ellos. A continuación, se muestra una tabla comparativa de algunos modelos tomados en consideración, a partir de lo que existe en el mercado.

Nombre	Precio Aproximado (USD\$)	Disponibilidad	Voltaje de Operación	Pins I/O (Digital y Analógico)	Memoria Flash	Clock	Interfaz	Memoria RAM
Arduino UNO R3	\$ 15	Alta	5 volts	14 D 6 A	32Kb	16MHz	SPI I2C	2Kb

				6 PWM			SERIAL	
Arduino Pro Micro	\$ 11.25	Alta	5 volts	12 D 4 A 5 PWM	32Kb	16MHz	SPI I2C SERIAL	2.5Kb
Teensy 4.0	\$ 50	Media	5 volts	40 D 14 A 31 PWM	2048Kb	600MHz	SPI I2C Serial	1024Kb
Raspberry Pi 4	\$ 150	Alta	3 volts 5 volts	24 D	-	1.5GHz	I2C UART SPI	2Gb
Raspberry Pi Zero W	\$ 80	Alta	3 volts 5 volts	26 D	-	1GHz	I2C UART	512Mb
Beaglebone Black	\$ 162	Alta	5 volts	23 D 7 A 7 PWM	4Gb	1GHz	SPI UART I2C	512Mb
Quark D2000	\$ 25	Baja	3 volts	24 A	32Kb	32MHz	SPI I2C UART	8Kb
Stm32 Blue Pill	\$ 5.5	Alta	5 volt 3 volt	37 D 10 A	64Kb	72MHz	I2C UART CAN SPI	20Kb
ATMEGA328	\$4	Alta	5 volt	9 D 6 A	32Kb	20MHz	USART SPI I2C	2Kb
Kinetis FRDM-K64F	\$40	Muy Alta	3 volt	10 D 5 A 10 PWM	1Mb	32MHz	UART I2c SPI CAN	256Kb

Disponibilidad

A la hora de elegir el controlador, al ser este un elemento central en el diagrama del equipo es importante tener en cuenta su disponibilidad. Tener una baja disponibilidad podría significar que se demoren pruebas debido a que debe esperarse el producto, o que se tenga que utilizar un prototipo con otro modelo disponible y utilizar el anterior para el producto final, lo que agregaría complejidad evitable en la transición de prototipo a producto final. Por ende, aquellos controladores que no tengan disponibilidad alta serán descartados. Además, se destaca la opción Kinetis FRDM-K64F que cuenta con disponibilidad inmediata.

Costo

En cuanto a costo, a partir de lo expuesto se ven que las placas de desarrollo como Arduino poseen costos mayores a 10 \$USD lo cual es explicable por su cantidad de pines y variedad de puertos, sin embargo, el controlador que necesitamos debe conectarse con menos de 10 interfaces, por ende, no es necesario otorgar un excesivo presupuesto para alguna de estas opciones de elevado costo (se destinan hasta \$50). Dicho esto, Stm32 Blue Pill, ATMEGA328, son las dos opciones preferenciales.

Performance e Interfaces

La opción ATMEGA328 tiene ventaja en costo, mientras que Blue Pill Stm32 y la Kinetis FRDM-K64F tienen la ventaja de presentar mayor memoria (tanto RAM como FLASH) y mayor frecuencia de clock, lo cual flexibiliza en gran medida las restricciones de desarrollo del software que se ejecutarán en el controlador. Además, evaluando las hojas de datos de los componentes, se observa que Blue Pill y Kinetis cuentan con mayores cantidades de módulos de comunicación UART y SPI, lo cual también flexibiliza las restricciones en cuanto a cantidad de interfaces y sensores que se pueden llegar controlar (esto es importante para posibles mejoras futuras del equipo).

Finalmente, la placa Blue Pill además de ser un controlador, es una placa con algunos accesorios. Uno de estos accesorios es un regulador de bajo consumo de 3.3 V, el cual es sumamente útil para permitir que en el equipo se incorporen componentes con este nivel de tensión (posiblemente con menor consumo que versiones de componentes con tensión de trabajo de 5V), sin la necesidad de añadir un regulador extra en el módulo de alimentación. En este último caso, la brecha de costos entre ambas opciones se vería reducida.

Elección final

Habiendo analizado estos factores, se decide entre la Kinetis FRDM-K64F y la placa Blue Pill Stm32. Por el costo se decide utilizar la Blue Pill para el diseño final de manera de reducir los costos; sin embargo, para el prototipado se utilizará la Kinetis FRDM-K64F al estar ya familiarizados con el desarrollo en esta placa.

Placa controladora elegida para producto final: Blue Pill Stm32

Placa controladora elegida para prototipo: FRDM-K64F

8.1.2.3 Comunicación

Existen distintas tecnologías posibles para implementar el módulo de comunicaciones de los nodos ya que en principio parecería que la especificación a cumplir es INT-SER-01 (Poder comunicarse de manera Wireless con un servidor web). Sin embargo, se deben tener en cuenta los factores particulares del problema. A continuación, se presenta una tabla para comparar cómo es el desempeño de cada tecnología en las distintas áreas de interés concernientes al proyecto.

Tecnología	Precio	Consumo	Alcance	Velocidad	Cobertura en CABA
Zigbee	Bajo	Bajo	Medio (100m)	Baja(Hasta 250Kbps)	Baja
LoRa	Medio	Bajo	Alto (5-10km)	Baja(Hasta 50Kbps)	Baja
GPRS	Alto	Alto	Muy Alto	Alta(Mbps-Gbps)	Alta
Sigfox	Medio	Muy Bajo	Alto	Muy Baja(<1Kbps)	Baja

Transformando la información de la tabla en pesos relativos que van de 1 a 5 tenemos que:

Tecnología	Precio(P)	Consumo(C)	Alcance(A)	Velocidad(V)	Cobertura en CABA(CC)
Zigbee	5	4	2	3	2
LoRa	3	4	3	2	2
GPRS	2	2	5	5	5
Sigfox	3	5	3	1	3

Los factores se pueden ordenar de mayor a menor importancia en el siguiente orden:

1. Cobertura en CABA
2. Consumo
3. Precio
4. Alcance
5. Velocidad

Teniendo en cuenta dicho ordenamiento, el puntaje final para cada tecnología se relaciona con los pesos relativos según la siguiente fórmula:

$$Puntaje = 0.05V + 0.25A + 0.2P + 0.25C + 0.25CC$$

Tecnología	Puntaje Final
GPRS	3.65
Sigfox	3.4
Zigbee	3.15
LoRa	2.95

Por lo que la mejor tecnología para el problema parecería ser GPRS. Se destacan su gran alcance y cobertura en ciudades y lugares con altas interferencias.

Por lo que se elige el módulo GSM SIM800L que cuenta con las siguientes características:

Modelo	Consumo	Tasa de emisión de datos (Kbit/seg)	Alimentación(V)	Costo(USD)
GSM SIM800L	500mA(max) 0.7mA (Standby)	85.6	5	7

8.1.2.4 Medición de temperatura, humedad y presión

Para este módulo se buscan tecnologías que busquen las especificaciones FUN-AMB-03, FUN-AMB-04, PER-AMB-05, IMP-OPE-01, IMP-OPE-02.

Los modelos presentados en la siguiente tabla cumplen las especificaciones mencionadas. Es de importancia crítica que la tecnología a implementar sea de bajo costo, bajo consumo energético y que tenga cobertura en CABA.

Modelo	Parámetros	Interfaces	Consumo(μA)	Costo
BME280 (bosch)	Temperatura, humedad, presión atmosférica	I2C, SPI	1.8 (H, T) 0.1(Sleep)	10USD
DHT22 (Aosong Electronics)	Temperatura, humedad	1-Wire	1500(Medición) 50(Standby)	8USD

Para realizar la elección asignamos pesos relativos de 1 a 5, a las dos opciones para las siguientes categorías:

1. Consumo

2. Precio

Modelo	Consumo(C)	Precio(P)
BME280 (bosch)	5	1
DHT22 (Aosong Electronics)	1	2

Asignamos el puntaje final según:

$$Puntaje = 0.7C + 0.3P$$

Modelo	Puntaje
BME280 (bosch)	3.8
DHT22 (Aosong Electronics)	1.3

Por lo que el sensor a utilizar es el BME 280 de Bosch.

8.1.2.5 Almacenamiento

Para cumplir con la especificación PER-SER-01 se contará con un compartimiento para tarjeta SD, en el cual puede ingresarse una tarjeta, y debe poder ser accedida por un controlador. La opción más económica disponible en el mercado es un módulo marca Arduino, que posee el alojamiento de tarjeta, y un chip ATMEGA328 incorporado que se encuentra conectado a pines de alimentación y comunicación SPI. Estos módulos pueden variar según su nivel de tensión y su compartimiento de tarjeta SD o “micro” SD.

Modelo	Costo de Módulo (\$USD)	Costo de tarjeta SD 32Gb (\$USD)
SD – 5V y 3.3V	1.1	3.2
Micro SD – 5V y 3.3V	1.1	3.2
Micro SD – 3.3V	1	3.2

Elección

Se puede observar que entre los módulos no existe diferencia significativa en precio, y en el mercado da los mismo elegir SD y Micro SD en cuanto a precio, sin embargo, es más usual la

utilización de Micro SD. Por lo tanto, se elige el modelo Micro SD 5V y 3.3V, ya que provee la mayor compatibilidad en cuanto a tarjeta y en cuanto a nivel de tensión.

8.1.2.6 Alimentación

Para definir los componentes del módulo de alimentación, es crucial conocer la tensión que se debe proveer para que funcionen correctamente los demás módulos, y además se debe tener en cuenta la capacidad necesaria por la especificación RAM-CON-01 sobre autonomía.

Para tener en cuenta esto, se estudia el siguiente cuadro, con los consumos de los componentes principales que se han seleccionado para cada módulo y sus niveles de tensión.

Módulo	Consumo medio (mA)	Consumo máximo (mA)	Tensión (V)
Centro de control	0.3	100	3.3V
Comunicación	0.7	500	5V
Almacenamiento	0.12	40	5V
Medición de PM	0.16	65	5V
Medición de T y H	0.01	0.01	3.3V

Resultados totales

Consumo medio = 3 mA

Consumo máximo = 705 mA

Niveles de tensión: 5 V y 3.3 V

Debe aclararse que para calcular el consumo medio se consideraron dos niveles de consumos: el consumo en estado “stand-by” (mientras no se realizan mediciones ni comunicaciones), y el consumo activo. Sabiendo que el equipo entra en estado activo en 4 ocasiones por hora, como lo indica la especificación PER-AMB-01, entonces:

Tiempo de estado activo aproximado: 2 seg

Tiempo de estado activo en una hora: $4 \times (2 \text{ seg}) = 8 \text{ seg}$

Porcentaje de estado activo en una hora = $\frac{8 \text{ seg}}{3600 \text{ seg}} \times 100\% = 0.22\%$

$$C_{\text{medio}} = C_{\text{máximo}} \times (0.0022) + C_{\text{stand-by}} \times (1 - 0.0022)$$

Habiendo estudiado el consumo de los otros módulos, y sus niveles de tensión, para satisfacer estos requisitos, el módulo de alimentación debería satisfacer con un regulador de tensión de 5V y otro de 3.3V. Además, debe poder cumplir con la autonomía indicada en las especificaciones de diseño, con una batería o pila portable.

Teniendo en cuenta el consumo medio calculado, sumado al consumo de los reguladores existentes en el mercado, es conveniente considerar que la pila o batería a utilizar debería soportar un consumo medio de 5 mA, durante un tiempo de 30 días.

Dicho esto, se procede a realizar una selección de las pilas/baterías que existen en el mercado, que puedan cumplir lo anteriormente expuesto.

Tecnología	Costo (USD\$)	Capacidad (mAh)	Tamaño	Tensión (V)
Pila recargable LCR 26650 Marca: MOTOMA	9	5000	medio	3.7
Pila recargable LCR 18650 Marca: MOTOMA	4.5	2600	pequeño	3.7
Pila recargable AAA (Modelo: NH-AAA-B4GN)	5.4	900	pequeño	1.2
Pila AA recargable NI/MH(VARTA 56706)	3.6	2100	medio	1.2
Pila AA de litio recargable (Modelo: 14500)	5	1200	medio	3.7
Pila AA de litio recargable (Modelo: 18650)	7.8	1500	medio	3.7
Pila NO recargable Marca: MOTOMA	8	14000	medio	3.7
Batería Recargable MS4V4.5Ah Marca: MOTOMA	3.8	4500	grande	4
Batería Recargable MS6V4ah Marca: MOTOMA	4	4000	grande	6

Sabiendo que el consumo de la pila será de 5 mA durante al menos 30 días, la capacidad de la pila debe ser:

Capacidad mínima > 30 días x 24 horas x 5 mA = 3600 mAh.

Esto deja de lado a todas las pilas de la tabla que no lleguen a esta capacidad. Por lo que la batería recargable MOTOMA de 4500 mAh, la batería MOTOMA de 4000 mAh, la pila recargable 26650 MOTOMA de 5000 mAh y la pila recargable MOTOMA de 2600 mAh son las cuatro opciones preferenciales.

Entre estas cuatro opciones, se elige la batería recargable de 3.7V, por el hecho de ser recargable y además tener menor costo frente a las demás pilas.

Pila elegida: Pila recargable LCR 18650 marca MOTOMA.

Por otro lado, se procede a analizar la selección de los reguladores de tensión que conforman el módulo de alimentación.

A partir de los 3.7V de la pila elegida, se tiene que regular 5V y 3.3V para satisfacer las tensiones de alimentación de los componentes. Se comparan entonces las distintas opciones disponibles en el mercado.

Para regulador de 5V:

Modelo	Tecnología	Corriente máxima	Eficiencia	Precio
7805	Lineal	1.5 A	< 75%	0,4 USD
MT 3608	Switching Boost	4 A	97%	1 USD
LTC1871	Switching Boost	6 A	96%	5 USD

En primer lugar en la selección se descartan los reguladores lineales de 5V. A pesar de su precio favorable, por su tecnología no pueden regular 5V con una tensión de pila de 3.7V

En segundo lugar, tanto el regulador switching MT 3608 como el LTC1871 pueden regular los 5V, con una tensión máxima de salida y una eficiencia lo suficientemente elevadas.

Como ambos reguladores cumplen con todos los requisitos técnicos, se elige el MT 3608 por ser el de menor costo.

Regulador de 5V elegido: MT 3608

Para regulador de 3.3 V:

Modelo	Tecnología	Corriente máxima	Eficiencia	Precio
7833	Lineal	1 A	< 75%	0,5 USD
LM 2596	Switching Buck	3 A	97%	1,2 USD
RT 9193	Switching	0,3 A	97%	0 USD (interno a placa del controlador)

Como primera medida se descarta el regulador lineal debido a que necesita una tensión de pila mayor a 3.7V para poder regular 3.3V.

Entonces queda comparar el regulador switching LM 2596 con el RT9193.

Es importante aclarar que el regulador RT 9193 está incorporado a la placa del microcontrolador Blue Pill que ha sido elegido como el módulo de procesamiento del producto. Es por esto que en caso de utilizar este regulador no aportaría un costo extra y también se evitaría añadir más complejidad al diseño con un regulador externo.

Por otro lado, aunque el RT 9193 sea preferible en costo y complejidad ante el LM2596, este último presenta la ventaja de una mayor corriente máxima de salida.

Sin embargo, el regulador de 3.3V sólo suministrará energía al centro de procesamiento y al sensor de temperatura, que requieren como máximo 105 mA. Por lo tanto los 300 mA de corriente máxima del RT 9193 son suficientes y entonces este es el regulador elegido.

Regulador de 3.3V elegido: RT 9193 (interno a placa de microcontrolador).

8.1.2.7 Medición de nivel de batería

La especificación INT- APP -03, que dice que se debe medir el nivel de batería del nodo, impone la necesidad de medir la tensión de las baterías y comunicarlás al procesamiento del microcontrolador. Esto se traduce en la especificación de contar con un ADC que pueda medir la tensión de las baterías.

A continuación se comparan tres ADC diferentes, dos de ellos externos (con mayor disponibilidad en el mercado) mientras que el otro es interno al micro controlador:

Modelo	Rango de tensiones	Consumo medio	Resolución	Interfaz	Precio
ADC pcf8591	0 a 5V	< 100 uA	8 bits	I2C	5 USD
ADC ads 1115	0 a 5V	< 100 uA	16 bits	I2C	4 USD
Interno del controlador	0 a 3.3V	< 100 uA	16 bits	interna	0 USD (interno del microcontrolador)

Como primera medida vale aclarar que sería una gran ventaja utilizar el ADC interno del microcontrolador para sensar la tensión de las baterías de manera que no se agregue complejidad y costo al hardware con un ADC externo.

Sin embargo, no es posible utilizar este ADC interno ya que obligatoriamente es alimentado a 3.3V y no puede medir tensiones de 3.7V de la pila. Por ende se descarta esta opción y se debe elegir entre los ADC ads 1115 y pcg 8591.

Entre estos dos ADC externos es conveniente el pcf8591 en cuanto a costo, pero el modelo ads 1115 es preferible en cuanto a precisión.

Se decide penalizar la resolución del ADC en mayor grado que el costo para asegurarse de minimizar el error de la medición del nivel de batería.

Por lo tanto se elige el modelo ads 1115 que otorga una resolución 256 veces mayor que el modelo pcg 8591, con un costo que no supera los límites establecidos por el cliente, y con una interfaz I2C compatible con el microcontrolador.

Elección: ADC externo modelo ads 1115.

8.1.3 Elección de una solución

De acuerdo a las opciones presentadas y la comparación entre ellas llegamos a las siguientes elecciones de diseño para implementar el prototipo del nodo de medición:

Módulo	Elección	Costo Unitario (\$USD)
Medición de PM	SPS 30 de Sensirion	30
Medición de temperatura y humedad	BME280 de Bosh	10
Comunicación	SIM800I	7
Centro de control y procesamiento	Kinetis FRDM-K64F	40
Alimentación	Batería Recargable LCR 18650 Marca: MOTOMA	4.5
Alimentación	Regulador Boost MT 3608	1
Medición de batería	ADC ads 1115	5
Almacenamiento	Módulo micro SD 5v/3.3v	1.1

8.1.4 DFMEA

Módulo	Efectos de la falla	Modo de la falla	Severidad	Causas de la falla	Ocurrencia	Controles actuales	Detección	RPN	Acción recomendada	Control agregado	Severidad	Ocurrencia	Detección	RPN
Medición de Aire	Muestra valores nulos de PM	No funciona el láser interno del sensor	5	Falla de fábrica	2	Se reciben mediciones periódicamente, si se reciben valores nulos, es posible que haya una falla en el sensor	2	20	Mantenimiento: Cambio de sensor	Se envía un comando desde la app para confirmar que el nuevo sensor funciona	5	2	2	20
Almacenamiento	Se pierden mediciones	No se pueden guardar mediciones	4	Falla de la tarjeta SD	1	-	3	12	Diseño: monitorear el funcionamiento de la tarjeta SD	Revisar si se puede escribir en y leer de la tarjeta con cierta periodicidad	4	1	2	8
Alimentación	El dispositivo se quema	Brinda tensión demasiado alta	5	La batería no corresponde	2	-	3	30	Documentación: Detalle de batería requerida en manual de usuario	-	5	1	3	15
Alimentación	El dispositivo no envía mediciones	El dispositivo no está energizado	5	La batería se agotó	3	El dispositivo envía el nivel de batería al servidor	3	45	Diseño: Enviar keep-alive y avisar cuando el nivel de batería sea insuficiente para realizar sus funciones	Se agrega keep-alive y se ajusta la frecuencia de envío del nivel de batería	5	3	2	30
Alimentación	El dispositivo no enciende	No está energizado	5	La batería se agotó pasado el tiempo de autonomía especificado	2	El dispositivo envía el nivel de batería al servidor	3	30	Mantenimiento: Cambio de batería Diseño: Compartimiento para cambiar batería	-	5	1	3	15
Comunicación	Se pierden mediciones	No conecta el módulo SIM con el servidor	4	La red GPRS no está disponible	4	-	2	32	Diseño: Se agrega una tarjeta SD para guardar las mediciones de manera de no perderlas.	-	2	4	2	16
Protección de Entorno	No enciende el dispositivo	Se sobrecalienta el dispositivo	5	Temperatura muy alta dentro del dispositivo	3	-	2	30	Diseño: se agrega un mecanismo de protección frente a altas temperaturas del sistema	Se agrega software para apagar el equipo y evitar fallas graves	5	1	2	10
Protección de Entorno	No enciende el dispositivo	Fallan las conexiones eléctricas entre los módulos	5	Humedad relativa del ambiente muy alta	3	-	2	30	Diseño: se agrega un mecanismo de protección frente a altas humedades de ambiente	Se agrega software para apagar el equipo y evitar fallas graves	5	1	2	10
Centro de Control	El dispositivo no funciona	No enciende	5	Le entró agua al dispositivo	3	-	2	30	Diseño: se busca un compartimiento a prueba de lluvias (IP 65)	-	5	1	2	10
Dispositivo	No prende el dispositivo	No cumple ninguna función	5	No fue inicializado	2	-	3	30	Diseño: Incorporar led de estado (ON) para asegurarse que fue inicializado	Se revisa que el led esté encendido	5	2	1	10

severidad	ocurrencia	detección	
no tiene efectos en la funcionalidad	ocurre de manera excepcional	se puede detectar de manera sencilla antes de su ubicación definitiva	1
performance de funcionalidad secundaria reducida	ocurrencia baja	se puede detectar a distancia (ya ubicado en su sitio definitivo)	2
pérdida de funcionalidad secundaria	ocurrencia ocasional	se podría detectar a distancia pero no se implementa	3
riesgo grave para la funcionalidad del dispositivo, pero puede recuperarse	ocurrencia alta, ocurre seguido	no se puede detectar a distancia, bajas chances de detección una vez en su sitio definitivo	4
el dispositivo queda inutilizable	ocurre, excepto excepciones	no se puede detectar	5

Nivel de IC		
Aceptable	IC ≤ 24	
Bajar hasta razonablemente práctico	24 < IC ≤ 44	
No Aceptable	IC > 44	
Considerado en el diseño del producto final		

Figura 8.3: DFMEA de diseño modular

8.2 Factibilidad de tiempos

En primer lugar se enumeran y describen las tareas:

1. *Especificaciones del medidor de PM*: partiendo de los requerimientos se definen las especificaciones funcionales, de interfaz, performance, implementación, y de servicios.
2. *Elección de componentes*: se investigan tecnologías existentes y aplicables para un nodo de medición low-cost, y de bajo consumo para una alta autonomía. Se evalúan diferentes alternativas para cada módulo y posibles implementaciones y se eligen los componentes a utilizar en el prototipo.
3. *Elección de Modelo de Negocios*: involucra realizar una evaluación de viabilidad económica planteando como modelo de negocios la venta del producto, calculando el VAN y TIR teniendo en cuenta precios del mercado.
4. *Revisión de especificaciones*: se analizan las especificaciones luego de haber elegido una solución, que son los componentes a utilizar, y luego de haber elegido el modelo de negocios y especificado el costo del dispositivo.
5. *Diseño del Hardware*: consiste en el diseño de la placa: las ubicaciones del integrado, sensores, batería, cableado.
 - 5.1.1. *Módulo de medición de aire (#AIR)*
 - 5.1.2. *Módulo centro de control y procesamiento (#PROC)*
 - 5.1.3. *Módulo de temperatura y humedad (#T&H)*
 - 5.1.4. *Módulo de almacenamiento (#ALMA)*
 - 5.1.5. *Módulo de alimentación (#ALIM)*
 - 5.1.6. *Módulo de comunicación (#COM)*
6. *Diseño de Software*: esta actividad se divide en dos diseños; en primer lugar, todo lo que involucra la aplicación móvil/web-app eligiendo las funcionalidades que debe tener para que sea intuitiva para el usuario y cumpla las especificaciones de interfaz, y por otro lado el diseño del código necesario para la comunicación servidor-nodo teniendo en cuenta la red elegida, y demás servicios back-end.
 - 6.1. *Software del firmware del controlador*
 - 6.2. *Software del servidor y web-app*
7. *Obtención de Componentes*: se realiza el pedido de los componentes necesarios para la realización del prototipo. Finaliza cuando se recibe la totalidad de los componentes.
8. *Construcción del prototipo*: involucra el tiempo que tarda la placa en ser realizada, como también el soldado de los componentes y la integración con el software.
9. *Pruebas de Desarrollo*: Consiste en la integración entre módulos y en realizar las pruebas necesarias para comprobar el funcionamiento del dispositivo. Finaliza una vez verificado que cumple sus funciones, por ejemplo, que se recibe una medición en el servidor y su valor se muestra en el mapa, más allá de la posterior validación. Se divide en:
 - 9.1.1. *Integración #AIR-#PROC*
 - 9.1.2. *Integración #T&H -#PROC*
 - 9.1.3. *Integración #ALMA -#PROC*
 - 9.1.4. *Integración #ALIM -#PROC*
 - 9.1.5. *Integración #COM-#PROC*
 - 9.1.6. *Integración #COM-#APP*
 - 9.1.7. *Prueba medición de PM y visualización de datos en la página web*
10. *Validación del prototipo*: involucra la preparación de cada banco de pruebas y se realizan los tests acordes a cada uno, teniendo en cuenta las dependencias entre tests. Concluye cuando se finalizan todos los tests y los mismos pasan el criterio de aceptación.
 - 10.1.1. *Tests relacionados al banco de pruebas 1*
 - 10.1.2. *Tests relacionados al banco de pruebas 2*
11. *Estudios de Confiabilidad de Hardware y de Software*.

Actividades	Inicio	Duración (días)	Fin	Predecesoras
1. Especificaciones del medidor de PM	11-03-20	14	25-03-20	-
2. Elección de componentes	15-06-20	10	25-06-20	1
3. Elección de Modelo de Negocios	15-06-20	28	13-07-20	2
4. Revisión de especificaciones	26-06-20	6	02-07-20	2, 3
5. Diseño del Hardware	26-06-20	37	02-08-20	
5.1. Módulo de medición de aire (#AIR)	26-06-20	15	11-07-20	2
5.2. Módulo centro de control y procesamiento (#PROC)	10-07-20	11	21-07-20	5.1, 5.3, 5.4, 5.6
5.3. Módulo de temperatura y humedad (#T&H)	26-06-20	6	02-07-20	2
5.4. Módulo de almacenamiento (#ALMA)	26-06-20	6	02-07-20	2
5.5. Módulo de alimentación (#ALIM)	20-07-20	13	02-08-20	5.2
5.6. Módulo de comunicación (#COM)	26-06-20	13	09-07-20	2
6. Diseño de Software	26-06-20	188	31-12-20	
6.1. Software del firmware del controlador	26-06-20	138	11-11-20	2
6.2. Software del servidor y web-app	20-10-20	72	31-12-20	2
7. Obtención de Componentes	30-07-20	103	10-11-20	5.2, 5.5
8. Construcción del prototipo	09-11-20	221	18-06-21	
9. Pruebas de Desarrollo	17-06-21	107	02-10-21	6.1, 6.2
9.1. Integración #AIR-#PROC	21-07-21	19	09-08-21	9.4
9.2. Integración #T&H-#PROC	20-07-21	14	03-08-21	9.4
9.3. Integración #ALMA-#PROC	01-09-21	17	18-09-21	9.1, 9.2, 9.4, 9.6
9.4. Integración #ALIM-#PROC	17-06-21	34	21-07-21	8
9.5. Integración #COM-#PROC	20-07-21	24	13-08-21	9.4
9.6. Integración #COM-#APP	13-08-21	19	01-09-21	9.5
9.7. Prueba medición de PM y visualización de datos	11-09-21	21	02-10-21	9.1, 9.2, 9.4, 9.5, 9.6
10. Validación del prototipo	01-10-21	60	30-11-21	
10.1. Tests relacionados al banco de pruebas 1	01-10-21	29	30-10-21	9.3, 9.7
10.2. Tests relacionados al banco de pruebas 2	30-11-21	0	30-11-21	10.1
11. Estudios de Confiabilidad de Hardware y de Software	30-11-21	39	08-01-22	10.2

8.2.1 Gantt - PERT - CPM

Para realizar el diagrama de Gantt se utilizó el software Jira que permite no sólo relacionar las tareas entre sí (predecesoras, antecesoras), sino también, mostrar el camino crítico del proyecto. La herramienta entonces, muestra el diagrama de Gantt y el PERT. Además, se utilizaron tiempos determinísticos, es decir, no probabilísticos, por esto no se realizó una simulación de Montecarlo.

En el diagrama Gantt y PERT que se puede observar a continuación, en naranja aparece el camino crítico (CPM). El proyecto tiene sus inicios en Marzo del 2020 y finaliza en Febrero de 2022. Debido al contexto de pandemia, algunas actividades se extendieron en el tiempo ya que el equipo tuvo dificultades para juntarse presencialmente y trabajar en el prototipo y además hubo retrasos administrativos para conseguir los componentes durante la cuarentena. Entre las actividades afectadas se encuentra la Obtención de Componentes, Construcción de Prototipo y Pruebas de Desarrollo.

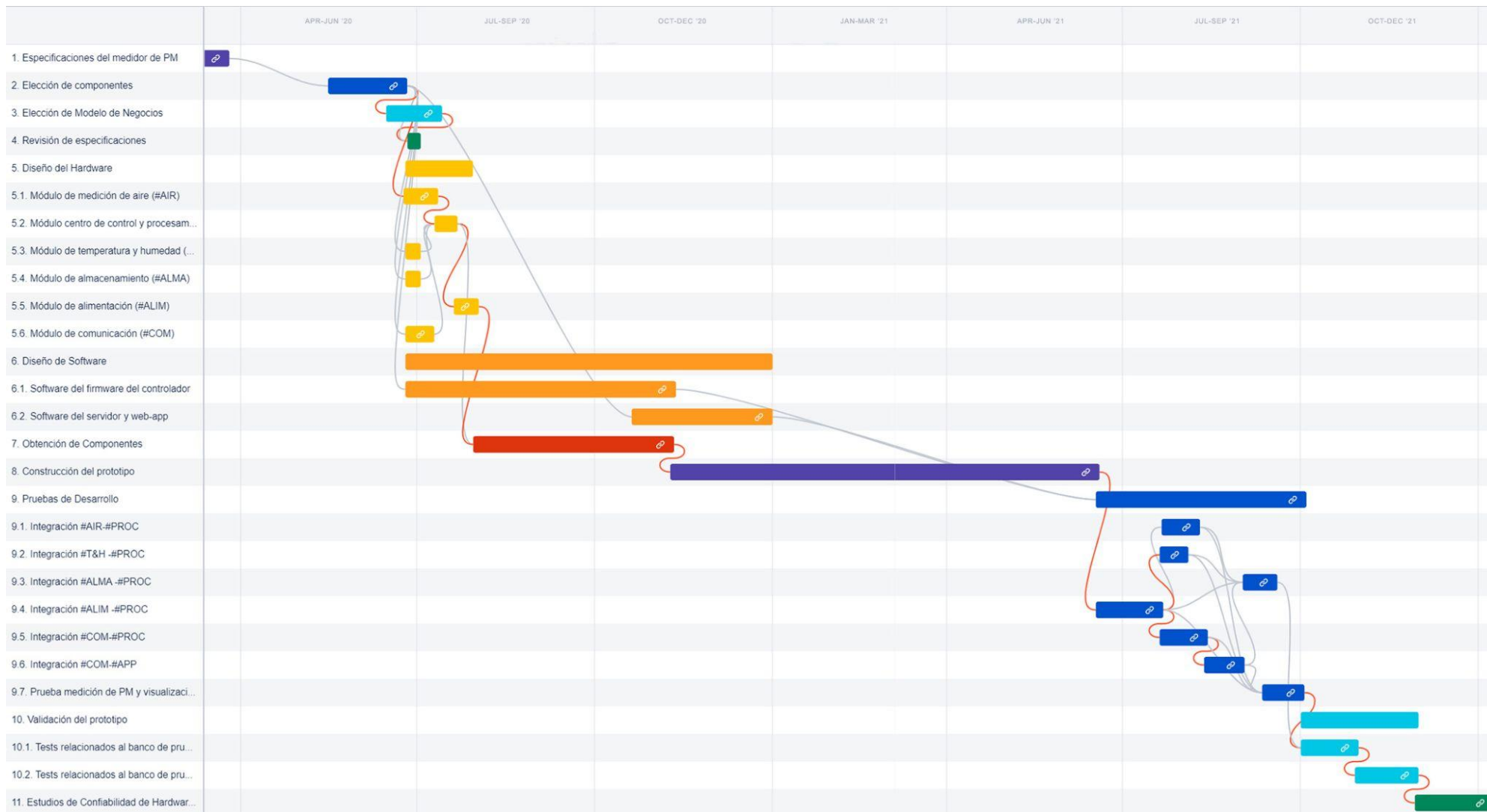
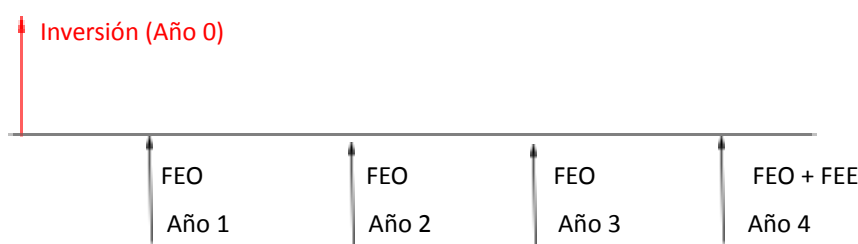


Figura 8.4: Diagrama de Gantt y PERT del proyecto. El Camino crítico del proyecto se puede observar en color naranja.

8.3 Factibilidad económica

El modelo de negocios del proyecto consta de una inversión inicial para la realización del diseño, para luego obtener un flujo de explotación operativo (FEO) a lo largo del tiempo, hasta la finalización del proyecto en donde también puede generarse un flujo de explotación extraordinario (FEE). El tiempo considerado en la evaluación de proyecto es de 4 (cuatro) años ya que se considera el tiempo mínimo para el cual una competencia o mejora del producto logre desarrollarse e instalarse en Argentina, más específicamente en C.A.B.A.



En este esquema de modelo de negocios, se estudia la factibilidad con el enfoque de venta de nodos como producto para generar los fondos de explotación ("Modelo de Negocio de Producto").

A continuación, se evalúa este modelo.

8.3.1 VAN y TIR de modelo de negocio de producto

En primer lugar, se identifican los siguientes factores que afectan el monto de inversión.

Categoría	ID Inversión	Detalle	Presupuesto (USD)
Diseño prototipo	INV-PROT-MED-1	Sensor de PM 2.5 y PM 10, marca "Sensirion"	\$ 50.00
	INV-PROT-MED-2	Sensor de temperatura y humedad BME 280 de Bosch	\$ 10.00
	INV-PROT-MED-3	ADC ads 1115	\$5.00
	INV-PROT-CON-1	Microcontrolador FRDK 64	\$40.00
	INV-PROT-ALM-1	Compartimiento SD genérico compatible tipo Arduino	\$ 2.00
	INV-PROT-ALI-1	Pilas MOTOMA LCR 18650	\$ 4.00
	INV-PROT-ALI-2	Compartimiento batería intercambiable	\$ 1.00
	INV-PROT-ALI-3	Regulador MT 3608	\$1.00
	INV-PROT-COM-1	Módulo SIM800I	\$ 4.00
	INV-PROT-ENT-1	Placa pertinax, desacoples, level shifter, regulador	\$ 10.00
	INV-PROT-INT-1	Integración prototipo, estimado de fabricación de PCB	\$ 2.00
	Subtotal prototipo	INV-PROT	\$ 129.00
Validación	INV-VAL-TB1-1	Tarjeta SD de X capacidad - interfaz del banco de pruebas	\$ 3.00
	INV-VAL-TB1-2	Baterías Intercambiable - interfaz del banco de pruebas	\$ 4.00

Subtotal validación	INV-VAL		\$ 7.00
Capital operativo	INV-CAP-OPE-1	Caja inicial para solventar gastos de logística y viáticos	\$ 10.00
	INV-CAP-OPE-3	Muebles para lugar de trabajo, soldador, instrumento de medición para corroborar correcto armado del nodo. (al final del proyecto se pueden recuperar a la mitad de su valor).	\$ 250.00
	INV-CAP-OPE-4	Capital para solventar gastos de prototipo y validación	\$ 160.00
	INV-CAP-OPE-5	Capital para solventar gastos de alquiler los primeros 3 meses.	\$ 330.00
Subtotal capital operativo	INV-CAP		\$ 750.00
INVERSIÓN TOTAL	IN-TOTAL	INV-PROT + INV-VAL + INV-CAP	\$ 886.00

Tabla 8.7: Monto de inversión

En el monto de inversión entonces se tiene en cuenta el costo de un prototipo, el monto asociado a las validaciones y un capital operativo para poder comenzar el proyecto.

Aclaraciones de costos del hardware

Antes de continuar con el análisis económico se debe diferenciar el costo del prototipo con el del producto final.

El costo del producto final difiere del costo del prototipo principalmente en dos componentes: Sensor de PM y microcontrolador.

Por un lado el microcontrolador utilizado en el producto final es el STM32 (Blue Pill) que tiene un precio de 5 USD contra 40 USD de la placa FRDK 64, lo que equivale a un costo de 35 USD menor del producto con respecto al prototipo.

Por otro parte, el precio del sensor de PM para el prototipo es de 30 USD y se le suman 20 USD de costo de importación dando un total de 50 USD. Sin embargo, para el producto final se considera el precio por mayor de 20 unidades que es de 25 USD por unidad. En cuanto al precio de importación, se prorratea 1 USD por cada unidad lo que resulta en un costo del sensor de PM para producto final de 26 USD, lo que significa un costo de 24 USD menor con respecto al prototipo.

Entonces, el producto final es $(24 \text{ USD} + 35 \text{ USD}) = 59 \text{ USD}$ más económico que el prototipo. En total el costo del nodo de medición como producto final es de 70 USD.

Flujo de fondos

Para realizar el flujo de fondos se deben tener en cuenta los siguientes valores expresados en dólares (USD):

Costo por nodo de medición	\$ 70
Precio de Venta por nodo	\$ 300
Alquiler mensual y servicios de lugar de trabajo	\$ 110
Impuesto a las ganancias	35%
Valor de libro de capital operativo INV-CAP-OPE-3	\$ 0
Amortización anual de capital operativo INV-CAP-OPE-3	\$ 50 (5 años)
TREMA	20%

Tabla 8.8: Consideraciones fiscales y económicas

Se puede notar que el precio de venta del nodo se fijó en 300 USD encontrándose un 25% por debajo del límite de 400 USD establecido por el cliente. Además este precio representa una ganancia bruta de 229.5 USD por nodo vendido.

En cuanto al valor de alquiler, servicios, impuestos a las ganancias y TREMA, se consideró el valor típico de CABA, Argentina.

Dicho esto, para continuar debe estimarse y proyectar cuántas unidades de medición serán vendidas por año. Como se explicó anteriormente en la sección de relevamiento de datos (6.1.1), a partir de la variabilidad espacial del PM y de la superficie de CABA se estableció la necesidad de 500 nodos, los cuales serán adquiridos por APrA a lo largo de los 4 años que abarca el análisis, y lo hará priorizando las zonas más transitadas y cercanas a centros de polución.

Por lo tanto las ventas proyectadas a cuatro años son las siguientes:

Año	Venta proyectada (unidades)	Clientes
1	150	APrA
2	150	APrA
3	100	APrA
4	100	APrA

Tabla 8.8: Ventas proyectadas por año

Entonces, para cada uno de los cuatro años se tienen los siguientes flujos de fondos ordinarios:

Primer Año:

Importe Vendido	\$45,000.00
Costo de unidades vendidas	\$10,500.00
Costos Fijos (Anual)	\$1,320.00
Ganancia antes de amortización e impuestos	\$33,180.00
Amortizaciones	\$50.00
Ganancias después de amortizar y antes de impuestos	\$33,130.00
Ganancia Neta (Luego de impuestos)	\$23,191.00

Segundo Año:

Importe Vendido	\$45,000.00
Costo de unidades vendidas	\$10,500.00
Costos Fijos (Anual)	\$1,320.00
Ganancia antes de amortización e impuestos	\$34,380.00
Amortizaciones	\$50.00
Ganancias después de amortizar y antes de impuestos	\$33,130.00
Ganancia Neta (Luego de impuestos)	\$23,191.00

Tercer Año:

Importe Vendido	\$30,000.00
Costo de unidades vendidas	\$7,000.00
Costos Fijos (Anual)	\$1,320.00
Ganancia antes de amortización e impuestos	\$21,680.00
Amortizaciones	\$50.00
Ganancias después de amortizar y antes de impuestos	\$21,630.00
Ganancia Neta (Luego de impuestos)	\$15,140.00

Cuarto Año:

Importe Vendido	\$30,000.00
Costo de unidades vendidas	\$7,000.00
Costos Fijos (Anual)	\$1,320.00
Ganancia antes de amortización e impuestos	\$21,680.00
Amortizaciones	\$50.00

Ganancias después de amortizar y antes de impuestos	\$21,630.00
Ganancia Neta (Luego de impuestos)	\$15,140.00

En resumen:

AÑO	0	1	2	3	4
INVERSIÓN	-\$2,756.00				
FEO		\$23,191.00	\$23,191.00	\$15,140.00	\$15,140.00
FEE					\$125.00
TOTALES	-\$2,756.00	\$23,191.00	\$23,191.00	\$15,140.00	\$15,140.00

$$VAN(20\%) = -2756 + \frac{23191}{1.2} + \frac{23191}{1.2^2} + \frac{15140}{1.2^3} + \frac{15140}{1.2^4} = 48737.58 > 0$$

Lo que equivale a una TIR > TREMA = 20%

La evaluación de proyecto en este estudio de factibilidad económica, indica que es conveniente económicamente realizar este proyecto.

8.4 Factibilidad legal y responsabilidad civil (regulaciones y licencias)

8.4.1 Tipo de Sociedad Mercantil

Para la formación de la sociedad encargada de producir en masa el producto final se tomó la elección de formar una sociedad de responsabilidad limitada (SRL). Se toma esta elección en base a que la responsabilidad está limitada al capital aportado a la sociedad. También es un buen puesto de partida para la sociedad ya que esta misma requiere cumplir ciertas características como (Ley 19550 de sociedades comerciales):

- División del capital social en cuotas.
- Máximo de 50 socios
- Suscripción íntegra del capital social en especie. Los valores en dinero deben integrarse el 25% como mínimo y completarse dentro de los 2 años siguientes.
- No se exige capital mínimo.

A su vez, en la sociedad de responsabilidad limitada el capital se integra por los aportes de todos los socios y estos mismos no responden a las deudas sociales personalmente. De crecer en el futuro la sociedad puede pasar a formar parte de una sociedad anónima (S.A.), la cual consta de accionistas y es apropiada para emprendimientos de gran envergadura.

8.4.2 COPITEC

Como profesionales en Ingeniería electrónica, se debe seguir el código ético impuesto por el correspondiente colegio profesional. En el caso de la ingeniería electrónica, este es el Consejo

Profesional de Ingeniería de Telecomunicaciones, Electrónica y Computación (COPITEC). Este se encuentra plasmado en el Código de ética profesional, correspondiente al decreto N 1099/84. Cabe destacar especialmente el punto 2.3.1.1: “No ofrecer, por medio alguno, la prestación de servicios cuyo objeto, por cualquier razón de orden técnico, jurídico, reglamentario, económico o social, etc., sea de muy dudoso o imposible cumplimiento, o si por sus propias circunstancias personales el profesional no pudiese satisfacer.” Lo cual enfatiza la pertinencia de la correcta aplicación del banco de pruebas para garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo final.

8.4.3 Contaminación Electromagnética

Al día de la realización del proyecto no se sancionó una ley sobre la contaminación electromagnética emitida por los dispositivos electrónicos por lo que se debe basar los parámetros de esta en la Resolución 202/95 por el ministerio de salud y acción social en conjunto con ENACOM (Ente Nacional de Comunicaciones). Esta misma regula, vigila, evalúa y controla la exposición electromagnética. En cuanto a la exposición de la población, indica que:

La exposición de la población en general a campos EM de RF, correspondiendo a frecuencias por encima de 10 MHz, no debe exceder 1 SAR_{prom}. CE de 0,04 W/kg. a 0,08 W/kg. (valor promediado sobre cualquier período de 30 minutos -0,5 hora-) o un SAR_{loc}. máx de 0,4 - 0,8 W/kg (valor promediado sobre cualquier período de 30 minutos -0.5 hora-) y gramo de tejido correspondiente a cualquier región localizada en la masa corporal (tabla VII, figuras 2 y 3) Para la exposición de radiación de RF a frecuencias inferiores a 10 MHz, los niveles de intensidad de campo eléctrico o magnético (RMS) no perturbado no debe exceder los valores dados en la tabla VII (la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de E y H). Los límites de exposición a RF para la población en general, dados en dicha tabla VII, para el ámbito de frecuencias entre 10 MHz y 300.000 MHz son límites funcionales derivados del valor SAR _{prom}. CE de 0.04 - 0.08 W/kg.

8.4.4 Ley Nacional de Telecomunicaciones

Las telecomunicaciones usadas en el dispositivo tienen que ir de acuerdo con la ley N 19.798 (Ley Nacional de Telecomunicaciones).

8.4.5 Alarma de contaminación atmosférica

La ley N 20.284 funciona como plan de prevención de situaciones de contaminación atmosférica. Esta misma ley debe ser contemplada por el dispositivo a la hora de alarmar como consecuencia de niveles altos de contaminación. Así mismo, esta misma respalda el proyecto presentado ya que obliga a la autoridad sanitaria nacional a “...estructurar y ejecutar un programa de carácter nacional que involucre todos los aspectos relacionados con las causas, efectos, alcances y métodos de prevención y control de la contaminación atmosférica.” Esta misma ley también elabora un plan de respuesta a un nivel de contaminación alto y la consecuente sanción al accionador. Se fijan tres niveles de peligro ante contaminación. Estos son alerta alarma y emergencia. A continuación, se muestra la tabla presente en la ley:

Contaminante (`unidad)	Norma calidad de aire	Alerta	Alarma	Emergencia
CO (1) (ppm)	10 ppm - 8 hs. 50 ppm - 1 h.	15 ppm - 8 hs. 100 ppm - 1 h.	30 ppm - 8 hs. 120 ppm - 1 h.	50 ppm - 8 hs. 150 ppm - 1 h.
NO x (2) (ppm)	0,45 ppm - 1 h.	0,6 ppm - 1 h. 0,15 ppm - 24 hs.	1,2 ppm - 1 h. 0,3 ppm - 24 hs.	0,4 ppm - 24 hs
SO2 (3) (ppm)	0,03 ppm (70 ug/m3) (promedio mensual)	1 ppm - 1 h. 0,3 ppm - 8 hs.	5 ppm - 1 h.	10 ppm - 1 h.
O3 (y oxidantes en general) (4) (ppm)	0,10 ppm - 1 h.	0,15 ppm - 1 h.	0,25 ppm - 1 h.	0,40 ppm - 1 h.
Partículas en suspensión (mg/m3) (5)	150 ug/m3 (promedio mensual)	No aplicable	No aplicable	Idem
Partículas sedimentables (6) (mg/cm2 30 días)	1,0 mg/cm2 30 días	Idem	Idem	Idem

8.4.6 Artículo 1113 – Código Civil

Este artículo indica que “La obligación del que ha causado un daño se extiende a los daños que causen los que están bajo su dependencia, o por las cosas de que se sirve, o que tiene a su cuidado. (Párrafo agregado por Ley 17.711). En los supuestos de daños causados con las cosas, el dueño o guardián, para eximirse de responsabilidad, deberá demostrar que de su parte no hubo culpa; pero si el daño hubiere sido causado por el riesgo o vicio de la cosa, sólo se eximirá total o parcialmente de responsabilidad acreditando la culpa de la víctima o de un tercero por quien no debe responder. Si la cosa hubiese sido usada contra la voluntad expresa o presunta del dueño o guardián, no será responsable.”. Se debe tener en cuenta el artículo mencionado a la hora de la instalación del dispositivo y la correcta prueba de la sujeción mecánica de la misma.

8.4.7 Certificación de Componentes

Para los componentes utilizados en el dispositivo se deben tener en cuenta las certificaciones IRAM y las normativas impuestas por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). En concreto, se debe remitir a la documentación de Gestión de pilas y baterías eléctricas en Argentina para el tratamiento adecuado y diseño de la carcasa y batería que llevará el dispositivo.

8.4.8 Estado del Arte – Artículo 1.757

Citando Nociones de Derecho (Perego), “Toda especialización profesional tiene un estado del arte que indica los avances que deben respetarse en la forma de realizar las obras o los proyectos, y que los profesionales deben conocer y respetar.”. De manera que eso se debe tener en cuenta para la elección de los correctos componentes y técnicas para la correcta realización del proyecto. Esto se plasma en el artículo 1.768 el cual establece que " La actividad del profesional liberal está sujeta a las reglas de las obligaciones de hacer. La responsabilidad es subjetiva, excepto que se haya comprometido un resultado concreto. Cuando la obligación de hacer se preste con cosas, la

responsabilidad no está comprendida en la Sección 7a, de este Capítulo, excepto que causen un daño derivado de su vicio. La actividad del profesional liberal no está comprendida en la responsabilidad por actividades riesgosas previstas en el artículo 1.757."

8.4.9 Seguro ante responsabilidad Civil

Según Perego en Nociones de Derecho: "...es ampliamente recomendable la contratación de seguros que cubran la posible responsabilidad civil y que mantengan su indemnidad frente a posibles errores, negligencias o imprudencias en que pudiera incurrir en el ejercicio de su profesión y de las que, en definitiva, nadie está exento." Por lo que es correcto el análisis económico de si es necesario la contratación de este seguro para la implementación del dispositivo final.

9 Ingeniería de Detalle

9.1 Hard

En esta sección se describe el hardware diseñado e implementado para el funcionamiento del producto. El diseño del hardware que se describe a continuación es el que es pertinente para la producción a escala del dispositivo, no el implementado en la etapa de prototipo del producto.

9.1.1 Diagrama de bloques

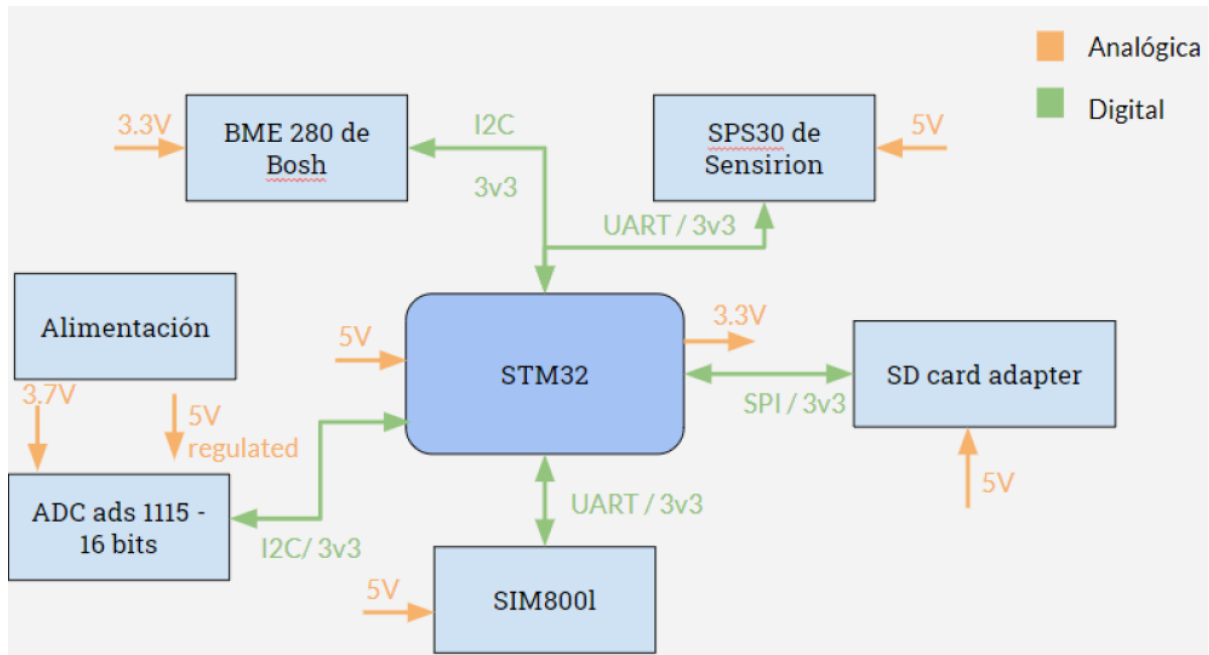


Figura 9.1: Esquema modular con interfaces final

9.1.2 Descripción de cada bloque

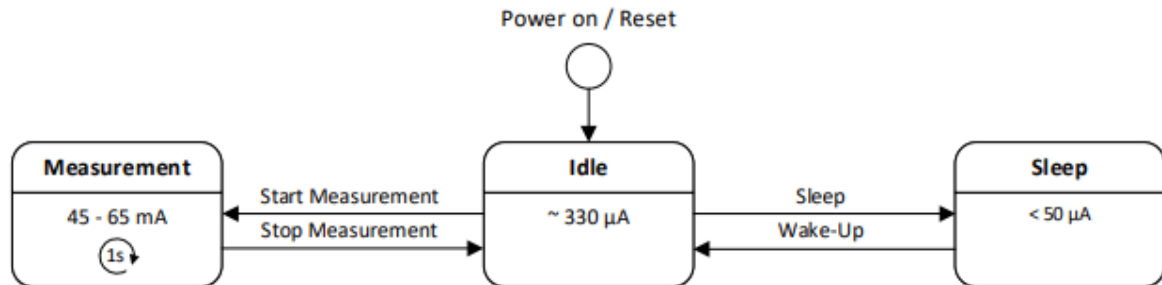
9.1.2.1 Medición de PM

El módulo de medición de PM consta del sensor, cuya presentación se muestra a continuación:



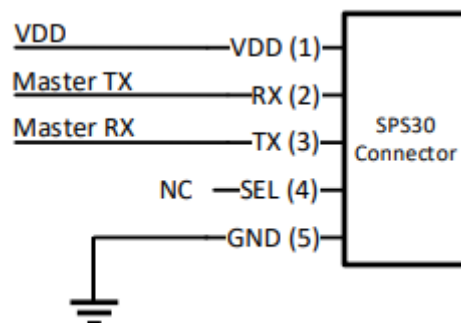
El sensor debe ser energizado con 5V, y cuando se conecta a la alimentación comienza en un estado IDLE en el cual consume aproximadamente 330 uA. Del estado IDLE puede realizar una transición al estado SLEEP (pasando a consumir menos de 50 uA) o al estado MEASUREMENT. Cualquiera de estas dos transiciones se realizan según los comandos que arriben vía la línea UART/RX, los cuales son enviados de la línea MASTER UART/TX del controlador.

En el caso de comenzar una medición, en los primeros 200 mseg del estado MEASUREMENT el sensor consume 65 mA debido al arranque del ventilador mediante el cual atrae el aire con material particulado a través de las ranuras de la carcasa del sensor, luego continúa midiendo durante 1 segundo consumiendo 45 mA. A continuación, se muestra un diagrama que describe estas transiciones de estados:



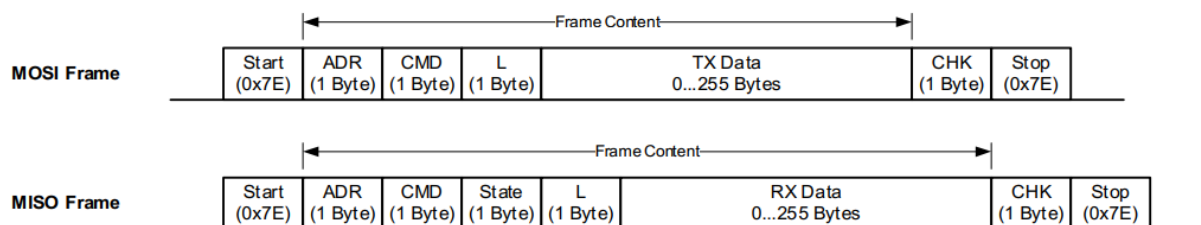
Las transiciones de estado se realizan cada 15 minutos (4 veces por hora), pasando de SLEEP a IDLE y de IDLE a MEASUREMENT, para luego de 1 segundo volver a IDLE, enviar los resultados de las mediciones vía UART, y luego se pasa a modo SLEEP.

A continuación, se muestran las conexiones correspondientes.



VDD = 5V. Master TX y Master RX corresponden a las líneas TX y RX de UART del controlador, las cuales deben tener un nivel de tensión de 5V o de 3.3V ya que el módulo UART del sensor permite estas dos tensiones.

Los paquetes de UART se organizan de la siguiente manera:



El byte de "Start" y "Stop" es 0x7E, por lo tanto, si el sensor debe enviar o recibir un dato representado por 0x7E, se reemplazan por dos bytes según especifica un protocolo en la hoja de datos.

El byte ADR representa la dirección de cada dispositivo (la del sensor es siempre 0x00), CMD es el comando que indica la acción a realizar por el sensor, “State” es un byte de estado que puede indicar errores en la comunicación, L es el número de bytes de datos del paquete y finalmente CHK es un byte de “checksum”, para control del correcto envío o recepción del paquete.

A continuación, se presentan los distintos comandos existentes en la comunicación sensor – controlador:

CMD	Command	Read / Write / Execute	max. Response Time
0x00	Start Measurement	Execute	20 ms
0x01	Stop Measurement	Execute	20 ms
0x03	Read Measured Value	Read	20 ms
0x10	Sleep	Execute	5 ms
0x11	Wake-up	Execute	5 ms
0x56	Start Fan Cleaning	Execute	20 ms
0x80	Read/Write Auto Cleaning Interval	Read / Write	20 ms
0xD0	Device Information	Read	20 ms
0xD1	Read Version	Read	20 ms
0xD2	Read Device Status Register	Read	20 ms
0xD3	Reset	Execute	20 ms

9.1.2.2 Medición Temperatura y Humedad

El sensor elegido es el BME280 de Bosch. Trabaja con tensión de 3.3V. Tiene tres modos, normal, sleep y forced mode. Este último resulta de mucho interés para el proyecto por su bajo consumo, ya que realiza una medición cada minuto y luego entra en modo sleep. Esto se puede observar en el diagrama que se encuentra en la datasheet del fabricante y se muestra a continuación:

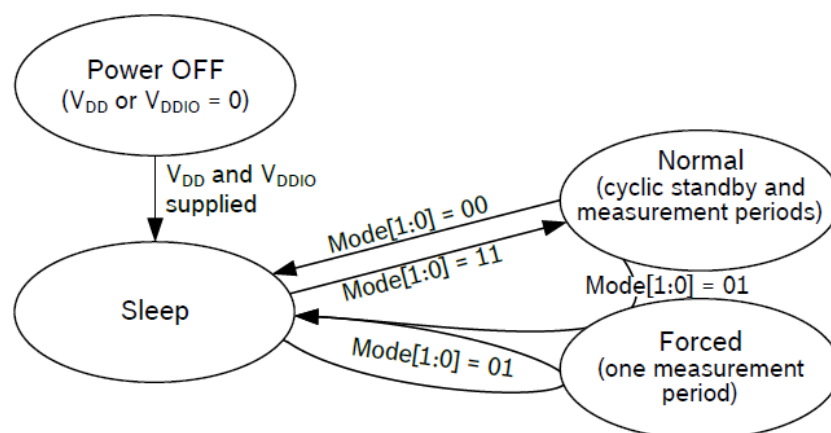


Figura 9.2: Diagrama de estados del BME280

Tiene dos entradas para alimentación VDD y VDDIO que se utiliza para la interfaz digital, es decir todo lo que sea configuración del modo, filtros, etc. Se muestra un diagrama de funcionalidad del sensor:

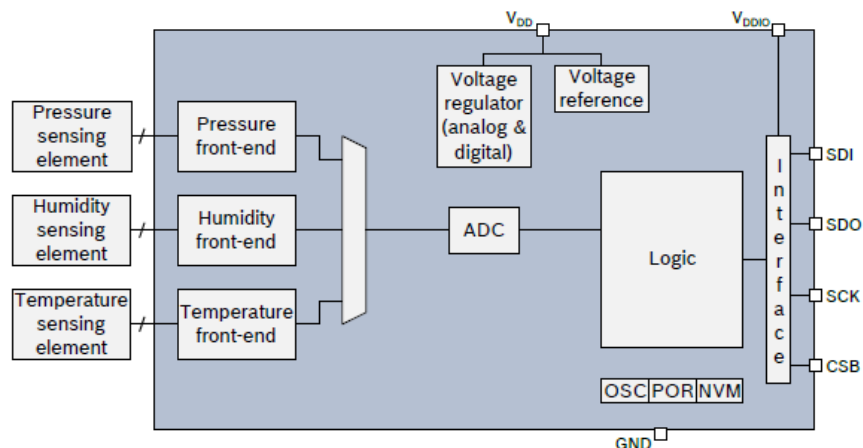


Figura 9.3: Diagrama funcional del BME280

En cuanto a la comunicación que utiliza puede ser tanto I2C como SPI. En nuestro caso, se utilizará SPI por ser full duplex y más robusto que I2C.

Al comenzar una medición, ya sea en forced mode o normal mode, la secuencia realizada es la misma. Se realizan un número de mediciones de cada parámetro determinado por el valor del oversampling rate. Luego para la presión y la temperatura se pueden filtrar los mismos con un filtro IIR opcional para eliminar fluctuaciones demasiado rápidas de la señal.

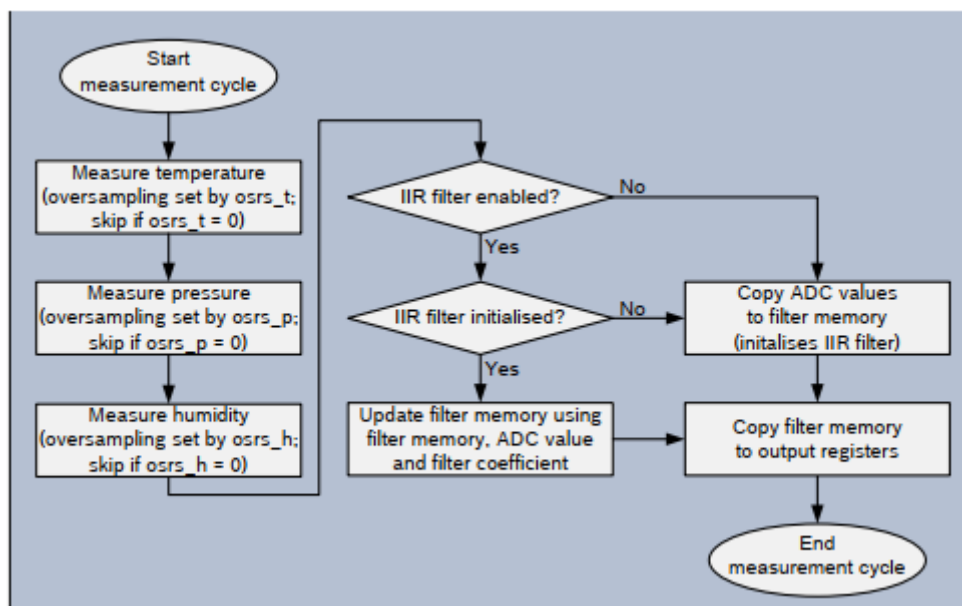


Figura 9.4: Ciclo de medición del BME280

9.1.2.3 Comunicación

El módulo de comunicación utilizado es el SIM800I que utiliza GSM (Global System for Mobile Communications). Al utilizar un servicio móvil, se obtiene un mayor alcance y permite su uso en lugares con mayor interferencia como puede ser una ciudad. Funciona con una tensión de 5v y para comunicarse con el módulo se utiliza comunicación UART. Para utilizar el mismo se debe contar con una tarjeta SIM habilitada. Para el prototipo se utiliza una tarjeta Tuenti prepaga. Las temperaturas normales de funcionamiento son de -40 C a 85 C.

A continuación se puede apreciar el pinout del módulo:

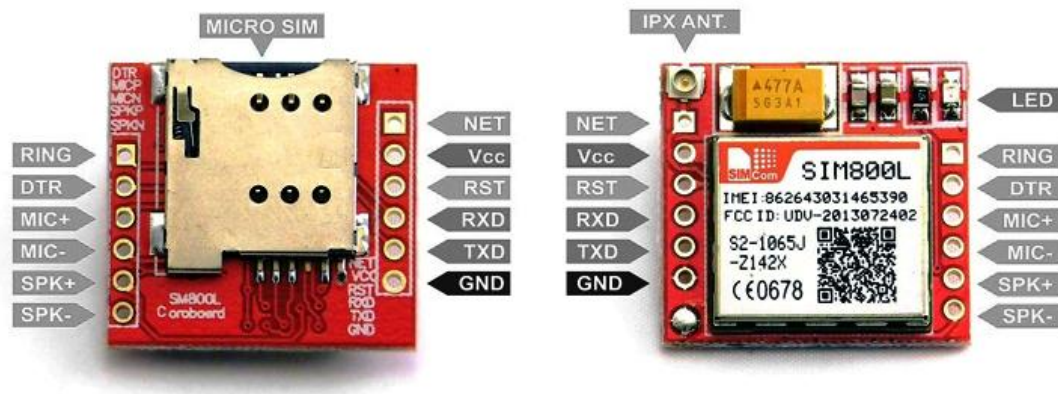


Figura 9.5: Pinout para el módulo de comunicación

Los pines utilizados para la aplicación de interés fueron IPX ANTENNA, VCC, RST, RXD, TXD y GND.

En el pin de IPX se conectó una antena la cual incluye un radomo y la posibilidad de colocarla por fuera de la caja estanca de manera que pueda tener una mejor conectividad. RXD y TXD son utilizados para la comunicación UART. RST es utilizado para apagar el módulo cuando éste no está siendo utilizado. Este pin es conectado a un pin GPIO del micro, el cual es programado para colocarse en Hi Impedance cuando el módulo debe prenderse y en High cuando este debe apagarse. Esto puede apreciarse en la siguiente figura de la datasheet del módulo de comunicación donde el puerto GPIO funciona como el switch de la figura:

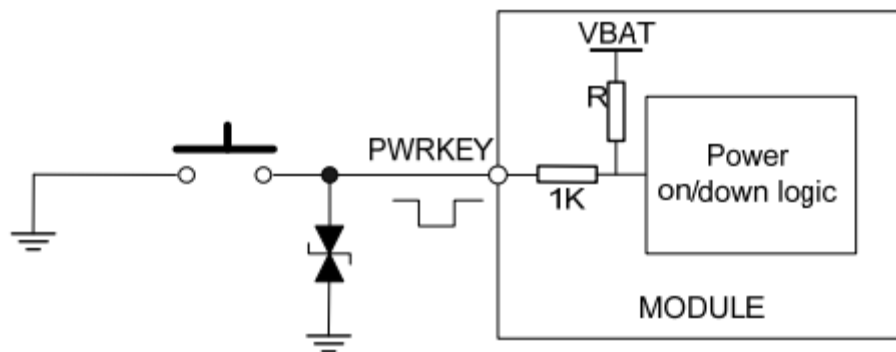


Figura 9.6: Esquema del adaptador de tarjeta MicroSD

El módulo cuenta con auto-baudrate por lo que no es necesario especificarlo y permite baudrates hasta 115200 bps.

Para comunicarse con el SIM a través de UART se utilizan los comandos AT. Estos comandos desarrollados por la compañía Hayes se convirtieron en un estándar de comandos para configurar y parametrizar modems. Se utilizaron los comandos AT para obtener el tiempo real al principio del programa y luego para enviar información a Thingspeak a través de GPRS y una conexión TCP.

Los comandos utilizados en el desarrollo del programa y su descripción son los siguientes:

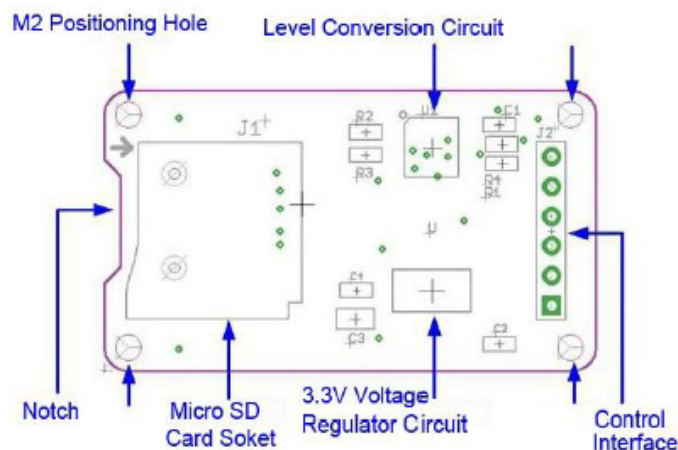
Comando	Descripción
AT+CREG?	Leer estado de la red

AT+CIPMUX=0	Seleccionar conexión simple IP
AT+CSTT=<apn>,<user>,<password>	Seleccionar parámetros de APN
AT+CIICR	Abrir la conexión inalámbrica con GPRS
AT+CIFSR	Obtener dirección IP local
AT+CIPSPRT=<send prompt>	Establecer aviso de '>' cuando el módulo envía datos
AT+CIPSTART=<mode>,<IP address>,<port>	Iniciar conexión TCP
AT+CIPSEND	Enviar datos a través de una conexión TCP
AT+CCLK?	Obtener clock
AT+CLTS=<mode>	Habilitar marca de tiempo local
AT+CIPSHUT	Desactivar contexto GPRS

Ya que es posible que el módulo falle al tratar de conectarse a la red (dependiendo varios factores ambientales) se incluye en el programa reintentos de conexión con un reseteo del módulo para maximizar las chances de conexión. En caso de fallar repetidas veces el módulo aborta el intento de conexión y la medición solo es almacenada en la SD para posterior extracción.

9.1.2.4 Almacenamiento

En cuanto al almacenamiento, se utiliza un adaptador de tarjeta microSD, que funciona con tensión 5V y comunicación SPI.



"HH:MM:SS PM10:%0.1f [ug/m3] T:%0.2f [°C] H:%0.2f [HR%] P:%0.2f [hPa] B:%0.2f [%]".

Siendo %0.Xf, un entero seguido de X decimales.

9.1.2.5 Microcontrolador

El microcontrolador elegido es el Blue Pill, STM32F103, que se utiliza en la etapa de producción a escala; éste cuenta con un microprocesador ARM Cortex M3. Tiene 64/128 Kbytes de memoria Flash y 20 Kbytes de memoria RAM. Además, modo sleep, stop y standby.

En cuanto a periféricos, tiene 7 timers, ADC, 2 SPIs, 2 I2Cs y 3 USARTs, que opera a 72Mhz.

El esquemático del microcontrolador se muestra a continuación:

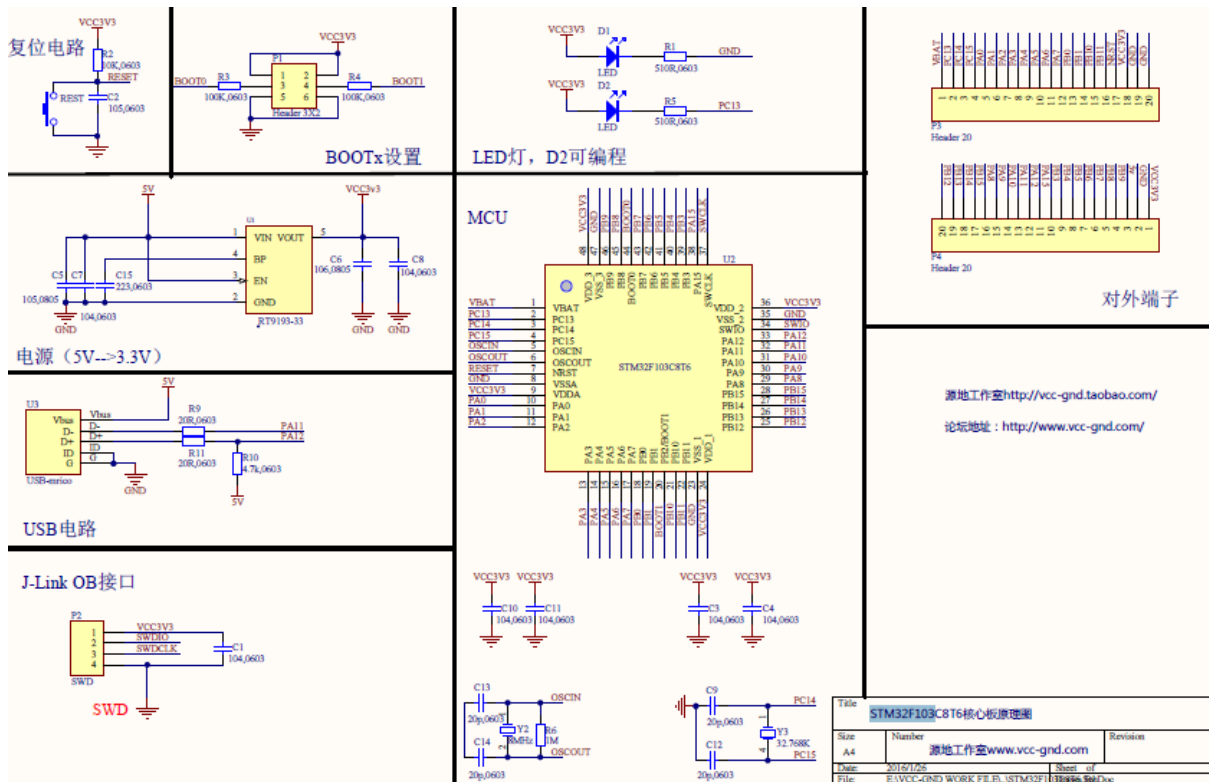
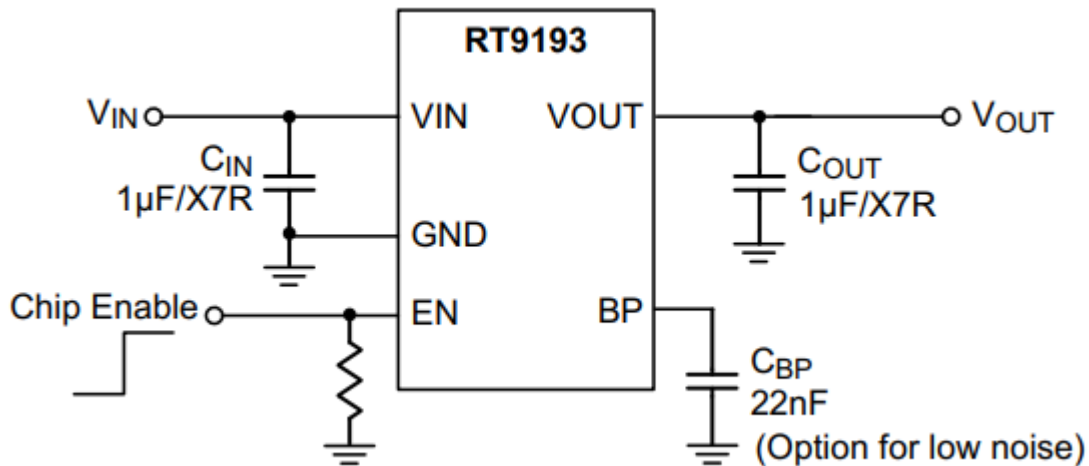


Figura 9.7: Esquemático del microcontrolador STM32F103

El microcontrolador es alimentado con 5V, y este mediante un regulador interno de 3.3V, permite que todos los pines y puertos puedan obtener un nivel de tensión de 3.3V. El regulador de tensión es el modelo RT9193, es un regulador de bajo consumo (con corriente de reposo del orden de los “nA”), de bajo ruido y de tecnología CMOS.

Este regulador puede otorgar una corriente máxima de 300 mA y es mucho mayor a la requerida por los pines de salida del controlador realizando las múltiples acciones que puede requerir el software del dispositivo. Por esto último, se aprovechará la salida disponible del regulador de tensión RT9193 para alimentar el hardware del nodo de medición que requiera la tensión de 3.3V. A continuación, se presentan las conexiones de RT9193.



Tanto “Vin” y “Vout” se encuentran disponibles mediante pines del Blue Pill. Las demás conexiones y componentes son internas en la placa del controlador.

Conexiones:

Se conectará uno de los módulos SPI al módulo de tarjeta SD. Además, las líneas de UART TX/RX serán conectadas al sensor de material particulado, y también se utilizarán líneas de UART para el módulo de comunicación SIM. Por último, el módulo I2C será conectado al sensor de medición de temperatura, humedad y presión.

En adición a estos protocolos de comunicación se utiliza el módulo integrado de RTC del microcontrolador. Este es utilizado principalmente para poder almacenar las mediciones en la SD con fecha y hora. Esto se logra inicialmente sincronizando el RTC con la hora y fecha actual a través del módulo de comunicación. Una vez inicializado el RTC, se calcula el tiempo hasta el próximo cuarto de hora (00/15/30/45) de manera que el programa nunca pierda el sincronismo. Esto se logra ya que si por ejemplo un sensor demora más de lo esperado, RTC esperará menos tiempo hasta la próxima medición para compensarlo. Si este no fuera el caso, los errores se acumularían hasta que se pierda una medición.

9.1.2.6 Sincronización de niveles de tensión

Dado que el controlador trabaja con niveles de 3v3 y existen otros módulos del nodo de medición que son alimentados con 5V se debe evaluar la necesidad de incorporar un nivelador de nivel para que puedan ser posibles las interconexiones entre los módulos. Las partes alimentadas con 5V son el sensor de medición de material particulado y el módulo de tarjeta micro SD. La conexión con el controlador son líneas de UART y SPI respectivamente, sin embargo, estas líneas son compatibles con tensiones de 3v3 según lo indican la hoja de datos del sensor de PM y del módulo tarjeta SD. Entonces, se llega a la conclusión de que no hay necesidad de incorporar niveladores de tensión con los elementos que se tienen en el equipo.

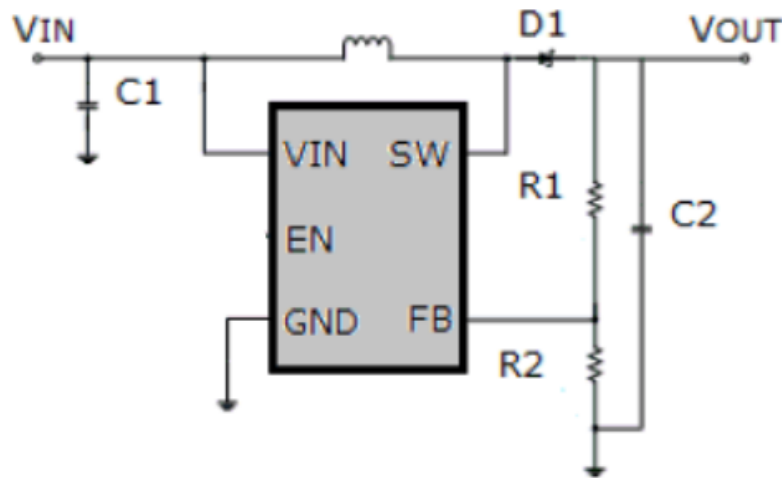
9.1.2.7 Alimentación

El módulo de alimentación otorga una salida de 5V. Para lograr esto se compone de cuatro baterías recargables de 3.7V en serie a un regulador switching tipo boost. Cada una de las 4 baterías tienen una capacidad de 2600mAh y se encuentran en paralelo entre sí de manera de lograr 10400mAh.

El regulador elegido es el MT 3608, debido a que permite regular en un rango de tensiones entre 2V a 12V y permite corrientes de salida hasta 4A (suficiente para los picos de corriente requeridos en las etapas de medición). Además, como es un regulador switching presenta una alta eficiencia.

Por otro lado, se descartó el uso de reguladores lineales debido a sus corrientes de reposo que generan un consumo constante.

El regulador utilizado se utiliza con el siguiente conexionado externo:



Este regulador cuenta con una frecuencia de switch constante y para definir la tensión de regulación de salida debe variar la resistencia R1.

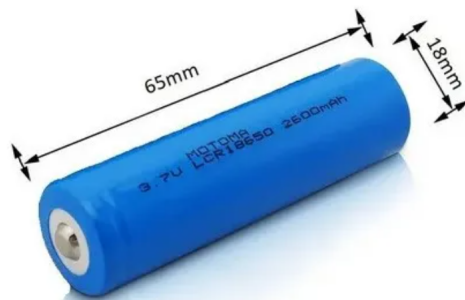
Según muestra el esquemático, Vin debe conectarse con las baterías y Vout es la tensión de alimentación del circuito.

En la implementación del prototipo se colocó un jumper entre Vout y el circuito general a alimentar para primero aislar la alimentación y calibrar R1 del regulador para obtener 5V regulados y luego conectar el jumper para alimentar todo el circuito.



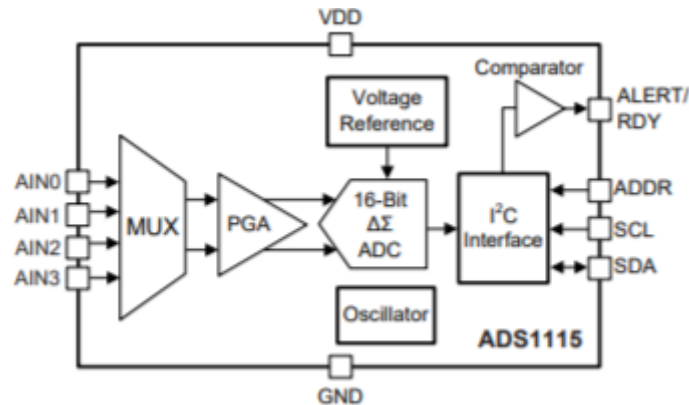
En cuanto a la batería, es importante colocarla en un alojamiento plástico sujetado mecánicamente a la placa principal, y conectar a las pistas de la placa mediante dos cables del estilo AWG 4.

La presentación de la batería recargable es la siguiente:



9.1.2.8 Medición de nivel de batería

El componente principal para la medición del nivel de batería es el ADC ads 1115 cuyo diagrama interno en bloques se presenta a continuación:

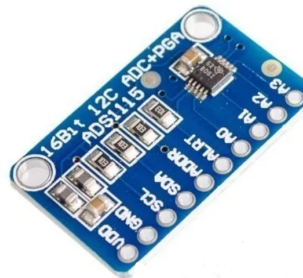


Se puede observar del diagrama que el ADC se alimenta con los pines VDD y GND (VDD conectado a la salida del regulador de tensión de 5V del módulo de alimentación).

Los pines de interfaz I2C que se conectan al microcontrolador son: SCL y SDA.

Los pines de entrada del ADC que deben conectarse directamente a los bornes de la batería son: AIN0 (borne positivo) AIN1 (borne negativo).

El ADC utilizado tiene la siguiente presentación:



9.1.3 Consideraciones para el diseño del hardware

Consideraciones para los esquemáticos:

Colocar fijaciones.

Colocar test points, es decir, puntos de medición. Estos son necesarios para probar alimentación y corroborar protocolos de comunicación.

Vale aclarar que para el montaje del prototipo se perforó una caja estanca genérica para poner la antena en el sector exterior así como para el switch y el sensor de PM. Para el producto final se debe tener en cuenta al diseñar una caja estanca especializada donde se tengan en cuenta estas cuestiones y puedan ser producidas acorde a la clasificación IP65 de la norma internacional EN 60529.

Consideraciones para los PCBs:

Ubicar las rutas de los sensores de manera que tengan el menor recorrido posible hasta el microcontrolador.

9.1.4 Plan de Pruebas de cada módulo

A continuación, se presentan las pruebas que se realizan para corroborar que los componentes de cada módulo presenten un correcto funcionamiento.

9.1.4.1 Alimentación

Es crucial primero corroborar el módulo de alimentación ya que luego será utilizado para probar otros módulos. Para esta prueba es necesario contar con un osciloscopio y dos puntas de medición.

Colocar las puntas de osciloscopio en los pines de testeo (una en cada pin) que se encuentran en los extremos de las baterías y corroborar que la tensión sea de 3.7V.

Como segunda prueba, se debe colocar una punta de medición en la señal de salida de 5V y verificar que efectivamente se mida dicha tensión. De no verificarse una tensión de 5V el regulador no está funcionando correctamente y debe ajustarse la resistencia variable del mismo hasta llegar a la tensión deseada de 5V.

9.1.4.2 Controlador

Se programa el controlador con un software que prende y apaga un pin del puerto de INPUT/OUTPUT cada un segundo, y conectando un led a este pin se puede corroborar el funcionamiento del controlador al observar el parpadeo con una frecuencia de 1Hz.

9.1.4.3 Medición de PM

Para probar que funcione el módulo de medición de PM, se conectará el módulo a la tensión de alimentación y al módulo UART del controlador. Una vez realizado esto, se correrá un software en el microcontrolador que envíe el comando de tomar medición, y se corroboró que el ventilador del sensor encienda. De esta manera se corrobora la correcta alimentación y el correcto funcionamiento del módulo UART.

Además de esto, se conectará un osciloscopio digital pero en los buses de Tx y Rx del puerto UART conectado al sensor. Este osciloscopio se utilizará para “espiar” el bus de comunicación y verificar la adecuada transmisión y recepción de los mensajes según el protocolo SHDLIC que se encuentra en la datasheet del sensor.

9.1.4.4 Medición de Temperatura y Humedad

El microcontrolador se conectará con una computadora, se intentará reconocerlo. Una vez que la comunicación entre la computadora y el controlador se encuentre establecida, se procede a conectar el módulo del sensor al microcontrolador. Se ejecuta la rutina de iniciación del sensor (mediante I2C) y se configura el módulo. Se verifica que se recibe una medición.

9.1.4.5 Medición de nivel de batería

Se conectará el ADC como se describe en ingeniería de detalle y además se colocarán dos pines de test en SCL y SDA de la comunicación I2C entre el ADC y el microcontrolador. Estos pines se utilizarán para conectar a un dispositivo Analog Explorer para visualizar el protocolo de comunicación mientras el software del microcontrolador esté funcionando de manera que se realice la medición de la tensión de la batería.

El resultado esperado es la comunicación al controlador de un valor de tensión válido para la batería.

9.1.4.6 Comunicación

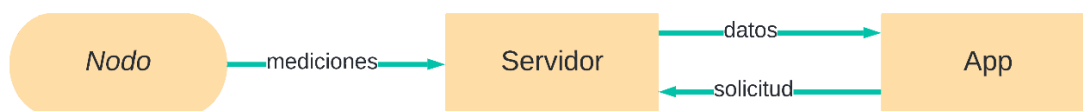
Se tiene un módulo SIM receptor (en el producto, el nodo) y un módulo transmisor (en el servidor). El módulo receptor está conectado al microcontrolador, que está a su vez conectado a la computadora. Se ejecutan las rutinas de inicialización. Se verifica que el lado receptor reciba un paquete de prueba.

9.1.4.7 Almacenamiento

Se conecta el microcontrolador a la computadora, y el adaptador de tarjeta microSD al microcontrolador. Una vez establecida la conexión entre el micro y la computadora, se inserta una tarjeta microSD en el adaptador, se corren las rutinas de inicialización del módulo. Se graba un archivo de prueba en la tarjeta y se verifica que se lee el mismo archivo sin errores.

9.2 Soft

El software del proyecto se divide en tres grandes programas. Primero, el programa que será ejecutado por el nodo de medición. Este programa es el encargado de manejar el micro, realizar las mediciones y transmitir estas mediciones al servidor. Segundo, el programa que obtiene las mediciones de la nube y las almacena en la base de datos del servidor web. Finalmente, el programa de la aplicación que utiliza el usuario para visibilizar las mediciones, las cuales son proporcionadas por el servidor. A continuación, se presenta un diagrama simplificado del flujo de los datos en el proyecto:



A nivel tecnológico, en el siguiente diagrama se puede apreciar el flujo de datos a través de los programas y sus respectivas tecnologías:

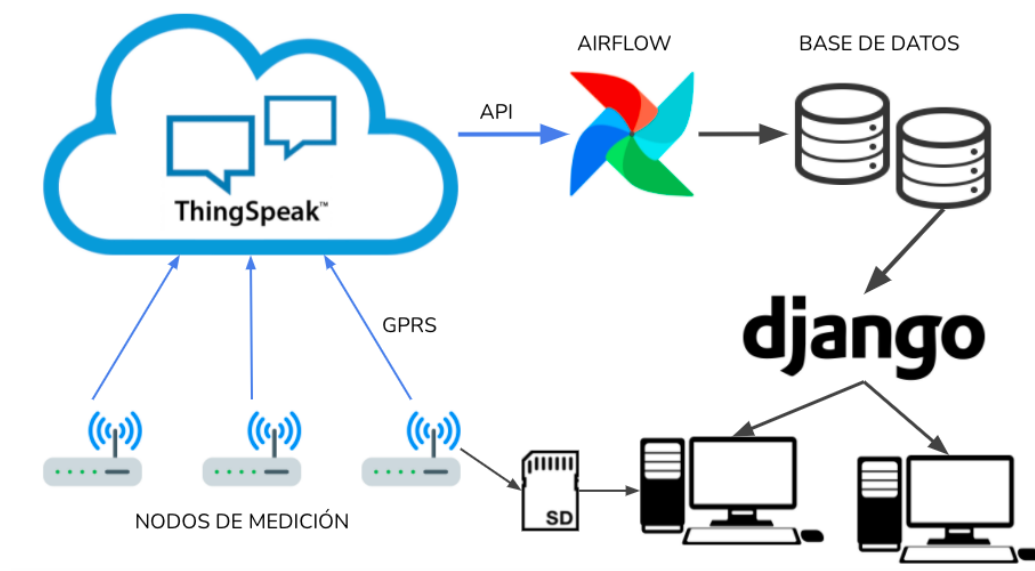


Figura 9.7: Diagrama de flujo de datos

Airflow: Es una plataforma utilizada para manejar los flujos de datos con scripts en Python. Con ella se pueden planificar los llamados DAGs (gráficos acíclicos dirigidos) los cuales son programados para correr cada determinado tiempo. De esta manera se pueden automatizar tareas de ETL (Extract

Transform Load). Dentro del proyecto, Airflow fue usado para automatizar la extracción de datos de ThingSpeak y la carga de estos en la base de datos del servidor web. Este DAG fue programado para correr cada una hora, obtener los datos nuevos que fueron agregados en esa hora y luego cargarlos en la base de datos. A continuación se puede ver el DAG en el web server de airflow:

DAGs

DAG	Owner	Runs	Schedule	Last Run	Next Run	Recent Tasks	Actions
thingspeak_to_db_dag	airflow	44	@hourly	2022-02-01, 04:00:00	2022-02-01, 05:00:00	1	[Play] [Stop]

Showing 1-1 of 1 DAGs

El DAG programado se puede apreciar a continuación:

```
# Date format: YYYY-MM-DD%20HH:MM:SS.
def dag_run(**context): # start_date, end_date

    start_date = (context['data_interval_start']-datetime.timedelta(hours=3, minutes=0)).strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S').replace(' ', '%20', 1)
    end_date = (context['data_interval_end']-datetime.timedelta(hours=3, minutes=0)).strftime('%Y-%m-%d %H:%M:%S').replace(' ', '%20', 1)
    URL = f"https://api.thingspeak.com/channels/1493992/feeds.json?api_key=ZUEQ00Z73HPP01L3&timezone=America/Argentina/Buenos_Aires&start={start_date}&end={end_date}"
    r = requests.get(url = URL)
    data = r.json()
    info = data['channel']
    results = data['feeds']

    print(start_date)
    print(end_date)
    print(os.getcwd())

    for result in results:
        datetime_obj = datetime.datetime.fromisoformat(result['created_at'].rstrip('Z'))
        add_measurement( str(datetime_obj)
                        , float(result['field1'])
                        , float(result['field2'])
                        , float(result['field3'])
                        , float(result['field4'])
                        , float(result['field5'])
                        , int(result['field6']))

with DAG("thingspeak_to_db_dag", start_date=datetime.datetime(2022, 1, 31), schedule_interval='@hourly', catchup=True) as dag:
    dag_run = PythonOperator(
        task_id="dag_run"
        , python_callable=dag_run
        , provide_context=True
    )
    dag_run
```

Django: Es un framework de desarrollo web escrito en python que respeta el modelo MVC (Model View Controller). Sirve para realizar páginas web complejas de manera sencilla que soportan bases de datos. A continuación se pueden ver algunas características de Django:



Ridiculously fast.
Django was designed to help developers take applications from concept to completion as quickly as possible.



Reassuringly secure.
Django takes security seriously and helps developers avoid many common security mistakes.



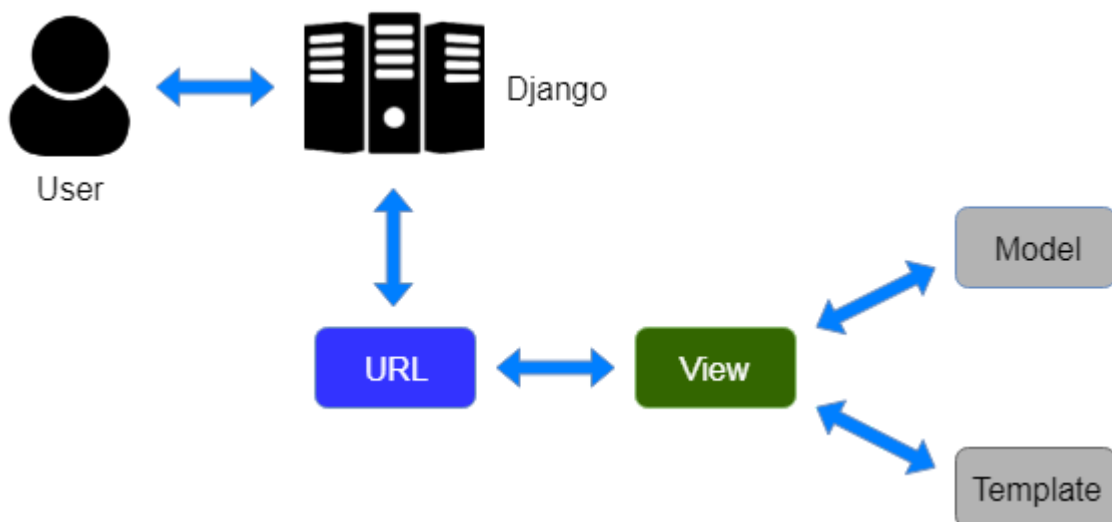
Exceedingly scalable.
Some of the busiest sites on the web leverage Django's ability to quickly and flexibly scale.

Por estas razones fue elegida para programar la página web, tanto frontend como backend.

El esquema de árbol de la página es el siguiente:

```
(django_env) (base) mmollon@Manuela-MacBook-Air django_mca % tree -L 2
.
├── dags
│   ├── __pycache__
│   └── dag.py
├── dashboard
│   ├── __init__.py
│   ├── __pycache__
│   ├── admin.py
│   ├── apps.py
│   ├── migrations
│   ├── models.py
│   ├── static
│   ├── templates
│   ├── tests.py
│   ├── urls.py
│   └── views.py
├── db.sqlite3
├── django_mca
│   ├── __init__.py
│   ├── __pycache__
│   ├── asgi.py
│   ├── bin
│   ├── lib
│   ├── pyvenv.cfg
│   ├── settings.py
│   ├── urls.py
│   └── wsgi.py
├── manage.py
├── templates
└── registration
```

Donde en models se modela los datos de la base de datos y en los views se modelan los datos para cada url y luego se envían a un '.html' el cual genera la interfaz grafico. Estos '.html' se encuentran en la carpeta de templates. En la imagen a continuación se puede observar cómo estas partes trabajan juntas.



A continuación podemos apreciar los resultados de la página web una vez terminada:

Home

All nodes

User: mmollon

My Nodes

Logout

MCA Home Page


Welcome to the MCA Project, a website that displays data retrieved from air quality sensors.

Overall Metrics

Data collected to date:

- Nodes: 3
- Users: 2
- Data Logs: 5

You have visited this page 16 times.



Home

All nodes

User: mmollon

My Nodes

Logout

Node:

Owner: mmollon

Location: Escobar

Date of creation: Jan. 7, 2022, 7:34 p.m.

Last Updated: Jan. 7, 2022, 7:34 p.m.

Measurement Graphs

Current AQI:
6
Good

Current Battery Level:
84.0 %

Measurements

Measurement time: Feb. 1, 2022, 4:09 a.m.

PM: 6.19 µg/m³

Temperature: 17.93 °C

Humidity: RH 62.15%

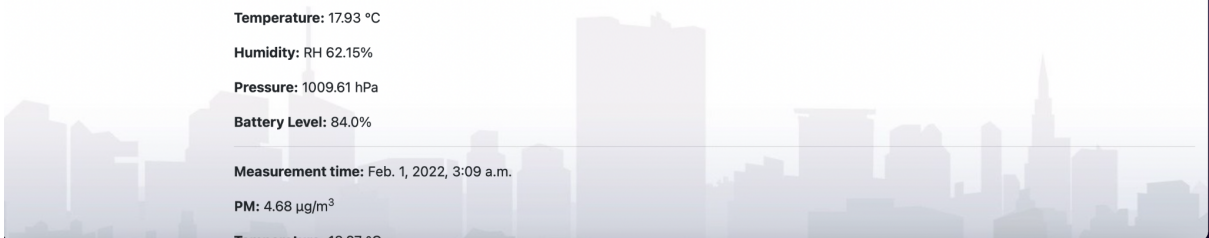
Pressure: 1009.61 hPa

Battery Level: 84.0%

Measurement time: Feb. 1, 2022, 3:09 a.m.

PM: 4.68 µg/m³

Temperature: 18.07 °C



Home

All nodes

User: mmollon

My Nodes

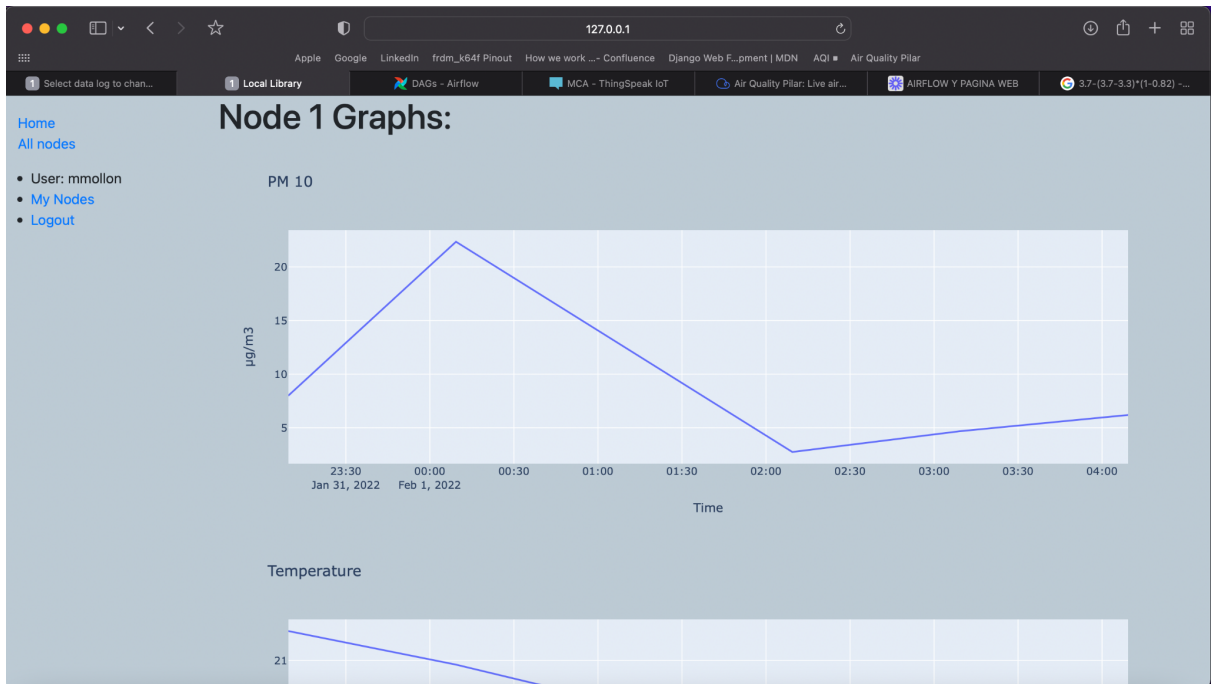

Logout

My Nodes

Node: 0 | Location: Pilar

Node: 1 | Location: Escobar

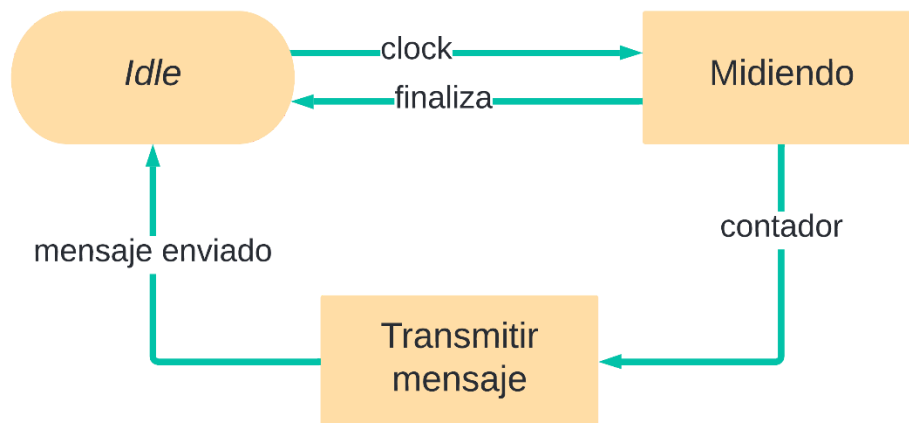
Page 1 of 1.



9.2.1 Diagrama de estados y flujogramas

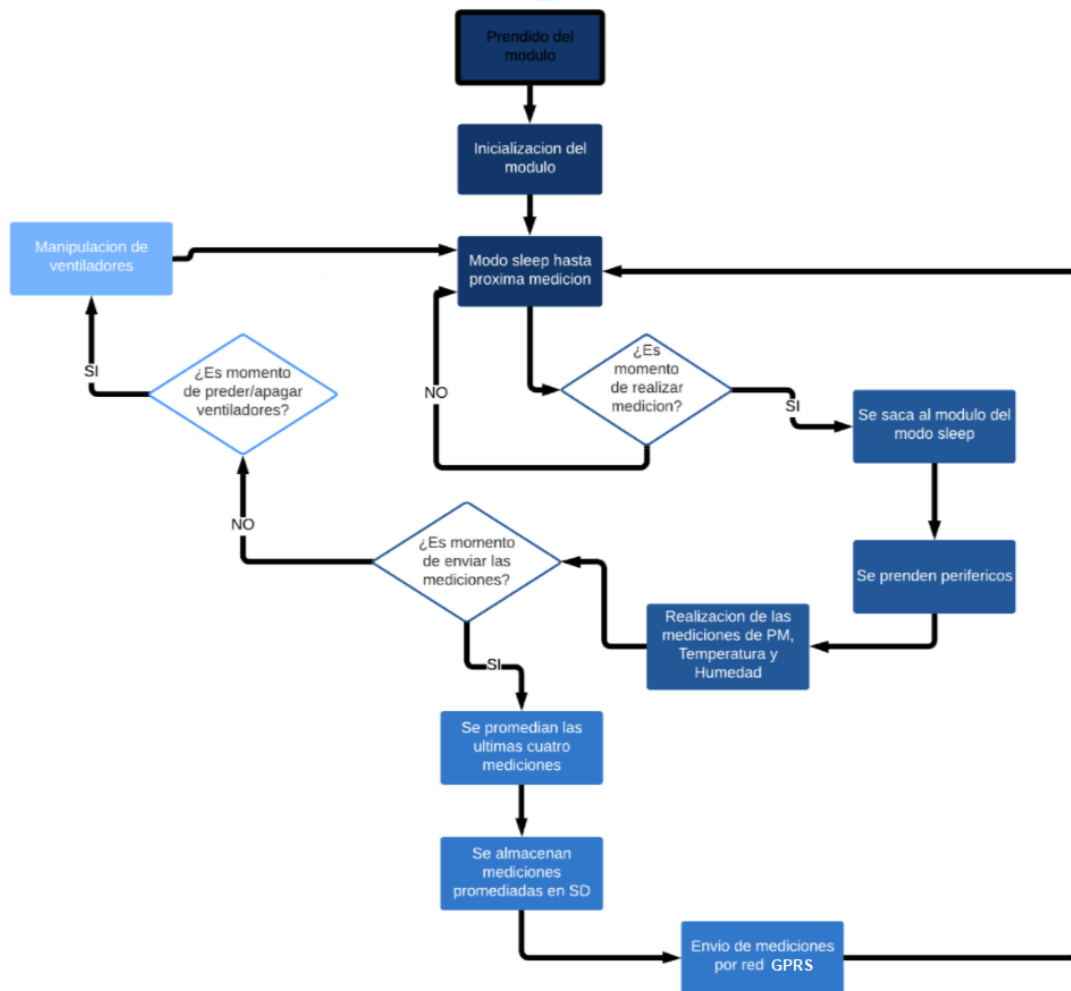
1) Nodo de medición

a) Diagrama de estados:



En el diagrama de estados se puede ver que el nodo va a estar la mayor parte en estado *idle*. En este estado el microcontrolador opera a la menor potencia posible para minimizar el consumo y maximizar el tiempo de vida entre recargas. Cuando un *clock* interno finaliza (inicialmente en 15 minutos), el microcontrolador sale del estado *idle* para realizar las mediciones de PM, temperatura y humedad relativa. Luego de la medición se incrementa un contador. Si este contador llega a cuatro (60 minutos totales), se transmite un mensaje al servidor con las mediciones finales. Luego de enviar el mensaje se reinician todos los contadores y el ciclo vuelve a comenzar. A continuación, se muestra el diagrama de flujo el cual contiene mayor detalle en cuanto a los condicionales en el software del nodo.

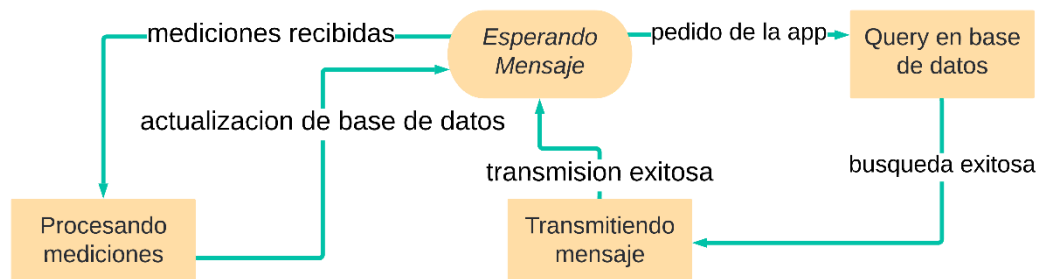
b) Diagrama de flujo:



El diagrama de flujo inicia cuando se inicializa el nodo. En este momento el nodo fue prendido y se inicializan todos los módulos correspondientes a los sensores, almacenamiento y transmisión. Luego se inicializan los contadores y se pone al microprocesador en modo sleep. Cuando es momento de realizar una medición se prenden los periféricos y se realizan las mediciones. Cuando es momento de enviarlas, estas últimas mediciones son promediadas, almacenadas en la tarjeta SD y enviadas por la red GPRS.

2) Servidor

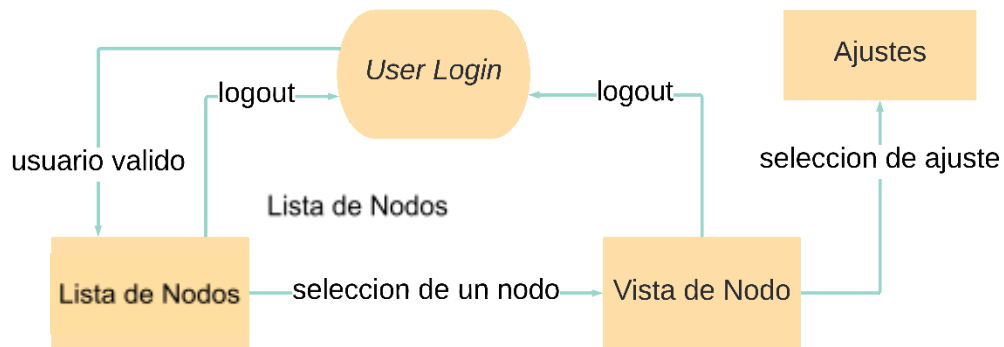
a) Diagrama de estados



El servidor será implementado con un programa encargado de obtener las mediciones de la nube (ThingSpeak) y una base de datos SQL encargada de suministrar los datos a la app, la cual pide los datos a través de queries. Estas dos tareas se ejecutan en paralelo. En el diagrama de estados podemos ver como el servidor obtiene las mediciones de la nube y en paralelo puede responder a pedidos de la app.

3) Aplicación

a) Diagrama de estados



La aplicación es la encargada de mostrar el contenido de la red de nodos al usuario de una manera amigable e intuitiva. Como se ve en el diagrama de estados, al iniciar la aplicación se pide que el usuario ingrese su nombre y contraseña. Si este es válido, se accede a la vista de lista de nodos donde se pueden ver los nodos y su información. Luego, si el usuario lo desea, puede acceder a la vista de un nodo en particular para visualizar la información general del nodo, el nivel de batería y AQI actuales; como también los gráficos de las mediciones de PM, humedad, temperatura, presión y nivel de batería.

b) Diagrama de Flujo

La aplicación no se corresponde a un diagrama de flujo ya que esta no es secuencial. Sino que responde directamente al diagrama de estados, basándose en una programación orientada a eventos (mouse y teclado).

9.2.2 Descripción de subrutinas

1) Nodo

a) `init_module()`

Esta función es la encargada de inicializar el microcontrolador y todos los periféricos necesarios para poder realizar las mediciones y transmitirlos al servidor. Esta función a su vez llama a otras funciones de inicialización listadas a continuación:

i) `init_temp_mod()`

Esta función es la encargada de inicializar el periférico que realiza las mediciones de temperatura, humedad y presión.

ii) `init_pm_mod()`

Esta función inicializa el módulo que realiza las mediciones de material particulado.

iii) `init_sd_mod()`

Es la función encargada de inicializar el periférico correspondiente al almacenamiento de las mediciones en una tarjeta SD en caso de un fallo en la comunicación con el servidor.

iv) `init_sim_mod()`

Función la cual inicializa el periférico de comunicación SI para poder enviar las mediciones. Se encarga de poder realizar una conexión confiable con el servidor.

b) `sleep_mode_on(time)`

Función que pone en modo sleep al módulo por cierto tiempo especificado. Esto se realiza para minimizar el consumo del microcontrolador.

c) `sleep_mode_off()`

Al salir del modo sleep cuando el timer termina, se llama esta función para restaurar el funcionamiento normal del microcontrolador.

d) `measure()`

Esta función realiza las mediciones necesarias para ser enviadas al servidor. Esta función es el cuello de botella en cuanto a complejidad y consumo del microcontrolador.

i) `measure_pm()`

Función que realiza las mediciones de PM.

ii) `measure_temp()`

Función que realiza las mediciones de temperatura y humedad.

e) `avg_measurements()`

Esta función promedia las últimas mediciones realizadas desde la última transmisión al servidor para enviar este promedio de las mediciones nuevamente al servidor. Por default, el nodo promedia las últimas cuatro mediciones para enviarlas al servidor. En el servidor estas mediciones serán filtradas por un algoritmo más complejo, para obtener las mediciones finales con menor ruido y error.

f) `store_in_sd(values)`

Función que se encarga de almacenar las mediciones en la tarjeta SD.

g) `send_sim(values, id)`

Función que envía por SIM las mediciones al servidor.

h) `fans_toggle()`

Esta función es llamada de manera periódica para prender y apagar los ventiladores que limpian la suciedad del sensor de PM.

2) Servidor

a) `changeNodeID(node, id, location)`

Función que cambia el nombre con el que se representa el nodo y donde está ubicado en el mapa.

b) `updateNodeInfo(node, pm, temperature, humid, battery_level)`

Esta función actualiza la información almacenada en la base de datos respecto a un nodo. Recibe el nodo en cuestión y los últimos valores medidos de PM, temperatura, humedad y el nivel de la batería.

c) `isMessage()`

Función que revisa si llegó un mensaje de algún nodo. Si llega algún paquete, se llama a la función que actualiza la información del nodo para agregar la nueva información a la base de datos.

d) `inferPmValue(pm, temperature, humidity)`

Función que aplica el algoritmo que determina cual es el valor de pm a partir de los parámetros medidos. Recibe los últimos valores de humedad, temperatura y PM medidos por el nodo.

3) Aplicación

Al no ser un modelo secuencial, la aplicación no tiene funciones claras definidas, sino que se compone de una interfaz que responde al diagrama de estados presentado anteriormente. También utiliza SQL para obtener los datos necesarios del servidor.

9.2.3 Plan de prueba de módulos y depuración de soft

Se distinguen como módulos principales para depurar:

- Mediciones
- Comunicación SIM
- Base de datos y app

El módulo de mediciones se corresponde únicamente con el software que se corre en el nodo de medición. Tiene como objetivo validar el funcionamiento de las funciones:

o `Measure()`

o `Measure_pm()`

- o Measure_temp()

A continuación se presenta la tabla detallando el procedimiento de prueba para el módulo de mediciones.

Módulo de mediciones	
Procedimiento	Criterio
<p>Precondiciones: Se necesita una computadora, el sensor de temperatura y el de PM. Se debe haber validado previamente el funcionamiento correcto de los sensores de temperatura y de PM.</p> <p>Procedimiento General: Alimentar el sensor con una fuente apropiada (3.3V para el sensor de temperatura y 5V para el sensor de PM). Conectar el sensor al puerto apropiado de comunicación serie del microprocesador y alimentar el microcontrolador desde la computadora en la que se ejecutará el código en modo Debug.</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Inicializar una variable de punto flotante (referida de aquí en más como 'Result') con valor nulo. 2. Llamar a la función measure_temp o measure_pm dependiendo si se está probando el sensor de temperatura o el de PM respectivamente. 3. Guardar el resultado de la función en Result. 4. Colocar un breakpoint en la línea de código del paso 3. 5. Correr el código 	Una vez que se llega al breakpoint realizar step. Si el valor de Result es distinto a 0 y que se corresponda con el valor de la temperatura/PM de la habitación.

En cuanto al módulo de comunicación SIM, las funciones a validar son:

- o Send_SIM()
- o IsMessage()

A continuación se presenta la tabla del procedimiento de prueba para dicho módulo

Módulo de comunicación SIM	
Procedimiento	Criterio
<p>Precondiciones: Se requieren dos computadoras y dos módulos SIM además del microcontrolador.</p> <p>Procedimiento General: Alimentar el microcontrolador desde la computadora desde la cual se ejecutará el código del microprocesador en modo debug. Alimentar los módulos SIM desde la fuente regulada en la placa de evaluación del microcontrolador.</p> <p>Desde la computadora que alimenta al microcontrolador, se ejecutará el código del mismo en modo debug. Mientras que en la segunda computadora se ejecutará un código correspondiente al servidor.</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 1. En el main del microcontrolador, armar un paquete con 3 valores de prueba de temperatura, humedad y PM. 2. En el main del servidor escribir un main que únicamente llame a la función IsMessage() dentro de un loop y que haga print si devuelve un paquete distinto al dummy 3. Correr el main del servidor. 4. Esperar unos 5 segundos 5. Correr el main del microcontrolador 	Se hace print de los mismos 3 valores de prueba que se escribieron en el main del microcontrolador.

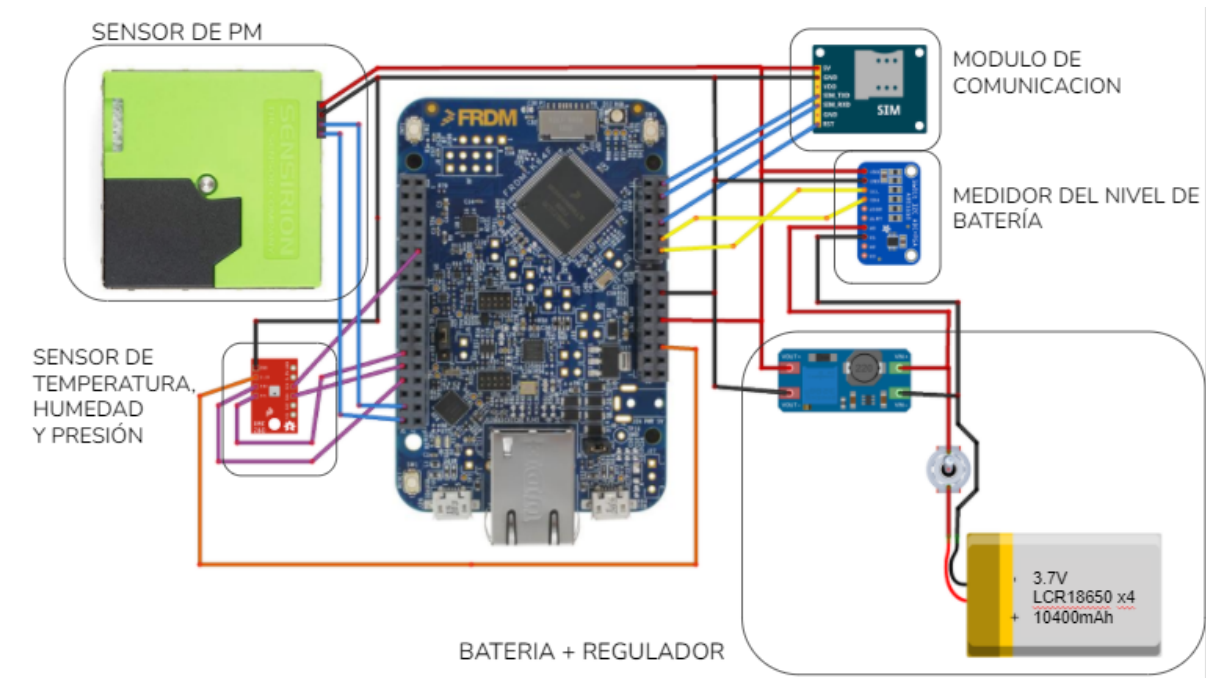
Finalmente, el objetivo del módulo de base de datos y app es verificar la correcta comunicación entre la base de datos (manejada desde el servidor) y la app (manejada desde la computadora del usuario).

Módulo de interacción entre base de datos y app	
Procedimiento	Criterio
<p>Precondiciones: Se requieren dos computadoras.</p> <p>Procedimiento General: Una computadora ejecutará el código correspondiente a la base de datos, mientras que la otra se utilizará para ingresar a la app.</p>	
<ol style="list-style-type: none"> 1. En el main del código del servidor agregar un llamado a UpdateNodeInfo() antes del loop principal. 2. Ejecutar el código del servidor 3. Ejecutar el código de la app 4. Ingresar como un usuario válido 5. Ubicar en la vista del mapa el nodo al que se le aplicó la función UpdateNodeInfo() 	<p>El nombre y ubicación del nodo actualizado cambió al que se proporcionó en el llamado a UpdateNodeInfo().</p>

10 Construcción del prototipo

10.1 Diseño de los circuitos

Para la implementación del sistema en su versión de prototipo se utilizaron múltiples plaquetas o circuitos separados donde cada uno cumplía el rol de un módulo específico. Esto facilitó el circuito final al simple interconexión entre estos módulos con las entradas/salidas necesarias de cada uno. Además de los módulos que se muestran en la siguiente imagen, se agregaron capacitores de desacople, pines de debugeo para medir protocolos serie, jumpers para alternar entre alimentación por batería o por el micro usb de la kinetis:



La implementación final del prototipo se montó sobre una multiperforada como se ve en la siguiente imagen:

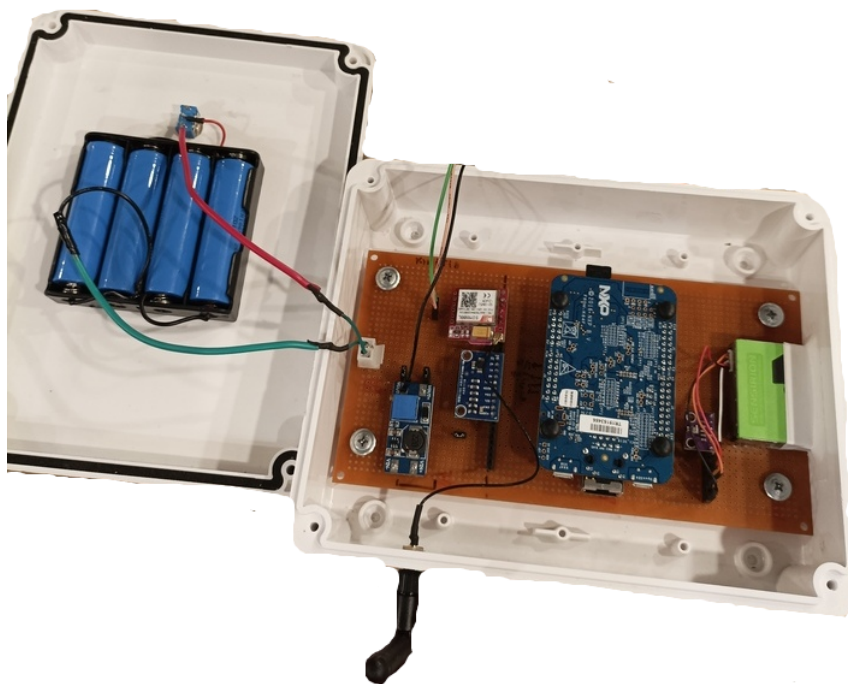


Imagen real del prototipo utilizado para la validación final

10.2 Diseño mecánico

El circuito montado en la plaqueta multiperforada se aloja en un gabinete de tipo caja estanca (IP65) de 16cm x 21cm x 5cm que consta de una base y una tapa.

En la base del gabinete se sujeta la placa con 4 tornillos (uno en cada esquina), y esta posee dos aberturas. Una de ellas es rectangular y es para colocar las ventilaciones del sensor de PM10 por donde ingresa y egresa el material particulado, mientras que la otra es un orificio que permite situar la antena del módulo de comunicación orientada hacia el exterior del gabinete.

Las baterías se adhieren en la parte de la tapa debido a que no caben en la base. Junto a estas se añade un interruptor que se acciona desde el exterior del gabinete.

Los cables de conexión de la batería poseen una ficha macho-hembra y tienen un largo extra para tener en cuenta la apertura del gabinete.

A continuación se presenta la presentación exterior del nodo:



Vista exterior del prototipo.

10.3 Detalles de construcción y precauciones especiales de montaje

Se tuvieron las siguientes consideraciones:

- El dispositivo debe colocarse con el sensor de PM10 hacia abajo, para evitar que le ingrese agua en caso de precipitación y reducir los residuos que se depositan sobre éste.
- Pines de testing para medir tensiones de baterías y tensión regulada de 5V
- Pines de debugging de protocolo de comunicación UART del módulo SIM
- Pines hembra para contemplar intercambio de sensores
- Preset del regulador switching orientado hacia el exterior para permitir ajuste manual.

11 Validación del prototipo

11.1 Resultados

En esta sección del trabajo se procede a exponer los resultados finales de las pruebas de validación.

11.1.1 T-INT-01

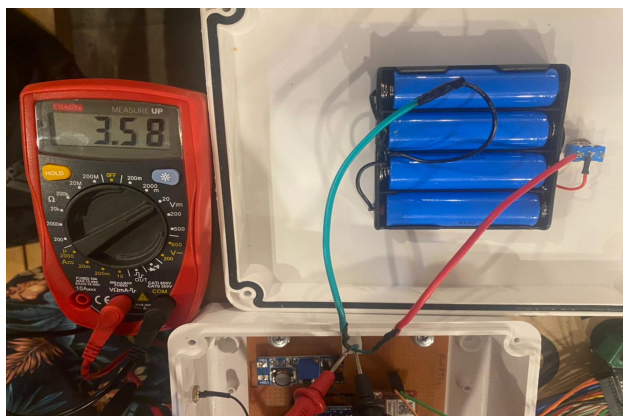
Este test comienza validando el encendido de un led indicador luego de alimentar el nodo. Se obtiene satisfactoriamente el resultado en el prototipo:



Luego se corrobora si se realiza la comunicación del nivel de batería al servidor y si coincide con el nivel de tensión medido con multímetro sobre la batería.

Se midió 3.580 V mientras que el servidor recibió un valor de 82.25%, que se corresponde con 3.575V.

La correspondencia entre porcentaje de carga y tensión en la batería se puede obtener suponiendo linealidad y sabiendo que 3.7V corresponde a 100% de carga y 3V significa que la batería está descargada. Luego, 82.25% de carga se corresponda con $3.7V - (3.7V - 3V) \cdot (1 - 0.8225) = 3.575V$



Node:

Owner: mmollon

Location: Escobar

Date of creation: Jan. 7, 2022, 7:34 p.m.

Last Updated: Jan. 7, 2022, 7:34 p.m.

[Measurement Graphs](#)

Current AQI:

11

Good

Current Battery Level:

82.25 %

Measurements

Measurement time: Feb. 1, 2022, 5:09 a.m.

PM: 12.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Temperature: 17.79 $^{\circ}\text{C}$

Humidity: RH 61.41%

Pressure: 1009.43 hPa

Battery Level: 82.25%

Entonces, la tensión medida por el módulo ADC ads 1115 y la medida con voltímetro difieren en 5 mV, lo cual es un valor razonable de error que puede generarse en los redondeos realizados para los cálculos de porcentaje de batería que se realizan en el servidor y el error de medición del voltímetro.

11.1.2 T-INT-05

Con este test se comprueba el correcto funcionamiento de la tarjeta SD y del algoritmo de guardado de mediciones.

Se esperan dos ciclos de programas (2 horas), y se procede a extraer la tarjeta SD y abrir el archivo, dando con el siguiente resultado:

20220131 - Notepad

File Edit Format View Help

```
20:00:00 PM10:1.9 [ug/m3] T:21.34 [°C] H:44.37 [HR] P:1008.84 [hPa] B:98.00 [%]
21:00:00 PM10:6.4 [ug/m3] T:21.39 [°C] H:44.87 [HR] P:1009.08 [hPa] B:98.00 [%]
```

Se pueden observar las mediciones de ambos ciclos horarios por lo que el resultado es satisfactorio.

Se corrobora también que el dispositivo es capaz de almacenar los datos correspondiente a toda su autonomía, la cual es 70 días. Para ello se obtienen 24 horas de mediciones los cuales equivalen a un archivo de texto por día. El archivo de un día, el cual equivale a 24 renglones de los expuestos anteriormente, ocupa 3 KB. Y en 70 días entonces tendremos $70 \times 3 = 140$ KB. Por lo que cualquier SD comercial (e. g. 2 GB, 4 GB, etc.) es capaz de

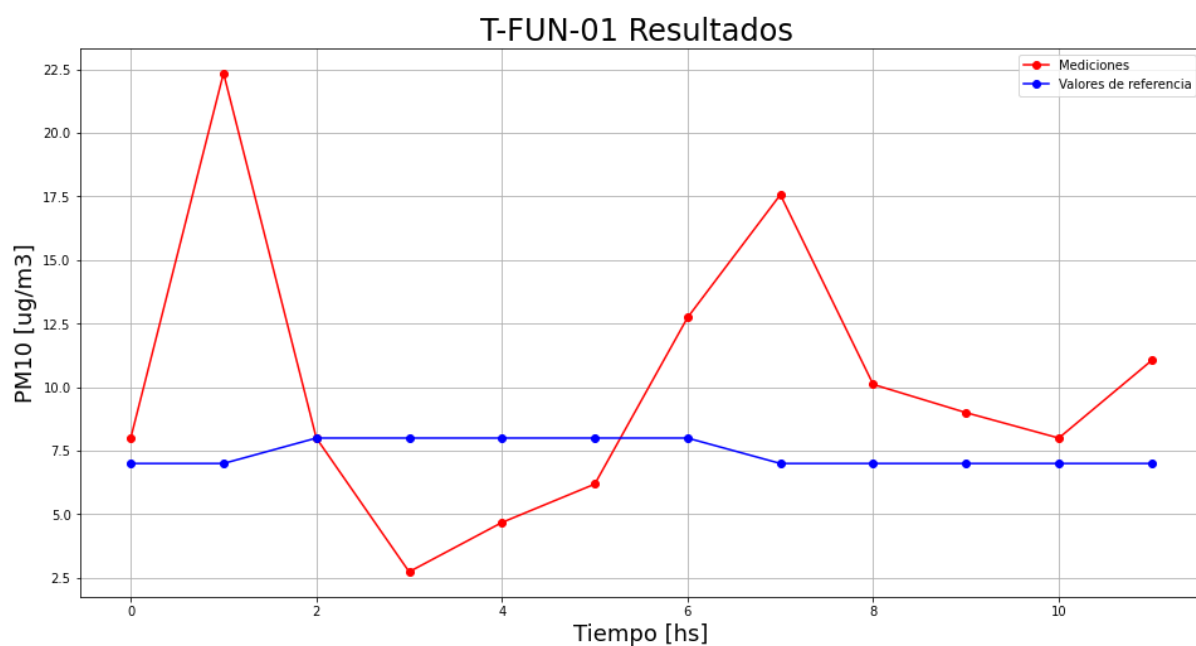
almacenar toda la información potencialmente pérdida en caso de obtener un fallo en la comunicación con la nube.

11.1.3 T-FUN-01

En este ensayo se evaluó el funcionamiento de la medición de PM10 del sistema. El criterio de aprobación del ensayo es obtener un MAE menor o igual a 5 ug/m3. Los resultados pueden apreciarse en la siguiente tabla:

Número de medicion	Valor real [$\frac{ug}{m^3}$]	Medición [$\frac{ug}{m^3}$]	MAE [$\frac{ug}{m^3}$]
1	7	8.00	1,00
2	7	22.35	8,18
3	8	8.00	5,45
4	8	2.74	5,40
5	8	4.68	4,99
6	8	6.19	4,46
7	8	12.74	4,50
8	7	17.57	5,26
9	7	10.11	5,02
10	7	9.00	4,72
11	7	8.00	4,38
12	7	11.05	4,35

Tabla de resultados de PM10



Gráfica de la validación realizada para PM10 en función del tiempo

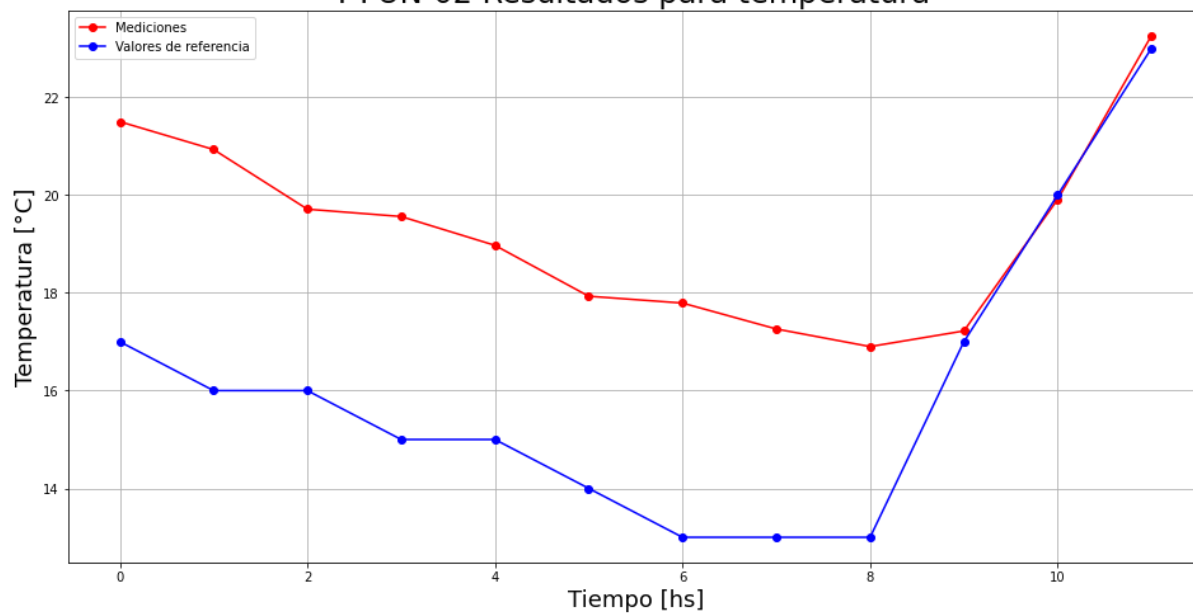
11.1.4 T-FUN-02

En este ensayo se evaluó el funcionamiento de las mediciones del sistema respecto a temperatura, humedad y presión atmosférica. Los resultados pueden apreciarse en las siguientes tablas:

Número de medicion	Valor real [°C]	Medición [°C]	MAE [°C]
1	17	21.50	4,50
2	16	20.93	4,72
3	16	19,7	4,38
4	15	19.56	4,43
5	15	18.97	4,33
6	14	17.93	4,27
7	13	17.79	4,34
8	13	17.26	4,33
9	13	16.90	4,28
10	17	17,22	3,88
11	20	19,91	3,53
12	23	23.26	3,26

Tabla de resultados de Temperatura

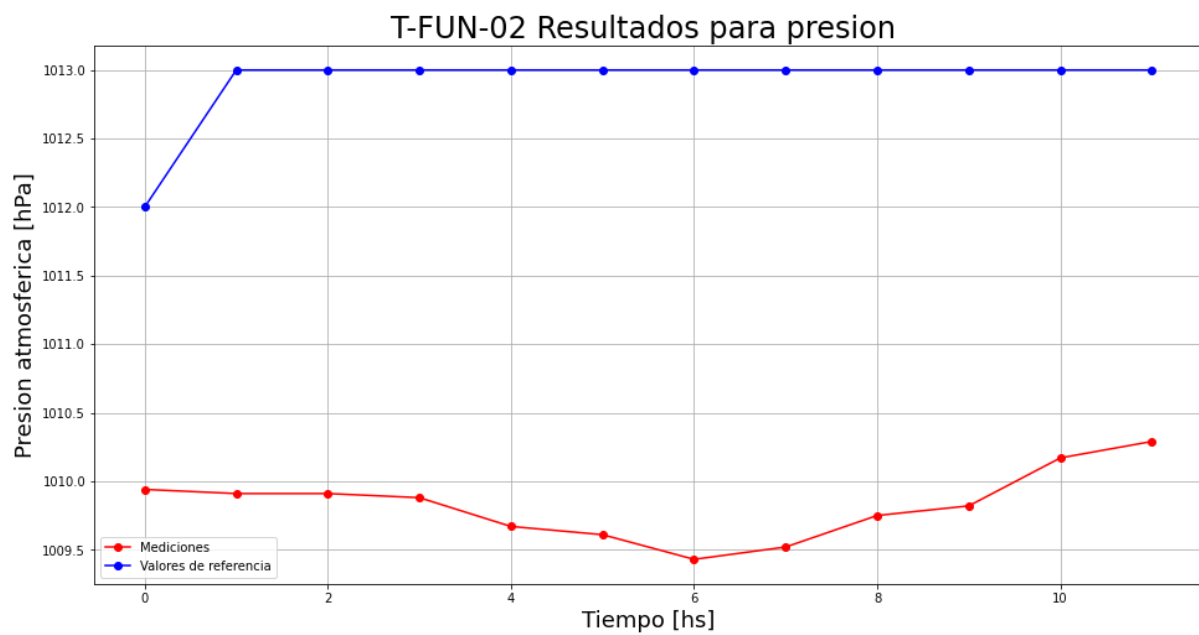
T-FUN-02 Resultados para temperatura



Gráfica de la validación para medición de temperatura

Número de medicion	Valor real [hPa]	Medición [hPa]	MAE [hPa]
1	1012	1009.94	2,06
2	1013	1009.91	2,57
3	1013	1009.91	2,75
4	1013	1009.88	2,84
5	1013	1009.67	2,94
6	1013	1009.61	3,01
7	1013	1009.43	3,09
8	1013	1009.52	3,14
9	1013	1009.75	3,15
10	1013	1009.82	3,16
11	1013	1010.17	3,13
12	1013	1010.29	3,09

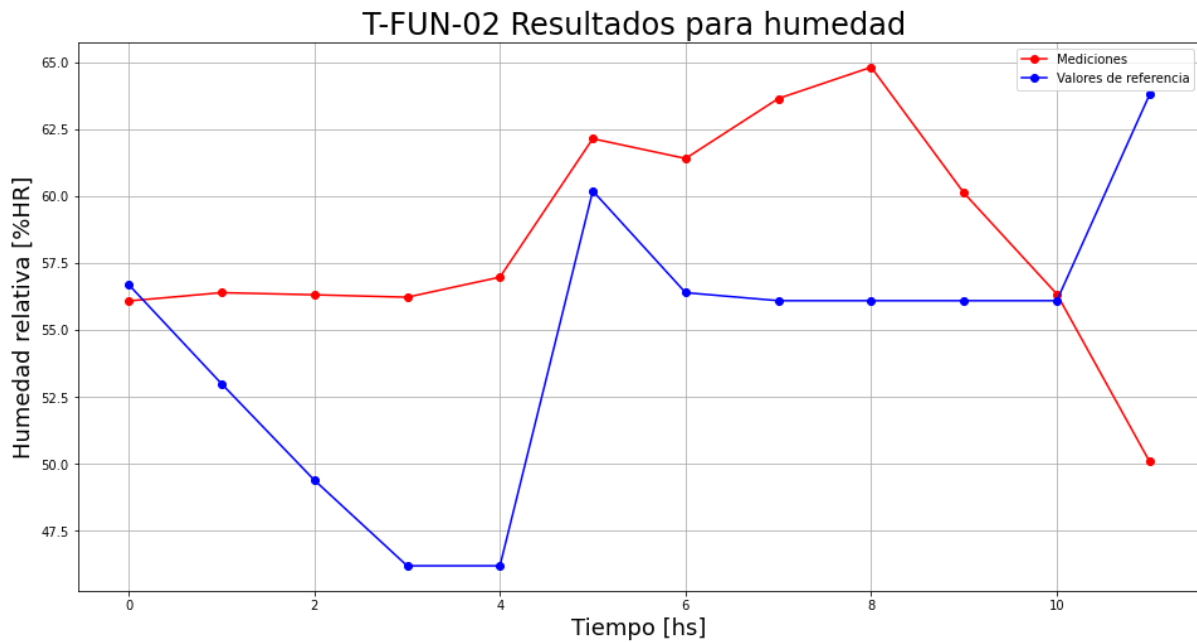
Tabla de resultados de Presión atmosférica



Gráfica de la validación para medición de presión atmosférica

Número de medicion	Valor real [%HR]	Medición [%HR]	MAE [%HR]
1	56,7	56,09	0,61
2	53	56,4	2,01
3	49,4	56,32	3,64
4	46,2	56,23	5,24
5	46,2	56,98	6,35
6	60,2	62,15	5,62
7	56,4	61,41	5,53
8	56,1	63,65	5,78
9	56,1	64,82	6,11
10	56,1	60,12	5,90
11	56,1	56,35	5,39
12	63,8	50,09	6,08

Tabla de resultados de humedad



Gráfica de la validación para medición de humedad relativa

11.1.5 T-APP-01

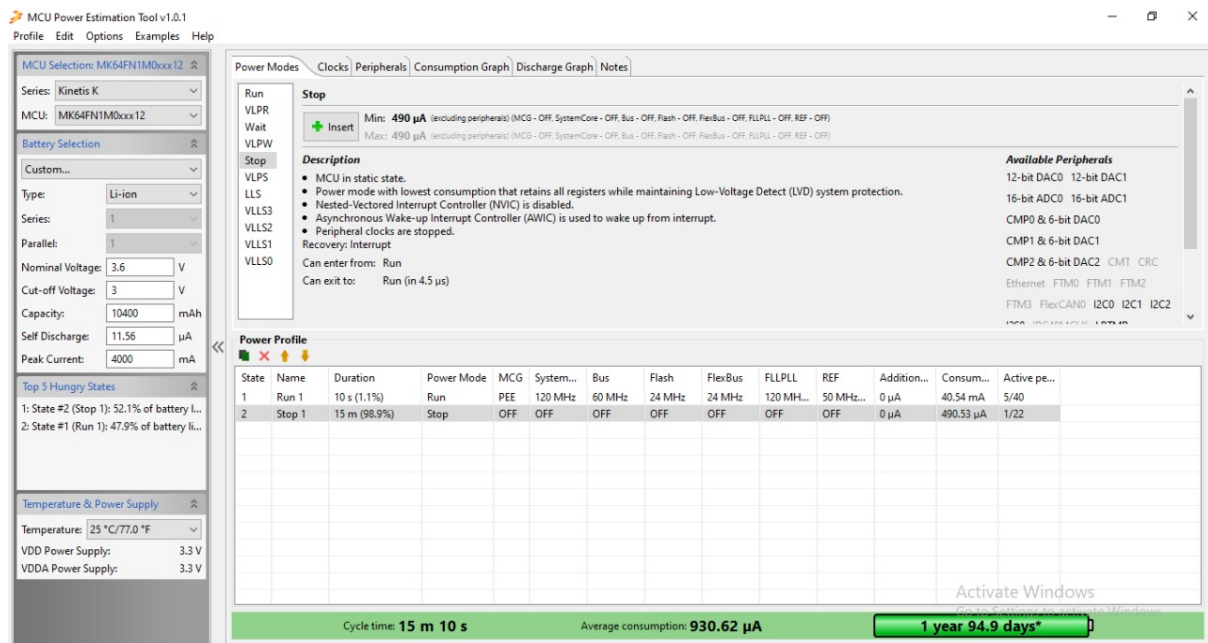
Esta validación de aplicación es necesaria para corroborar que funcione correctamente el mecanismo de alerta por colores para los niveles de calidad de aire. Se pudo notar satisfactoriamente que en el servidor se muestra con color verde (rango de 0 AQI a 50 AQI) una medición de valor 1 AQI. Esto se puede observar en la imagen del servidor expuesta en la sección de T-INT-01

11.1.6 SIM-INT-01

En esta simulación se procede a analizar el consumo del microcontrolador. Se simuló para el microcontrolador Kinetis 64 que es el microcontrolador utilizado para el prototipo.

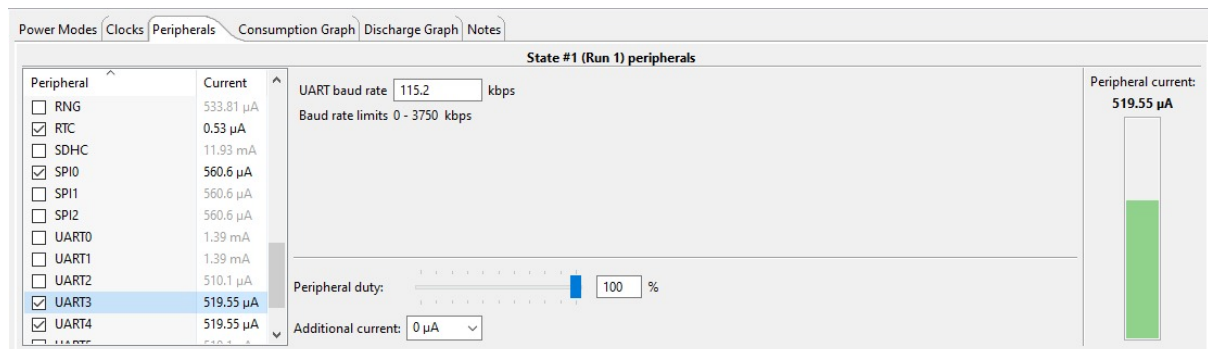
Como se describe en los pasos de simulación, primero se procede a abrir la herramienta de simulación y seleccionar el MCU.

Para configurar la herramienta se puede visualizar el siguiente entorno:



Se configura la batería utilizada (lateral izquierdo), que es de Li-Ion, con tensión nominal 3.7V y tensión de descarga de 3.0V. Se indican 4 baterías en paralelo de 2600mAh cada una (10400mAh en total).

Luego se indican los periféricos que se utilizan en el programa (UART, SPI, I2C y RTC):



Luego se configuran los modos de programa RUN y STOP, indicando que periféricos actúan en cada modo y cuanto tiempo se encuentra el programa en cada uno de estos dos estados.

Para el modo RUN, actúan todos los periféricos y se corresponde con el momento en que se realizan mediciones y se envían al servidor.

Para el modo STOP, solo funciona RTC para mantener sincronizado el tiempo y realizar la interrupción que establece el modo RUN.

El programa se establece cíclico cada 15 minutos y 10 segundos (cada vez que se realizan las mediciones). En este ciclo se encuentra 15 minutos en STOP y 10 segundos en RUN.

Una vez realizada esta configuración se inicia la simulación y se obtienen los siguientes resultados sobre el consumo del microcontrolador:

MCU Power Estimation Tool HTML Report

MCU: MK64FN1M0xxx12

Environment

Temperature: 25 °C (77.000 °F)

VDD Power Supply: 3.3 V

VDDA Power Supply: 3.3 V

Battery Info

Battery: [Voltage: 3.6 V, Capacity: 10,400 mAh, Self-Discharge: 11.56 µA, Cut-off Voltage: 3 V, Peak Current: 4,000 mA]

Results

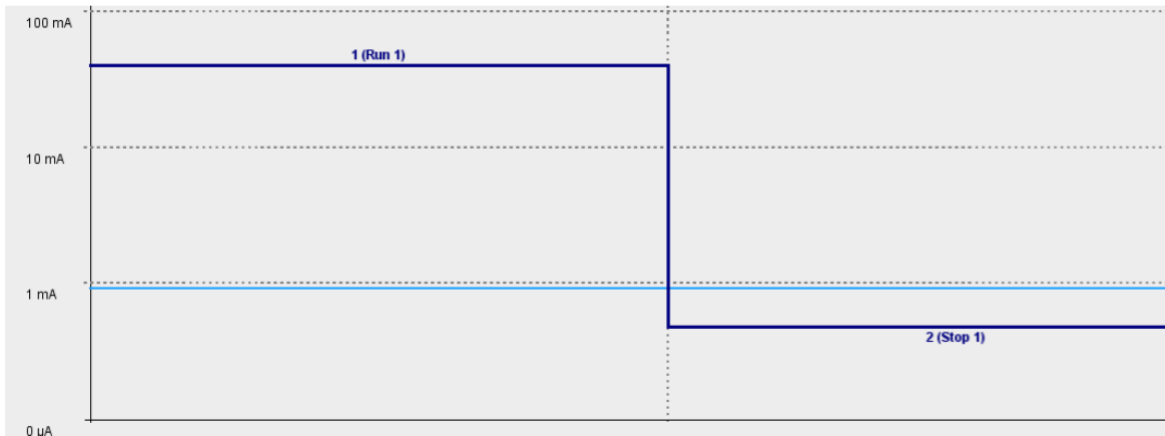
Cycle Duration: 15 minutes 10 seconds

Average Current: **930.62 µA**

Battery Life: **1 year 94 days 22.22 hours**

El resultado final de la simulación predice que el microcontrolador bajo las condiciones del programa consume una corriente media de 931 uA (aproximadamente 1mA).

Esta corriente es estimada en base al promedio de un ciclo cuyo consumo de corriente se puede ver en la siguiente imagen:



Este resultado es satisfactorio según el criterio de aceptación que establece como límite 4mA. Este criterio de aceptación se discute en la sección de análisis de resultados.

11.2 Análisis de resultados

Como se puede observar en la subsección previa todos los ensayos realizados cumplen los criterios de aceptación establecidos en la sección de [Especificaciones de Tests](#). Por lo que se validaron satisfactoriamente los requerimientos y especificaciones según lo indicado en [Matriz de Trazabilidad de Validación](#).

Respecto al nivel de batería, realizando una aproximación lineal sobre este, con el máximo en la tensión nominal y su mínimo en la tensión de corte, se obtiene un error razonable del cálculo del nivel de batería que se condice con el requerimiento pedido.

11.2.1 Autonomía

En la simulación de la corriente media que consume el microcontrolador utilizado en el prototipo se obtuvo una corriente promedio de aproximadamente 1 mA.

Esto es satisfactorio ya que si se suma este resultado a todas las corrientes medias estimadas de los componentes del nodo (módulo SIM, ADC, sensor de temperatura y sensor de PM) se logra obtener una corriente tal que no logra descargar las baterías en un lapso de tiempo menor a 30 días (lapso de tiempo requerido para la autonomía).

Dicho de otra forma, las baterías que en paralelo tienen una capacidad de 10400mAh, para descargarse en 30 días, tienen que otorgar una corriente media de $10400mAh / (30 \cdot 24h) = 14.4mA$

La corriente que otorga la batería es la suma de la corriente media del microcontrolador y la del resto de los módulos.

La corriente del resto de los módulos se estima en 5mA en la sección de análisis de factibilidad, luego, para cumplir con la autonomía requerida el microcontrolador no puede consumir más que 9.4 mA en promedio.

Finalmente, la simulación arroja un resultado exitoso.

12 Estudios de confiabilidad de hardware y software

12.1 Hardware

Para estimar la confiabilidad del hardware del sistema en su conjunto, primero definimos la función requerida y las variables de entorno en las que debe funcionar el mismo.

Función requerida: Medición de temperatura, humedad y PM y envío de las mediciones al servidor mediante módulo SIM.

Variables de entorno:

- $-10^{\circ}\text{C} \leq \text{Temperatura} \leq 50^{\circ}\text{C}$
- $0\% \leq \text{Humedad relativa} \leq 100\%$

Teniendo en cuenta dicha función requerida, el diagrama de confiabilidad correspondiente es:



Los 5 bloques presentados están compuestos por circuitos integrados por lo que para estimar la tasa de fallas de cada uno se decide usar la fórmula para microcircuitos del manual MIL-HDBK-217F.

$$\lambda_p = (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E) \pi_Q \pi_L \quad (1)$$

Donde:

- λ_p Es la cantidad de fallas esperadas en un periodo de un millón de horas.
- C_1 Ajusta la ecuación dependiendo del número de transistores y diodos en el componente.
- π_T es un factor de la temperatura.
- C_2 depende del empaquetado y encapsulado del componente.
- π_L Se denomina el "learning rate" y disminuye a medida que el dispositivo tiene más años en el mercado.
- π_E es un factor del ambiente.
- π_Q Es un factor de la calidad relacionado con los testeos en fábrica.

Debido a que todos los componentes trabajan en un mismo sistema en el mismo ambiente y que todos son de calidad industrial. Se tiene que para todos los componentes:

Parámetro	Valor
π_Q	5.5 (Calidad industrial)
π_E	4 (Se toma G_M como ambiente, ya que el nodo es portátil y no se tiene control sobre las condiciones ambientales, siendo además de uso terrestre)

12.1.1 Alimentación

Para este módulo no se tiene en cuenta la batería ya que es intercambiable y su falla podría ser solucionada externamente de una manera sencilla. El regulador de tensión en cambio, es un componente que define la confiabilidad del módulo.

Cada regulador de tensión sigue la ecuación (1).

Donde:

- $C_1 = 25$
- $\pi_T = 1.1$, tomamos como caso medio 50°C de temperatura.
- $C_2 = 0.00073$, al contar con 4 pines, y tecnología de montaje superficial.
- $\pi_L = 1.0$, por contar con más de 2 años en el mercado y ser el módulo de fabricantes con alta reputación.

Con esto, calculando los valores en la ecuación mencionada se obtiene una tasa de fallas de 250 FIT (0.25 fallas por millón de horas).

Además, se debe considerar que el módulo posee dos reguladores de tensión que deben funcionar a la vez, por lo tanto, se considera el modelo serie para el cálculo de confiabilidad total, dando con una tasa de fallas del módulo de alimentación de 0.5 fallas por cada millón de horas.

12.1.2 Sensor de Humedad y Temperatura

Este sensor es un MEMS, sistema micro electromecánico, es decir, un circuito integrado por lo que, como se mencionó se utiliza la ecuación (1).

Donde:

- $C_1 = 0.56$, pues las mediciones que devuelve son digitales y de 32 bits.
- $\pi_T = 0.29$, tomamos como caso medio 50°C de temperatura.

- $C_2 = 0.0026$, al contar con 8 pines, y tecnología de montaje superficial.
- $\pi_L = 1.0$, por contar con más de 2 años en el mercado y ser el módulo de fabricantes con alta reputación (Bosch).

Con esto, calculando los valores en la ecuación mencionada se obtiene una tasa de fallas de:

$$\lambda_p = 0.9504 \approx 1 \text{ falla por millón de horas} \quad (2)$$

12.1.3 Sensor de PM

Este sensor cuenta con un láser que mide la concentración de partículas por dispersión y un microcircuito para analizar esta medición y devolver un valor digital. Se analizó entonces como microcircuito con la ecuación (1)

Donde:

- $C_1 = 0.28$, pues las mediciones que devuelve son digitales y de 16 bits.
- $\pi_T = 0.29$, tomamos como caso medio 50°C de temperatura.
- $C_2 = 0.00159$, al contar con 5 pines, y tecnología de montaje superficial.
- $\pi_L = 1.0$, por contar con más de 2 años en el mercado y ser el módulo de fabricante con alta reputación (Sensirion).

Con esto, calculando los valores en la ecuación mencionada se obtiene una tasa de fallas de:

$$\lambda_p = 0.48 \text{ fallas por millón de horas} \quad (3)$$

12.1.4 Centro de Control

Este módulo corresponde al microcontrolador STM32F103C8T6. Los parámetros restantes para la ecuación (1) son:

- $C_1 = 0.56$, microcontrolador 32 bits tecnología MOS.
- $\pi_T = 0.3$, pero caso con $T = 50^\circ\text{C}$
- $C_2 = 0.02$, encapsulado de montaje superficial con 42 pins.
- $\pi_L = 1$, tiene mas de 5 años en el mercado.

12.1.5 Comunicación

Este módulo corresponde al módulo SIM. Los parámetros restantes para la ecuación (1) son:

- $C_1 = 0.56$
- $\pi_T = 0.3$, peor caso con $T = 50^\circ\text{C}$
- $C_2 = 0.00719$, encapsulado de montaje superficial con 16 pins.

- $\pi_L = 1$, tiene mas de 5 años en el mercado.

Con esto, calculando los valores en la ecuación mencionada se obtiene una tasa de fallas de:

$$\lambda_p = 1.0978 \approx 1.1 \text{ fallas por millón de horas}$$

12.1.6 Confiabilidad del sistema

Con esto se formula el siguiente resumen de las variables por módulo y su respectiva tasa de fallas por millón de horas.

Módulos/Variables	C_1	C_2	π_T	π_E	π_Q	π_L	λ_p
Alimentación	25	0.00073	1.1	4.0	5.5	1.0	0.5
Sensor de T y H	0.56	0.0026	0.29	4.0	5.5	1.0	1
Sensor de PM	0.28	0.00159	0.29	4.0	5.5	1.0	0.5
Centro de Control	0.56	0.02	0.3	4.0	5.5	1.0	1.364
Comunicación	0.56	0.0071	0.3	4.0	5.5	1.0	1.1

Tabla 11.1 Variables y tasa de fallas por millón de horas por módulo

Con esto se calcula la confiabilidad de cada módulo tomando un período de 3 años, con la siguiente fórmula:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Módulos/Confiabilidad	R(1 año)	R(3 años)
Alimentación	0.9956	0.9869
Sensor de T y H	0.9913	0.9741
Sensor de PM	0.9958	0.9875
Centro de Control	0.9881	0.9648
Comunicación	0.9904	0.9715
Total	0.9618	0.8898

Tabla 11.2 Confiabilidad de cada módulo en lapso de 3 años

Considerando que todos los módulos deben funcionar en simultáneo, se realiza el cálculo de confiabilidad total considerando en serie a todos los módulos, por lo que se multiplican las confiabilidades, resultando en una confiabilidad de 96.18% para el lapso de 1 año y 88.98% para el lapso de 3 años.

12.2 Software

Con el fin de estimar la confiabilidad del software desarrollado, se empleó un modelo de estimación basado en una distribución exponencial de la forma:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Semana	E_T (Errores totales acumulados)	E_c (Errores corregidos acumulados)	E_R (Errores residuales acumulados)
1	16	10	6
2	25	22	3
3	31	29	3
4	37	35	2
5	39	38	1
6	40	39	1

Resultados de la depuración del software

Para estimar la tasa de fallas final del software, primero se deben obtener dos tasas de fallas observadas a partir de los errores residuales presentados en la tabla anterior.

$$\lambda_1 = \frac{E_R}{Tiempo} (\tau_1 = \text{semana 3}) = \frac{3}{504} \frac{fallas}{hora} = 5,952 \cdot 10^{-3}$$

$$\lambda_2 = \frac{E_r}{Tiempo} (\tau_2 = \text{Semana 6}) = \frac{1}{1008} \frac{fallas}{hora} = 9,92 \cdot 10^{-4}$$

Asumiendo que en la última semana de depuración se tienen parámetros estabilizados, se estima la tasa final de fallas a partir de:

$$\widehat{E_T} = \frac{(\frac{\lambda_2}{\lambda_1})E_c(\tau_1) - E_c(\tau_2)}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1} = 41$$

$$\frac{\widehat{k}}{I_T} = \frac{\lambda_2}{\widehat{E_T} - E_c(\tau_2)} = 4,96 \cdot 10^{-4}$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda_f} = \frac{\widehat{k}}{I_T \cdot E_R(\tau_2)} 2016hs$$

Entonces se obtiene un MTBF de 84 días de tiempo de ejecución. Considerando que el tiempo de ejecución continuo máximo del software es de 2.5 días (ya que el sistema tiene autonomía de 30 días y el software solo corre 5 minutos por cada hora), se obtiene una confiabilidad para el sistema de:

$$R(30 \text{ dias}) = e^{-4,96 \cdot 10^{-4} \cdot 60} = 97\%$$

13 Conclusiones

13.1 Cumplimiento de objetivos

Como fruto de varios meses de investigación y desarrollo podemos expresar con convicción que se logró el objetivo de realizar una red de nodos de medición de calidad de aire con éxito. En el camino se aprendieron diversas habilidades como así se tuvo la oportunidad de demostrar los conocimientos adquiridos durante la carrera.

Se pudo exitosamente programar un microprocesador y sus periféricos con diversos protocolos de comunicación (UART, I2C, SPI). También se pudo energizar el mismo con pilas recargables diseñando el circuito pertinente para ello. Se implementó un RTC para medir el tiempo como así también un módulo de comunicación para enviar mediciones a la nube y obtener la fecha actual.

Luego fue necesario implementar habilidades de diseño y de armado físico para poder construir un prototipo robusto que responda a las necesidades del proyecto y no sea vulnerable a fallas.

Para la realización del proyecto también se requieren otras habilidades como las interpersonales que fueron de ayuda al momento de conseguir los requerimientos y habilidades de planeamiento para poder llevar a cabo la factibilidad económica y tecnológica.

Fue también necesario poder utilizar nuestros conocimientos de electrónica y extrapolarlos a la informática para poder llevar a cabo el diseño e implementación del servidor y la página web.

13.2 Recomendaciones para futuros diseños

Las futuras mejoras posibles son por un lado la posibilidad de agregar la medición de un mayor número de parámetros como PM1.0, PM2.5 Y PM4.0. Así también agregando celdas electroquímicas en el sistema se podría sumar la posibilidad de detectar y medir contaminantes químicos como monóxido de carbono, ozono o dióxido de azufre.

Adicionalmente podría contemplarse un diseño que pueda autoabastecerse energéticamente por medio de un panel solar o algún generador eléctrico propio. De esta manera la autonomía del nodo podría mejorar de manera drástica y tener tanta independencia que hasta se podría considerar su ubicación en alguna zona remota y no solo en ciudades. Además, se podría incorporar la opción de alimentar el dispositivo con la red eléctrica si se cuenta con el acceso a ella.

Por último, en cuanto a la comunicación, se podría mejorar la antena de manera que sea más robusta y se conecte más rápidamente a la red Tuenti para enviar las mediciones y también disminuir el consumo energético. Además, sabiendo que la tarjeta SD cuenta con la totalidad de las mediciones, ante la pérdida de comunicación con el servidor, podría agregarse al software una funcionalidad que permita que cuando se restablezca la conexión con el servidor, ubicar en la tarjeta SD aquellas mediciones que no pudieron enviarse al servidor de manera de reenviarlas y poder visualizar todas las mediciones en la página web.

Bibliografía

1. Monitoreo Calidad de Aire en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires – Greenpeace – Agosto 2018.
2. Study of Atmospheric Particulate Matter in Buenos Aires – Bogó H., Otero M., Kreiner A.J., Ozafran M., Negri M. – 2003.
3. The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring – Emily G. Snyder, Timothy H. Watkins, Paul A. Solomon, Eben D. Thoma, Ronald W. Willems, Gayle S. W. Hagler, David Shelow, David A. Hindin, Vasu J. Kilaru, and Peter W. Preuss – 2013.
4. Spatial calibration and PM_{2.5} mapping of low-cost air quality sensors – Hone-Jay Chu, Muhammad Zeeshan Ali & Yu-Chen He – Diciembre 2020
5. A Guide to Siting and Installing Air Sensors – EPA
6. Small-scale spatial variability of particulate matter < 10 μ m (PM₁₀) and nitrogen dioxide – Ch. Monn, V. Carabias, M. Junker, R. Waeber, M. Karrer and H. U. Wanner – Mayo 1997
7. MIL-HDBK-217F – Departamento de defensa de E.E.U.U – Diciembre 1991