

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Facultad de Ciencias e Ingeniería



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE SENSADO DE BAJO COSTO
PARA UNA RED DE MONITOREO EN TIEMPO REAL DE
CONTAMINANTES ATMOSFERICOS PRESENTES EN ZONAS
URBANAS**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecatrónico, que presenta el
bachiller:**

Juan Manuel Mendoza Jacinto

ASESOR: M.Eng. Jhon Manuel Portella Delgado

Lima, noviembre del 2018

RESUMEN

La expansión de las ciudades producto del desarrollo de la industria y la explosión demográfica viene afectando la calidad de vida de sus habitantes. Por un lado, la mayoría de actividades industriales como parte de sus procesos desecha contaminantes que afectan el medio ambiente. Por otro lado, el crecimiento de la ciudad ha fomentado el desarrollo de actividades que responden a satisfacer necesidades ciudadanas siendo una de las principales el transporte, que presenta problemas tales como la informalidad y la obsolescencia del parque automotor, cuya principal consecuencia es el incremento del nivel de contaminación.

Siguiendo las recomendaciones de la OMS para material contaminante suspendido en aire urbano, diversas instituciones gubernamentales en el Perú han establecido límites para la concentración de una serie de contaminantes, así como, ha realizado el monitoreo de los mismos en puntos estratégicos de la ciudad de Lima. Sin embargo, las soluciones empleadas en la actualidad son alternativas costosas y requieren de personal especializado para su operación, por lo que son escasas e insuficientes.

Acorde a esta problemática, la presente tesis describe el desarrollo de un nodo sensorial de costo inferior a 800 USD, de dimensiones inferiores a 1m³ y peso menor a 25kg, capaz de determinar la concentración de gases contaminantes tales como el CO, NO₂ y PM_{2.5} dentro de los rangos recomendados por el MINSA. El sistema desarrollado minimiza su costo de operación al abastecerse de energía mediante paneles solares funcionando al 25% de su capacidad de captación lumínica, además de contar con la capacidad para funcionamiento de emergencia de 12h y los equipos necesarios para determinar las principales variables meteorológicas.

Durante el presente trabajo, se siguió la metodología de diseño mecatrónico planteada por la norma VD2206 adaptada a sistemas ciber-físicos comprobándose su pertinencia en procesos de desarrollo similares. Así mismo, se comprobó con un prototipo de baja fidelidad la capacidad del sistema para enviar datos en tiempo real a través de internet hacia la plataforma IOT de IBM (Watson). Finalmente, se elaboró la propuesta de un modelo para la ubicación de una red de estos nodos sensoriales y su optimización mediante algoritmos de aprendizaje automático.





Dedico el presente trabajo a mis padres, Juan y Carmen, que me brindaron su apoyo incondicional durante este largo camino. Así como, a mi asesor Jhon y todas aquellas personas que contribuyeron conmigo y me motivaron a culminar esta etapa.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	1
TEMA DE TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO.....	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
CÁPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. PROBLEMÁTICA.....	10
1.2. CONSTITUCIÓN DEL PROYECTO.....	14
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	14
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.2.3. ENUNCIADO DEL ALCANCE.....	15
1.3. ANTECEDENTES (ESTADO DEL ARTE).....	16
1.3.1. SISTEMA INTEGRAL PARA MONITORIZAR POLUCIÓN URBANA DESDE EL TRANSPORTE URBANO BASADO EN UNA RED DE SENSORES MÚLTIPLES.....	16
1.3.2. DISEÑO DE UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS PARA MONITORIZACIÓN DEL TRÁFICO VEHICULAR Y CONTAMINACIÓN EN ZONA URBANA.....	17
1.3.3. SISTEMA DE MONITOREO DE CONTAMINANTES DEL AIRE URBANO CON MODELOS DE PRONÓSTICO.....	20
CÁPITULO 2: DISEÑO DEL CONCEPTO DE SOLUCIÓN.....	23
2.1. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO.....	23
2.2. ESTRUCTURA DE FUNCIONES.....	27
2.3. MATRIZ MORFOLOGICA.....	33
2.4. CONCEPTO DE SOLUCIÓN.....	37
CÁPITULO 3: DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO.....	39
3.1. DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO.....	39
3.1.1. SELECCIÓN DE SENSORES.....	40
3.1.1.1. ELECCIÓN DE CONTAMINANTES A MONITORIZAR.....	40
3.1.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS MEDICIONES A REALIZAR.....	41

3.1.1.3. SENSOR DE CO.....	43
3.1.1.4. SENSOR DE NO2.....	48
3.1.1.5. SENSOR DE PM 2.5.....	52
3.1.1.6. SENSORES DE CONDICIONES CLIMÁTICAS.....	56
3.1.2. SELECCIÓN DE HARDWARE DE COMUNICACIONES.....	58
3.1.2.1. PROTOCOLO DE COMUNICACIONES A UTILIZAR.....	58
3.1.2.2. SIM900GSM.....	60
3.1.3. SELECCIÓN DE CONTROLADOR.....	61
3.1.4. DISEÑO DEL MÓDULO DE ALIMENTACIÓN.....	64
3.1.4.1. BATERIAS.....	67
3.1.4.2. PANEL SOLAR.....	68
3.2. DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO.....	70
3.2.1. CRITERIOS PARA EL DISEÑO MECÁNICO.....	70
3.2.2. CASES PARA LA PROTECCIÓN DE TARJETAS ELECTRÓNICAS.....	70
3.2.3. ESTRUCTURA SOPORTE DEL SISTEMA.....	72
3.3 DISEÑO DE LAS RUTINAS DE OPERACIÓN PROGRAMADAS EN EL SISTEMA.....	73
CÁPITULO 4: PUESTA EN OPERACIÓN.....	76
4.1. COSTOS DEL SISTEMA	76
4.2. ELECCIÓN DE PUNTOS DE OPERACIÓN DE SENSORES	77
4.2.1. ELECCIÓN DE PUNTOS DE OPERACIÓN DE LOS NODOS SENSORIALES.....	77
4.2.2. ELECCIÓN DE PUNTOS DE OPERACIÓN DE SENSORES DE ALTA CALIDAD	80
4.3. PRUEBA DE CONCEPTO.....	83
CONCLUSIONES.....	85
BIBLIOGRAFÍA.....	87
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág
Tabla 1.1. Distribución del parque automotor nacional en los principales departamentos.....	11
Tabla 1.2. Valores límite de los principales contaminantes presentes en área urbana para Perú.....	12
Tabla 2.1. Requerimientos de diseño del proyecto.....	26
Tabla 2.2. Matriz morfológica con la solución óptima tomada.....	35
Tabla 3.1. Pesos tomados para la evaluación técnica-económica de los sensores.....	43
Tabla 3.2. Características del sensor de gas MQ7.....	44
Tabla 3.3. Características del sensor de gas ME3 - CO.....	45
Tabla 3.4. Características del sensor de gas Alphasense - CO.....	46
Tabla 3.5. Evaluación del mejor sensor para CO.....	47
Tabla 3.6. Características del sensor de gas ME3 – NO2.....	49
Tabla 3.7. Características del sensor de gas Alphasense – NO2.....	50
Tabla 3.8. Evaluación del mejor sensor para NO2.....	51
Tabla 3.9. Características del sensor óptico GP2Y1010AU0F.....	52
Tabla 3.10. Características del sensor óptico DSM501A.....	53
Tabla 3.11. Evaluación del mejor sensor para PM2,5.....	55
Tabla 3.12. Características del Weather Sensor Assembly.....	56
Tabla 3.13. Resistencia de la veleta de viento según su dirección.....	57
Tabla 3.14. Características del DHT11 Sensor.....	58
Tabla 3.15. Características del módulo SIM900GMS.....	60
Tabla 3.16. Componentes y puertos requeridos para el microcontrolador.....	61
Tabla 3.17. Características del ATmega 2560.....	62
Tabla 3.18. Tamaño de las mediciones de contaminantes realizadas.....	63
Tabla 3.19. Características de la memoria EEPROM Atmel AT24C512.....	64

Tabla 3.20. Recuento de cargas para voltajes de 3V y -3V.....	64
Tabla 3.21. Recuento de cargas para voltajes de 5V.....	65
Tabla 3.22. Características del módulo Power Boost 1000 Charger.....	66
Tabla 3.23. Características de la Batería Ion Litio 3,7V – 6,6Ah de Adafruit.....	67
Tabla 3.24. Características del panel solar seleccionado.....	68
Tabla 4.1. Cálculo del costo aproximado del sistema.....	76
Tabla 4.2. Criterios recomendados para la altura de ubicación de los nodos sensoriales.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág
Figura 1.1. Crecimiento espacial de la ciudad de Lima en el último siglo.....	10
Figura 1.2. Conformación de una unidad sensorial.....	16
Figura 1.3. Arquitectura del sistema.....	17
Figura 1.4. Conformación de una unidad sensorial.....	18
Figura 1.5. Conformación de una un nodo de coordinación.....	18
Figura 1.6. Gráficas resultantes del monitoreo de contaminantes (CO2).....	19
Figura 1.7. Nodo Sensorial MGS.....	20
Figura 1.8. Arquitectura para la predicción de cantidad de contaminantes.....	21
Figura 1.9. Gráfica de predicción de concentración de contaminante (O3).....	22
Figura 2.1. Black-Box que representa el sistema en general.....	27
Figura 2.2. Módulo de servicio web.....	28
Figura 2.3. Módulo de energía.....	28
Figura 2.4. Módulo mecánico.....	29
Figura 2.5. Módulo de sensorizado.....	30
Figura 2.6. Módulo de emergencia.....	31

Figura 2.7. Módulo de control.....	32
Figura 2.8. Esquema del concepto de solución desarrollado.....	38
Figura 2.9. Concepto de solución desarrollado.....	38
Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema electrónico del proyecto.....	39
Figura 3.2. Procedencia de los contaminantes producto de la combustión en un automóvil.....	40
Figura 3. 3. Contaminantes a monitorear en función a las principales fuentes.....	41
Figura 3.4. Curva de medición del sensor de gas MQ7.....	45
Figura 3.5. Curva de medición del sensor de gas ME3 - CO.....	46
Figura 3.6. Curva de medición del sensor de gas Alphasense - CO.....	47
Figura 3.7. Circuito de instrumentación que acompaña al sensor Winsen ME3 - CO.....	48
Figura 3.8. Curva de medición del sensor de gas ME3 – NO2.....	50
Figura 3.9. Curva de medición del sensor de gas Alphasense – NO2.....	51
Figura 3.10. Circuito de instrumentación que acompaña al sensor Winsen ME3 – NO2.....	52
Figura 3.11. Curva de medición del sensor óptico GP2Y1010AU0F.....	53
Figura 3.12. Curva de medición del sensor óptico DSM501A.....	54
Figura 3.13. Definición de low ratio para el sensor óptico DSM501A.....	54
Figura 3.14. Circuito de acondicionamiento que acompaña al sensor óptico GP2Y1010AU0F.....	55
Figura 3.15. Weather Sensor Assembly.....	56
Figura 3.16. Circuito de acondicionamiento que acompaña al Weather Sensor Assembly.....	57
Figura 3.17. DHT11 Sensor.....	58
Figura 3.18. Topología Estrella aplicada para el protocolo MQTT.....	59
Figura 3.19. Módulo SIM900GMS.....	60

Figura 3.20. Microcontrolador ATmega 2560 versión SMD.....	62
Figura 3.21. Circuito de acompañamiento al microcontrolador Atmega 2560.....	63
Figura 3.22. Circuito de conversión de 5V a -3V/3V.....	65
Figura 3.23. Módulo Power Boost 1000 Charger.....	67
Figura 3.24. Batería Ion Litio 3,7V – 6,6Ah de Adafruit.....	67
Figura 3.25. Esquemático completo del circuito de potencia.....	69
Figura 3.26. Case de protección del circuito de poder y baterías.....	70
Figura 3.27. Case de protección de tarjeta principal y módulo de comunicaciones.....	71
Figura 3.28. Soporte de los sensores de clima.....	71
Figura 3.29. Estructura soporte del sistema hecha en aluminio.....	72
Figura 3.30. Sistema ensamblado.....	72
Figura 3.31. Diagrama de flujo del programa principal.....	73
Figura 3.32. Diagramas de flujo de la función y rutinas de interrupción involucradas con la obtención de medidas.....	75
Figura 4.1. Criterios del método EMOD/CAMP y superficie de concentración.....	77
Figura 4.2. Mapa de vientos de la ciudad de Lima.....	78
Figura 4.3. Criterios aplicados para la determinación de la ubicación de los nodos sensoriales.....	79
Figura 4.4. Superficie de características similares al modelo.....	80
Figura 4.5. Características del dispositivo utilizado en la prueba de concepto.....	83
Figura 4.6. Comunicación serial con el NodeMCU mientras se ejecuta la prueba de concepto.....	84
Figura 4.7. Gestión de datos en la plataforma IOT de IBM.....	84

CÁPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática

El desarrollo de la industria durante los últimos dos siglos ha tenido un impacto superlativo en la calidad de vida del ser humano. La aplicación de la ciencia y la tecnología en la industria ha permitido la satisfacción de necesidades, el potenciamiento de la investigación y la mejora de la calidad de vida del ser humano. Estos aspectos positivos han motivado alrededor del mundo la migración de las masas del campo a la ciudad y con ello el crecimiento demográfico y espacial de las ciudades donde residen las principales industrias. El Perú no ha sido ajeno a este fenómeno global; basta con verificar la evolución de su principal metrópoli, la ciudad de Lima, en los últimos cien años como se puede observar en la imagen mostrada a continuación.

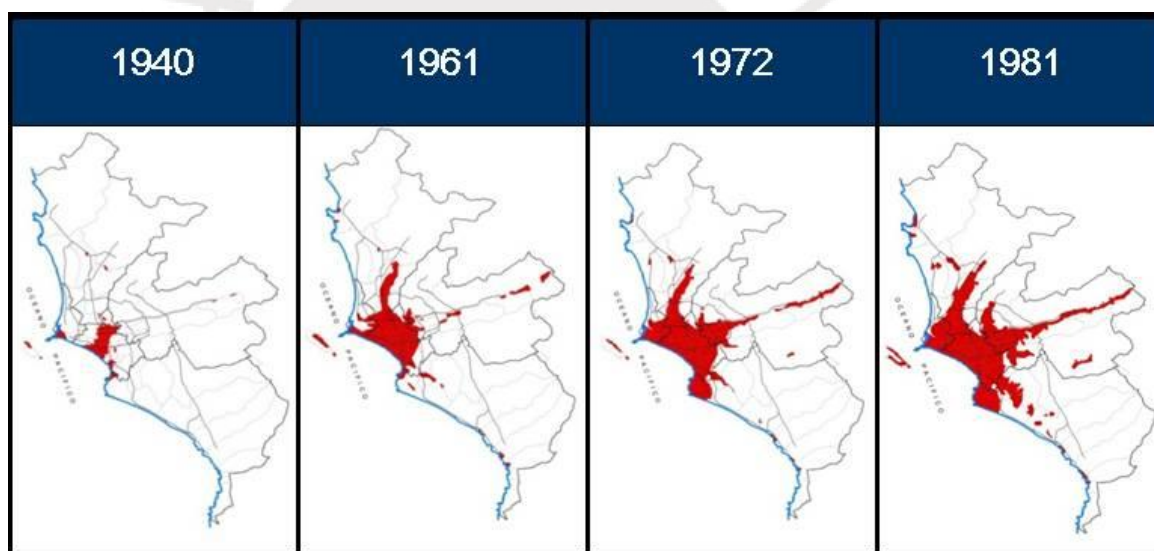


Figura 1.1. Crecimiento espacial de la ciudad de Lima en el último siglo.

(Fuente: [1])

La expansión de la ciudad es directamente proporcional a las necesidades que surgen entre sus ciudadanos. Las metrópolis o ciudades grandes, sobre todo en Latinoamérica, han crecido de forma poco planificada configurando diferentes áreas donde se mezclan zonas residenciales e industriales, y separando ineficientemente los centros de producción y la infraestructura de comunicaciones como los puertos y los aeropuertos. En este contexto, la necesidad de transporte resulta evidente y ha incentivado el surgimiento de soluciones que la satisfagan sin importar el impacto

negativo que puedan tener. Dentro de estas soluciones destaca de sobremanera el uso del automóvil y en general sistemas accionados por motores de combustión interna ya sea para transporte particular o masivo. Es esa línea es como se ha configurado el parque automotor de Lima que según estadísticas del INEI representa aproximadamente el 65% del total nacional como se puede observar en la tabla mostrada a continuación.

19.22 PARQUE AUTOMOTOR EN CIRCULACIÓN A NIVEL NACIONAL, SEGÚN DEPARTAMENTO, 2004 - 2012									
(Unidades)									
Departamento	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Total	1 361 403	1 440 017	1 473 530	1 534 303	1 640 970	1 732 834	1 849 690	1 979 865	2 137 837
Arequipa	78 858	79 544	81 293	84 829	91 674	98 270	106 521	118 985	134 533
Cusco	35 342	35 705	36 204	37 592	39 688	42 175	45 090	48 491	53 675
Ica	22 692	22 753	22 834	23 170	25 498	25 691	26 135	26 419	26 551
Junín	43 468	43 648	44 454	46 091	47 769	49 404	51 094	53 118	56 237
La Libertad	97 590	153 777	152 847	153 251	155 411	156 646	158 672	162 026	167 325
Lambayeque	37 967	38 263	38 744	39 930	41 920	43 689	45 881	49 440	53 902
Lima 1/	866 881	885 636	912 763	957 368	1 036 850	1 106 444	1 195 353	1 287 454	1 395 576
Piura	31 731	31 734	31 828	32 314	33 497	34 650	36 367	39 099	42 404
Puno	25 642	25 874	26 452	28 062	29 889	31 645	34 169	37 074	40 543
Tacna	30 549	31 119	32 011	33 944	35 911	38 457	40 465	42 318	44 430

Nota : Información estimada, considera la tasa de baja anual.
 1/ Incluye la Provincia Constitucional del Callao.
Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones - Oficina General de Planificación y Presupuesto.

Tabla 1.1. Distribución del parque automotor nacional en los principales departamentos.

(Fuente: [2])

El uso del automóvil como medio de transporte demostró su eficacia en los primeros años de uso antes de las grandes migraciones del campo a la ciudad que acontecieron en Lima. Sin embargo, hoy en día, en una ciudad que alberga cerca del 30% de la población peruana [3]; la concentración del parque automotor en actividad en distintas zonas de la urbe se postula como el origen de diversos problemas que afectan a los ciudadanos a corto y largo plazo. En primer lugar, la gran cantidad de vehículos en operación genera problemas de tráfico, siendo cada vez más el tiempo que tarda desplazarse entre dos puntos distintos en la ciudad. Por otro lado, y más importante, existe una relación directa entre la cantidad de vehículos presentes en determinados puntos de la ciudad y la presencia en mayor medida de contaminantes nocivos para el ser humano.

El problema de la contaminación del aire urbano ha cobrado relevancia en los últimos cincuenta años al comprobarse su relación con enfermedades respiratorias, cardiovasculares y algunos tipos de cáncer. Hasta el año 2012, según estadísticas de la organización mundial de la salud (OMS), la contaminación atmosférica presente en áreas urbanas y rurales causa aproximadamente tres millones de defunciones por año [4]. Es por ello que distintas asociaciones gubernamentales y civiles alrededor del mundo se buscan alternativas para mitigar, en la medida de lo posible, este problema. Acorde a esta idea, la OMS en el desarrollo del texto “Las Directrices de la OMS sobre la Calidad del Aire” establece un conjunto de límites o umbrales para los contaminantes atmosféricos más importantes presentes en zonas urbanas [4]. Estos valores han sido adaptados por cada país miembro de la organización según sus necesidades particulares, es así, como para el Perú se tienen como límites los establecidos por el ministerio de salud, en específico, por la oficina general de salud ambiental que son mostrados a continuación en la tabla 2.

CONTAMINANTE	PERIODO	FORMA DEL ESTANDAR	
		VALOR (ug/m3)	FORMATO
Dióxido de Azufre	Anual	80	Media Aritmética Anual
	24 horas	365	NE mas de 1 vez al año
PM - 10	Anual	50	Media Aritmética Anual
	24 horas	150	NE mas de 1 vez al año
Monóxido de Carbono	8 horas	10000	Promedio Móvil
	1 hora	30000	NE mas de 1 vez al año
Dióxido de Nitrógeno	Anual	100	Media Aritmética Anual
	1 hora	200	NE mas de 24 veces al año
Ozono	8 horas	12	NE mas de 24 veces al año
Plomo	Mensual	1,5	NE mas de 4 veces al año. Prom. Aritmético de los valores mensuales
	Anual	0,5	

Tabla 1.2. Valores límite de los principales contaminantes presentes en área urbana para Perú.

(Fuente: [5])

El mapeo de la contaminación en base a estos valores representa por lo antes mencionado una necesidad que debe ser atendida por el gobierno. Realizarla requiere una disposición de recursos económicos y de la logística que permita reunir información, realizar su filtrado y verificar que se cumple con los estándares. En el

caso de la ciudad de Lima se cuenta con un plan de monitorización dirigido por el servicio nacional de meteorología y hidrología (SENAMHI) en colaboración con la municipalidad metropolitana. Sin embargo, este esfuerzo resulta limitado por la insuficiente cantidad y calidad de información recopilada ya que solo se dispone de diez puntos de monitorización para una ciudad cuya población está próxima a alcanzar el número de diez millones de habitantes [6].

Ante este escenario, las respuestas o posibles acciones que se puedan tomar para mitigar el problema también resultan limitadas ya que no se cuenta con información rápida y concisa que permita plantear o justificar soluciones en minutos; por el contrario, las políticas adoptadas hasta ahora son establecidas para tiempos más largos (meses, semestres o años) y sus efectos son medidos con el retraso que ello permite.

En ese sentido, surge la necesidad de desarrollar un sistema automático que permita recolectar datos en tiempo real de los contaminantes presentes en la atmósfera cuyo alcance esté acorde al tamaño de la ciudad. El sistema descrito debe contar por ello con nodos sensoriales capaces de medir los indicadores recomendados por la OMS pero a la vez ser de bajo costo de operación, mantenimiento y producción de modo que sean fácilmente replicables. La existencia de tal sistema permitirá determinar en un tiempo corto el estado de contaminación de ciertos puntos de la ciudad de modo que se puedan tomar decisiones rápidas para evitar la sobreexposición de sus habitantes a niveles nocivos de materia contaminante. Además de ello, la innovación permitirá disminuir los gastos asociados a logística que sí se contemplan soluciones tradicionales.

1.2. Constitución del proyecto

En el presente apartado se realizará una revisión del alcance del proyecto de tesis constituida por el objetivo general y objetivos específicos; así como, las restricciones que se respetarán durante el desarrollo del mismo descritas en el enunciado del alcance.

1.2.1. Objetivo General:

Realizar el diseño de un sistema embebido que permita realizar la medición de los contaminantes principales presentes en Lima Metropolitana en tiempo real.

1.2.2. Objetivos Específicos:

- Realizar la revisión y contextualización del estado del arte respecto a soluciones de monitorización de contaminantes en aire de zonas urbanas.
- Definir los contaminantes cuya medición sea prioridad de acuerdo al contexto presente en la ciudad de Lima y según los parámetros promovidos por la OMS.
- Definir sensores adecuados para los contaminantes que son prioritarios de medir en la ciudad de Lima.
- Definir un sistema de comunicación que facilite la integración del sistema embebido con plataformas IOT comerciales.
- Realizar el diseño de un sistema electrónico que integre lo definido en el proceso de concepción de la solución que sea de bajo costo de producción y mantenimiento.
- Realizar el diseño de un sistema de alimentación para el sistema embebido que haga uso de energías renovables de forma eficiente.
- Definir las zonas dentro de la ciudad de Lima en las que, según sus características, se desempeñaría el sistema embebido.

- Desarrollar un modelo de baja fidelidad que permita validar el sistema de comunicación que usará el dispositivo usando una plataforma IOT comercial.
- Documentar resultados obtenidos del proceso de diseño y validación.
- Comunicar conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos relacionados.

1.2.3. Enunciado del alcance:

El presente documento abordará el diseño de un sistema embebido que cuente con un conjunto de sensores integrados para poder realizar las mediciones en tiempo real de los principales contaminantes presentes en área urbana que la Organización Mundial de la Salud recomienda controlar. Estos contaminantes son: Dióxido de azufre, Monóxido de carbono, Dióxido de nitrógeno, Ozono y Plomo. El sistema deberá ser de bajo costo de operación y mantenimiento de modo que sea fácil su replicación, adicionalmente, debe diseñarse acorde a las condiciones climáticas y riesgos presentes en la ciudad de Lima.

Por otro lado, el sistema desarrollado debe estar en la capacidad de enviar información de las mediciones a través de internet, para lo cual dentro del trabajo de tesis se contempla la definición una arquitectura capaz de brindarle soporte a un conjunto de estos dispositivos durante su operación en un entorno real. La arquitectura establecida dentro del paradigma IOT (Internet of Things) debe ser capaz de recibir y almacenar las mediciones de los sistemas embebidos en tiempo real dentro de una base de datos, así como, ser fácilmente adaptable a una futura aplicación de algoritmos de procesamiento de datos y de aprendizaje automático.

1.3. Antecedentes (Estado del Arte)

1.3.1. Sistema integral para monitorizar polución urbana desde el transporte urbano basado en una red de sensores múltiples [7]

Este sistema desarrollado por ingenieros españoles, busca usar los vehículos del sistema de transporte público como instrumentos de medición de los principales contaminantes presentes en área urbana. El sistema planteado en esta investigación cuenta con sensores para determinar las cantidades de monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y dióxido de carbono; así como, temperatura y presión atmosférica como se ilustra en la Figura 1.2.

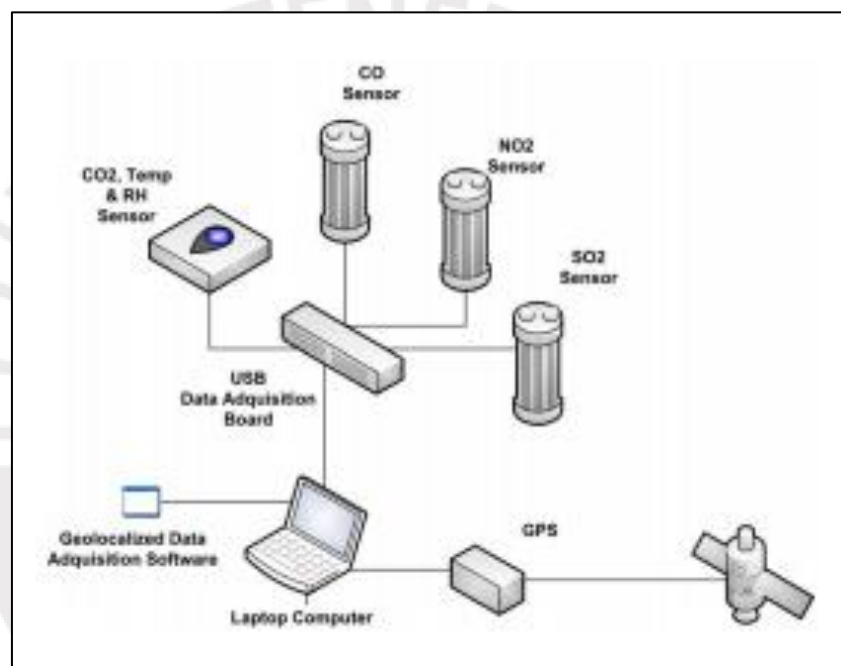


Figura 1.2. Conformación de una unidad sensorial.

(Fuente: [7])

Para el cumplimiento de su tarea, se define que el nodo sensorial enviará los datos a un servicio web de arquitectura distribuida como se muestra en la Figura 1.3. La arquitectura define un conjunto de cuatro procesos para el funcionamiento del sistema de forma integral consistentes en la adquisición de data en tiempo real y su almacenamiento, el procesamiento de la data para eliminar errores en la medición, análisis de estos datos y finalmente visualización de los mismos en una página web.

La ventaja de realizar los sistemas de forma portátil reside en el hecho de que los costos de mantenimiento reducen radicalmente debido a que este se realiza en la estación de los buses. Además de ello estos buses con la capacidad de mapear los contaminantes realizan el recorrido en zonas urbanas con nivel de contaminación por encima del promedio. Sin embargo, la propuesta no es completa ya que no desarrolla que contaminantes son prioritarios medir o controlar y no necesariamente es replicable ya que usa sensores de gran tamaño y costo.

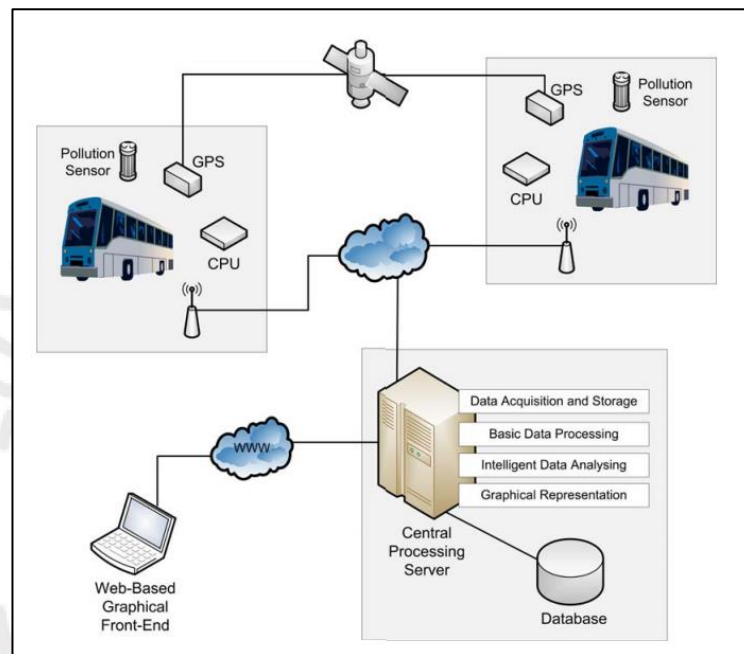


Figura 1.3. Arquitectura del sistema.

(Fuente: [7])

1.3.2. Diseño de una red de sensores inalámbricos para monitorización del tráfico vehicular y contaminación en zona urbana [8]

Este sistema desarrollado en la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca en Ecuador consiste en un nodo sensor de bajo costo conformado por componentes electrónicos comerciales entre los que resalta para cubrir la función de procesamiento un Arduino Nano que recibe las mediciones realizadas por un detector de ruido y un módulo MG-811 especializado en obtener la cantidad de CO2 presente en el aire como se muestra en la Figura 1.4.

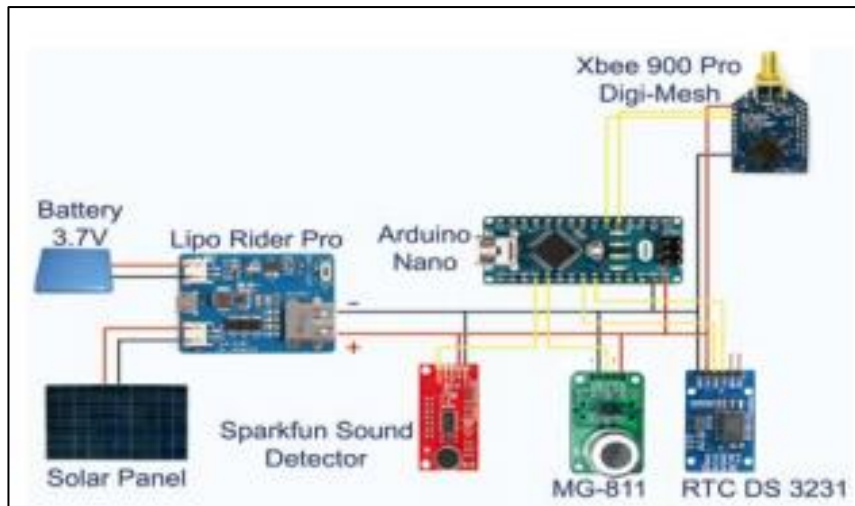


Figura 1.4. Conformación de una unidad sensorial.

(Fuente: [8])

La comunicación entre los nodos sensoriales se realiza a través de bluetooth con ayuda del módulo XBee. Para su efectividad el sistema establece una tipología de red de estrella en la que se cuenta en la periferia con nodos sensoriales y en el centro con un nodo receptor de coordinación que es el encargado de recibir la trama de información, este último cuenta con un Raspberry pi 3 que actúa como datalogger y realiza el envío de la información ordenada al servicio web. El nodo de coordinación y sus principales componentes son mostrados en la Figura 1.5.

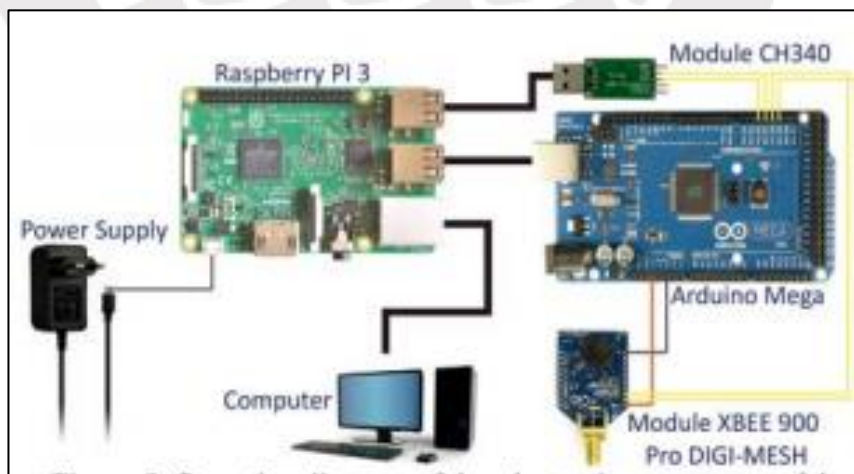


Figura 1.5. Conformación de una un nodo de coordinación.

(Fuente: [8])

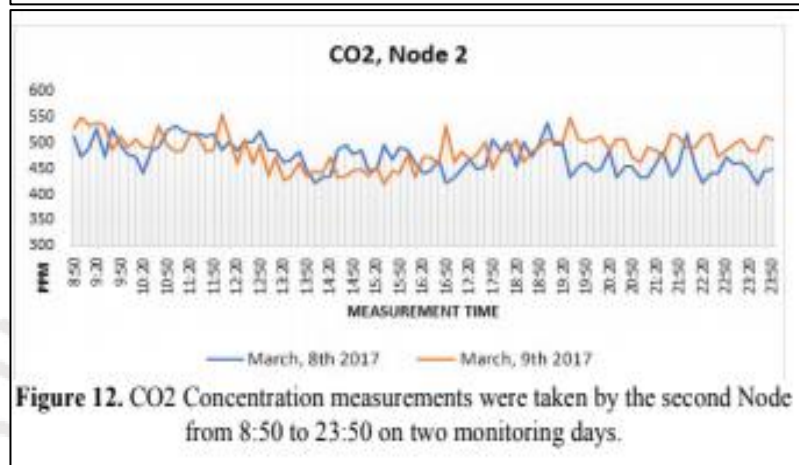
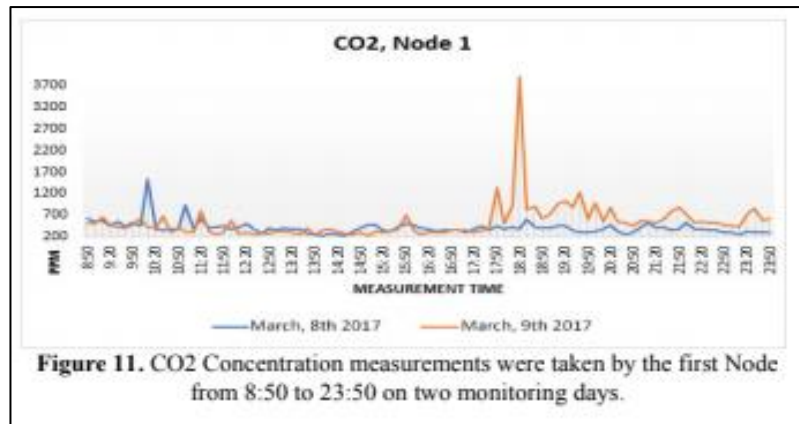


Figura 1.6. Gráficas resultantes del monitoreo de contaminantes (CO2).

(Fuente: [8])

La investigación menciona algunos de los aspectos claves en una solución similar como es la elección de una topología de red adecuada según el tipo de zona a monitorizar, esta exigencia adicional se solucionaría si es que cada nodo sensorial tuviera la capacidad de enviar sus mediciones directamente sin pasar por el nodo de coordinación. Por otro lado, los datos son enviados a una computadora y mostrados en una interfaz de usuario de escritorio. Finalmente se aprecia en la Figura 1.6. las gráficas resultantes de la toma de medidas de los nodos sensoriales en donde se aprecia variaciones bruscas entre mediciones que deberían poder solucionarse en un desarrollo futuro.

1.3.3. Sistema de monitoreo de contaminantes del aire urbano con modelos de pronóstico [9]

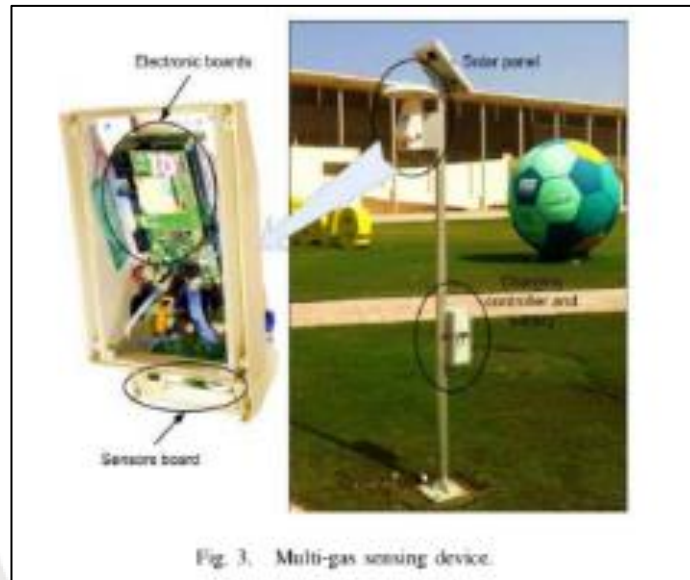


Figura 1.7. Nodo Sensorial MGS.

(Fuente: [9])

El sistema desarrollado por ingenieros investigadores de la universidad de Qatar consiste en la utilización de MGS (Sensores de múltiples gases) proyecto de hardware piloto de la empresa QMIC (Qatar Mobility Innovations Center) que cuenta con sensores especializados en determinar la cantidad de contaminantes presentes en una ciudad que son recomendables de mapear según la OMS. Se cuenta con la capacidad de medición de un máximo de cuatro gases por nodo sensorial, además de información de la dirección del viento, temperatura y humedad relativa. El valor agregado del hardware de este proyecto es que cuenta con un sistema de alimentación que aprovecha el clima propio de Qatar para recopilar energía a través de paneles solares. El nodo sensorial MGS se puede observar en la Figura 1.7.

Para la comunicación se hace uso del protocolo M2M que permite centralizar los datos en un nodo de recepción o antena para ser puestos en internet mediante un canal seguro y centralizado en un servidor web. Un punto adicional de la propuesta es la aplicación sobre estos datos de algoritmos de Machine Learning que permitan resolver tendencias y permita predecir los niveles de contaminación que se tendrían a determinada hora del día.

En ese sentido, la Figura 1.8. muestra la estructura del sistema de predicción desarrollado en el proyecto que consiste en una fase de integración de los datos y su preprocesamiento para la conformación de sets de datos útiles para el entrenamiento del algoritmo y la validación del modelo de predicción obtenido.

El modelo y la predicción que ofrece le permite al equipo obtener gráficos como las mostradas en la figura 1.9. en las que se obtiene que la cantidad medida de ozono corresponde a la predicha con el modelo obtenido. Es por ello, que este proyecto, permite esclarecer que futuros desarrollos en cuanto a hardware de monitoreo deberían estar encaminados a obtener data fiable para ejecutar sobre ellos algoritmos de aprendizaje automático que permitan darle un uso certero y facilitar la toma de decisiones.

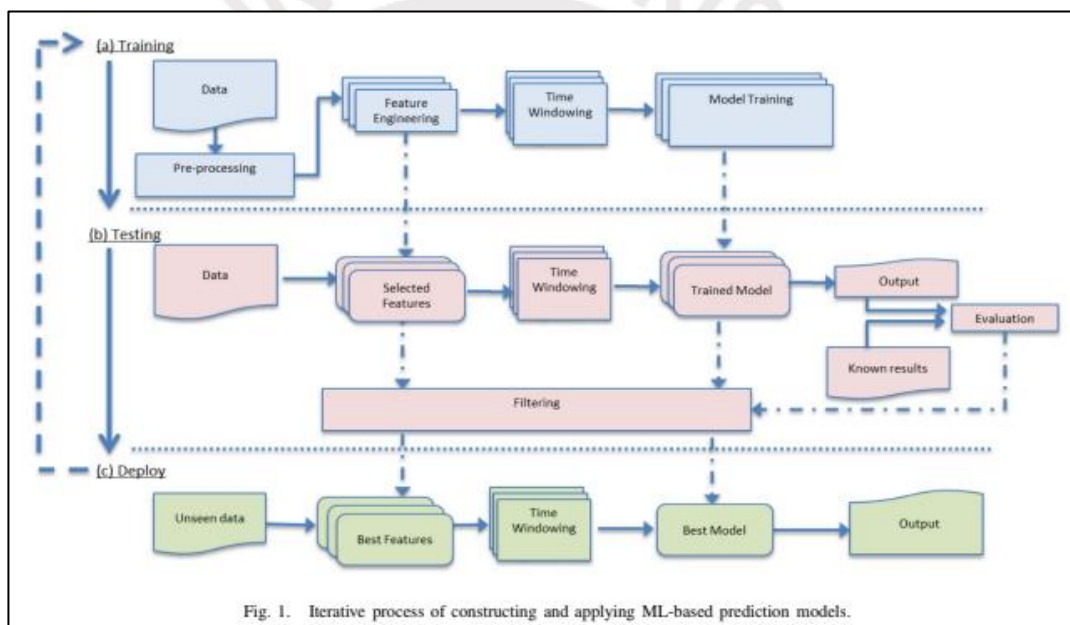


Fig. 1. Iterative process of constructing and applying ML-based prediction models.

Figura 1.8. Arquitectura para la predicción de cantidad de contaminantes.

(Fuente: [9])

En general, las alternativas de solución mostradas en el estado del arte permiten configurar las características que debería tener una solución desarrollada en la línea de monitoreo de contaminantes presentes en el aire de una zona urbana.

Se destaca la elección adecuada de los sensores de acuerdo al contexto donde se requiere medir, la sostenibilidad de la operación del dispositivo en base al uso de energías renovables, la elección de un adecuado método de comunicación con la tecnología y tipología de red adecuada para el uso y finalmente la necesidad de la

fiabilidad de las medidas para su uso en posteriores desarrollos futuros que impliquen algoritmos de aprendizaje automático y predicción. [9]

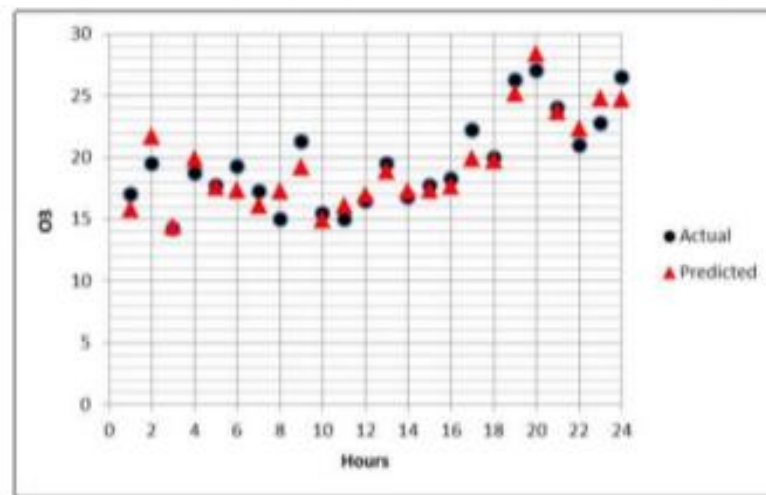
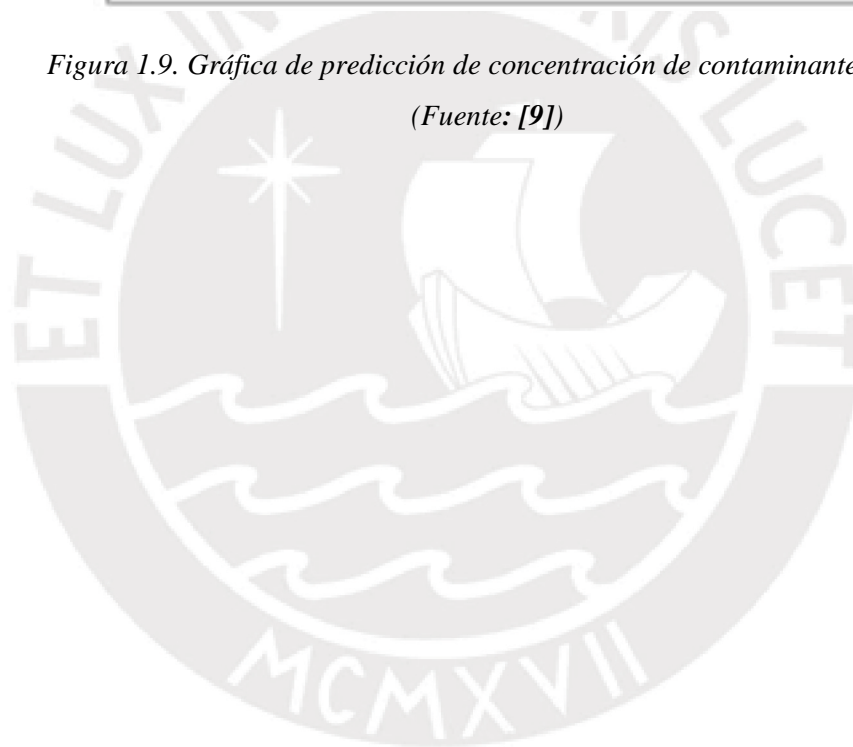


Figura 1.9. Gráfica de predicción de concentración de contaminante (O3).

(Fuente: [9])



CÁPITULO 2: DISEÑO DEL CONCEPTO DE SOLUCIÓN

2.1. Requerimientos de diseño:

El presente apartado contiene la lista de requerimientos divididos por dominios y características. Los requerimientos desarrollados de manera obligatoria en el presente trabajo son denominados exigencias mientras que todos aquellos que tiene posibilidad de ser tratados, pero no son obligatorios en la tesis son denominados deseos. En las siguientes páginas, se presenta el listado de requerimientos de acuerdo al formato descrito en la norma VD2206 [10]:

LISTA DE EXIGENCIAS			Página 1 de 1
			Edición: 1ra edición
PROYECTO:	Diseño de un sistema embebido de sensado de bajo costo para una red de monitoreo en tiempo real de contaminantes atmosféricos presentes en zonas urbanas		Fecha: 05/05/2018 Revisado: 15/05/2018
CURSO:	Trabajo de fin de carrera		Elaborado por: Juan M. Mendoza
Fecha de modificación	Exigencias o Deseos	Descripción	Responsable
FUNCIÓN PRINCIPAL			
15/07/2018	E	El sistema es capaz de medir la concentración de los principales contaminantes presentes en zona urbana y realizar el envío de esta información para su procesamiento y análisis de forma externa.	Juan M. Mendoza
GEOMETRÍA			
15/07/2018	E	El tamaño del sistema debe de estar dentro de un volumen igual a 1m x 1m x 1m.	Juan M. Mendoza
15/07/2018	D	El tamaño del sistema debe de estar dentro de un volumen igual a 0,6m x 0,6m x 0,6m. (Recomendación dispuesta por ergonomía)	Juan M. Mendoza

ZONA DE TRABAJO			
15/07/2018	E	El sistema debe contar con todo lo necesario para ser dispuesto en la zona superior de las edificaciones en zona urbana.	Juan M. Mendoza
FUERZAS Y ERGONOMÍA			
15/07/2018	E	El sistema deberá mantener la estabilidad y rigidez antes y después de su operación soportando la fuerza del viento presente en zonas urbanas.	Juan M. Mendoza
15/07/2018	E	El sistema debe tener un peso menor a 25 kg antes y después de su operación. (Recomendación dispuesta por ergonomía)	Juan M. Mendoza
15/07/2018	D	El sistema debe tener un peso menor a 10 kg antes y después de su operación.	Juan M. Mendoza
ENERGÍA			
15/07/2018	D	El sistema debe ser alimentado eléctricamente por baterías que pueden ser recargadas mediante suministro eléctrico de baja tensión (220 VAC).	Juan M. Mendoza
15/07/2018	E	Las baterías del sistema deben permitir la operación del sistema por un día sin recarga de energía.	Juan M. Mendoza
15/07/2018	D	El sistema realizará un uso eficiente de la energía.	Juan M. Mendoza
15/07/2018	D	El sistema debe poder recargar sus baterías mediante el aprovechamiento de la radiación solar.	Juan M. Mendoza
15/07/2018	D	Se podrá cambiar las baterías del sistema de forma rápida para una operación continua.	Juan M. Mendoza
MATERIA Y FABRICACIÓN			
15/07/2018	E	El soporte del sistema debe contener materiales mecánicos livianos de gran resistencia.	Juan M. Mendoza
15/07/2018	D	Los componentes diseñados deben poder ser fabricados en el país.	Juan M. Mendoza
15/07/2018	D	Los componentes seleccionados deben poder ser adquiridos en el país.	Juan M. Mendoza

SEGURIDAD			
15/07/2018	E	Sistema aislado eléctricamente previniendo descargas eléctricas al usuario o fugas de corriente. Incluyendo la protección frente a la penetración de fluidos o agentes externos.	Juan M. Mendoza
15/07/2018	E	Los datos recibidos y enviados por el sistema deben estar protegidos frente a la manipulación o robo de un agente externo (Seguridad Informática).	Juan M. Mendoza
15/07/2018	E	El sistema deberá contar con un mecanismo que pueda alertar de su manipulación o robo físico de parte de un agente externo.	Juan M. Mendoza
15/07/2018	D	En caso de falla el sistema contará con un medio de alerta al usuario.	Juan M. Mendoza
15/07/2018	D	Sistema contará con apagado en caso de falla o emergencia.	Juan M. Mendoza
ELECTRÓNICA			
15/07/2018	E	Se contará un circuito de protección de baterías.	Juan M. Mendoza
15/07/2018	E	Se diseñará adecuadamente la disipación de calor de los circuitos electrónicos teniendo en cuenta el clima de la zona de trabajo.	Juan M. Mendoza
CONTROL Y SEÑALES			
15/07/2018	E	Señales de entrada: Parámetros. Acciones de control dadas por el usuario. Señales de salida: Tramas de datos con la información colectada de los sensores	Juan M. Mendoza
15/07/2018	E	El sistema tendrá la capacidad de conectarse a un servicio web al cual enviará información y del que recibirá instrucciones de operación	Juan M. Mendoza
15/07/2018	D	El sistema contará con una interfaz de usuario para la entrada de parámetros de trabajo y monitorización.	Juan M. Mendoza
15/07/2018	D	El sistema tendrá la capacidad de conectarse a un dispositivo Bluetooth local para su manipulación durante su mantenimiento.	Juan M. Mendoza

PROTECCIÓN LEGAL Y CALIDAD			
15/07/2018	E	El diseño debe poder ser documentado y patentado de acuerdo a las normas peruanas (INDECOPI) e internacionales (ISO, DIN e IEC).	Juan M. Mendoza
15/07/2018	E	Las mediciones realizadas seguirán las normas definidas y dispuestas por el Ministerio de Salud, OEFA y otros entes involucrados con el monitoreo ambiental.	Juan M. Mendoza
TRANSPORTE			
15/07/2018	E	El sistema debe ser fácil de transportar por un par de personas.	Juan M. Mendoza
15/07/2018	D	El sistema debe ser fácil de transportar por una persona	Juan M. Mendoza
MANTENIMIENTO			
15/07/2018	D	El diseño debe ser modular y completamente desarmable para realizar fácilmente mantenimiento o reparación.	Juan M. Mendoza
CONDICIONES DE USO			
15/07/2018	E	Volumen de ruido generado durante operación inferior a 60 decibelios	Juan M. Mendoza
15/07/2018	E	Operación normal en región urbana similar al existente en la ciudad metropolitana de Lima (Temperatura: 15-25°, Humedad relativa: 85-90%).	Juan M. Mendoza
15/07/2018	D	Capacidad para operar en otras regiones y ciudades.	Juan M. Mendoza
COSTO			
15/07/2018	E	El sistema completo (diseño y fabricación) debe tener un costo menor igual a 1500 dólares americanos.	Juan M. Mendoza

Tabla 2.1. Requerimientos de diseño del proyecto.

2.2. Estructura de funciones:

El presente apartado establecerá el conjunto de funciones que deberían tener las soluciones planteadas al problema global (Diseño de un sistema embebido de sensado de bajo costo para una red de monitoreo en tiempo real de contaminantes atmosféricos en zonas urbanas), además de ello se establecen las relaciones internas entre estas funciones, así como, sus entradas y salidas. Esta estructura ha sido determinada planteando el proceso que debería seguir el sistema a crear y se resume en una caja negra presentada a continuación:



Figura 2.1. Black-Box que representa el sistema en general.

La función general antes presentada se desarrolla de forma más específica en una estructura de funciones. A continuación, se explicarán los módulos que la componen: (Todos ellos a excepción del módulo de energía consumen energía eléctrica y generan pérdidas como ruido, vibraciones y calor)

2.2.1. Servicio Web

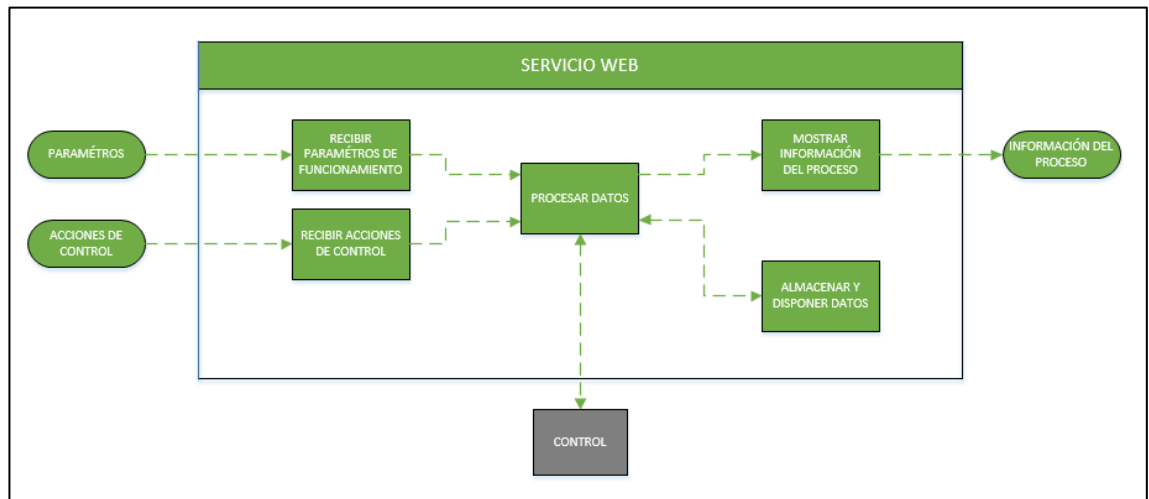


Figura 2.2. Módulo de servicio web.

El módulo de servicio web es el único que es externo al sistema embebido por lo que tiene su propia fuente de alimentación y desecho de residuos no incluidas en el gráfico. Por otro lado, es capaz de recibir los parámetros y acciones de control desde una interfaz de usuario; realizar un filtro de primera instancia para luego transmitirla al sistema embebido mediante internet. Así mismo, es capaz de recibir del sistema embebido las tramas de datos categorizadas por contaminantes, realizar su almacenamiento en una base de datos y permitir su presentación al usuario mediante gráficas.

2.2.2. Energía

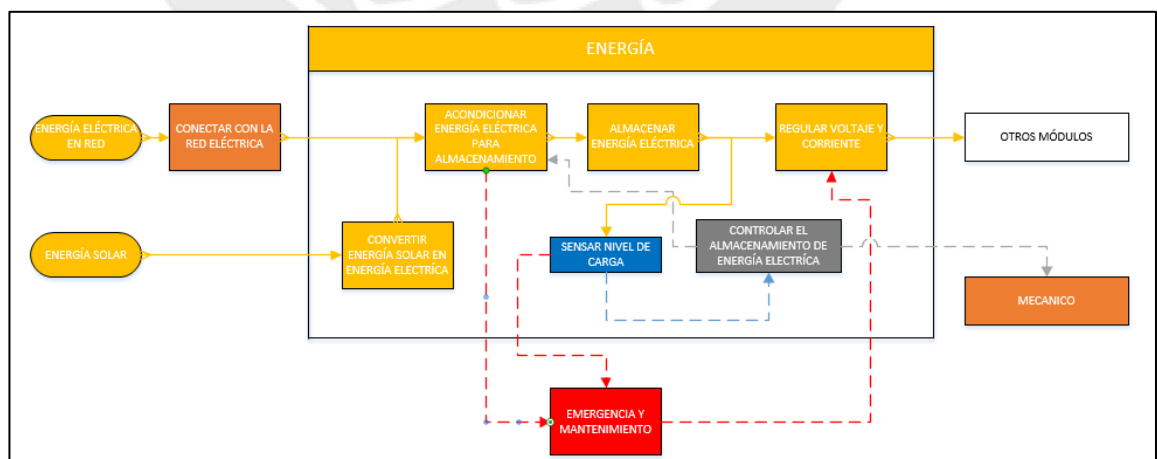


Figura 2.3. Módulo de energía.

Se encarga de recibir energía eléctrica del suministro de baja tensión a 220 VAC o aquella proveniente del sol y acondicionarla para su almacenamiento y utilización en otros módulos del sistema.

El módulo cuenta con un control de carga de baterías que verifica su nivel de carga y un control que le permita seleccionar su fuente de alimentación; así mismo, se comunica con el módulo mecánico en caso se requiera realizar el desplazamiento de los paneles solares para la mayor colección de energía. Por otro lado, realiza el envío de señales indicadoras al módulo de emergencia en caso de algún inconveniente con las baterías o sobrecarga y recibe de este la orden para el apagado en caso de ser necesario.

2.2.3. Mecánica

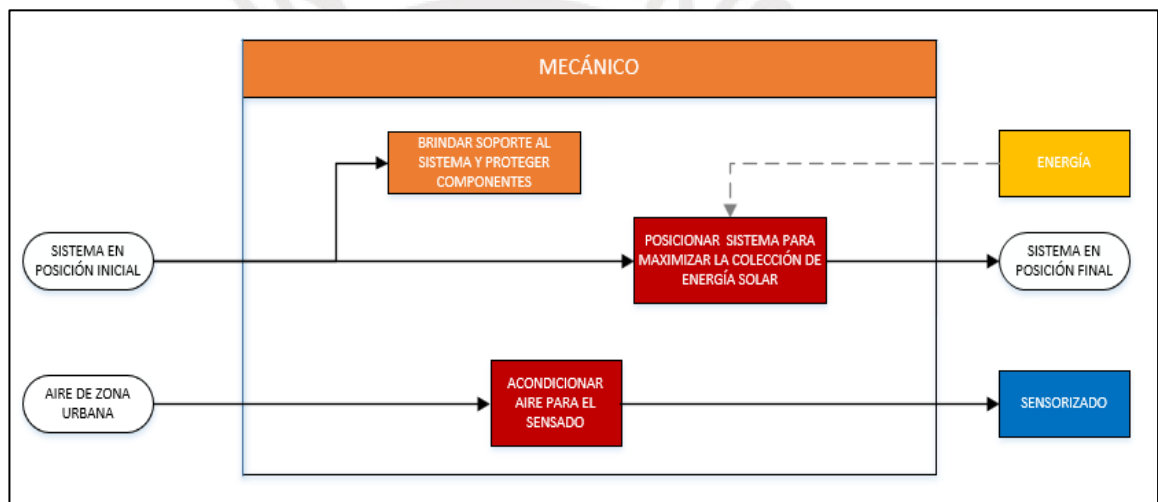


Figura 2.4. Módulo mecánico.

Este módulo alberga la función de soporte y protección de componentes internos, además de disponer los dispositivos de captación de energía solar para poder absorber la cantidad necesaria para el correcto funcionamiento del sistema. Por otro lado, también debe captar y acondicionar el aire para su sensorizado.

2.2.4. Sensorizado

El módulo de sensorizado es el más importante del proyecto ya contiene los dispositivos electrónicos capaz de determinar la cantidad de contaminantes presentes en el aire acondicionado por la parte mecánica. La medición obtenida de los sensores en su mayoría señales analógicas pasa por un módulo de filtrado y acondicionamiento antes de ser enviada al módulo de control. En esta fase se

consideran la medición de todas las sustancias relacionadas con la calidad de aire de forma general que son el monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), plomo (Pb), concentración de partículas PM₁₀, concentración de partículas PM_{2.5}, temperatura ambiental, velocidad y dirección del viento. Sin embargo, en posteriores capítulos se evaluará la pertinencia de todos estos sensores bajo criterios económicos y técnicos.

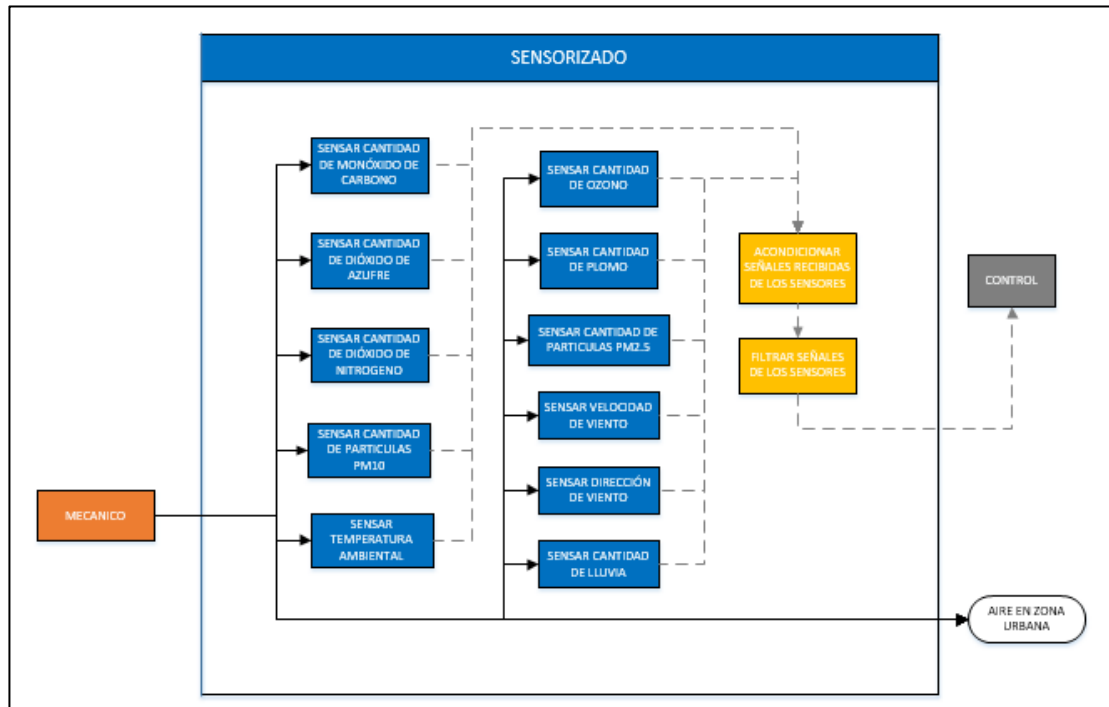


Figura 2.5. Módulo de sensorizado.

2.2.5. Emergencia

El módulo de emergencia permite dar una respuesta en caso de cualquier eventualidad durante la operación del sistema. Este módulo monitorea principalmente tanto la temperatura cómo la energía con la que cuenta el sistema para que en caso las mediciones obtenidas de estos parámetros sean críticas se accione una alarma y se dé aviso al usuario a través del controlador.

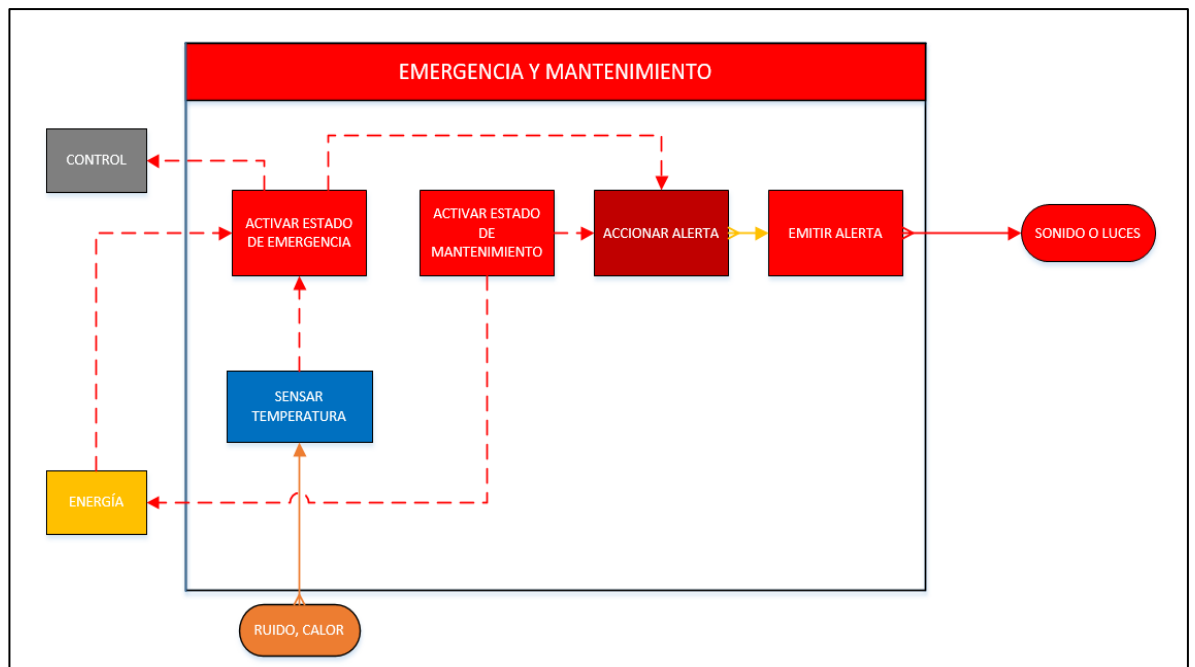


Figura 2.6. Módulo de emergencia.

2.2.6. Control

El módulo de control es el encargado de gestionar los otros módulos del sistema. Su principal función consiste en recibir correctamente los datos obtenidos de las mediciones del módulo de sensorizado para su conversión a datos digitales, procesamiento con algoritmos de filtrado y su fusión para ser transmitidos como una trama compatible a un dispositivo electrónico capaz de conectarse a internet.

Asimismo, este módulo recibe a través del servicio web una serie de comandos y datos dados por el usuario que deben determinar como será su operación y de que manera se deberán pre-procesar las mediciones antes de ser enviados al servicio web. Dentro del controlador también se gestionarán las emergencias que se detecten en el módulo destinado para tal fin. Estas emergencias serán identificadas y se dará aviso al usuario a través del servicio web.

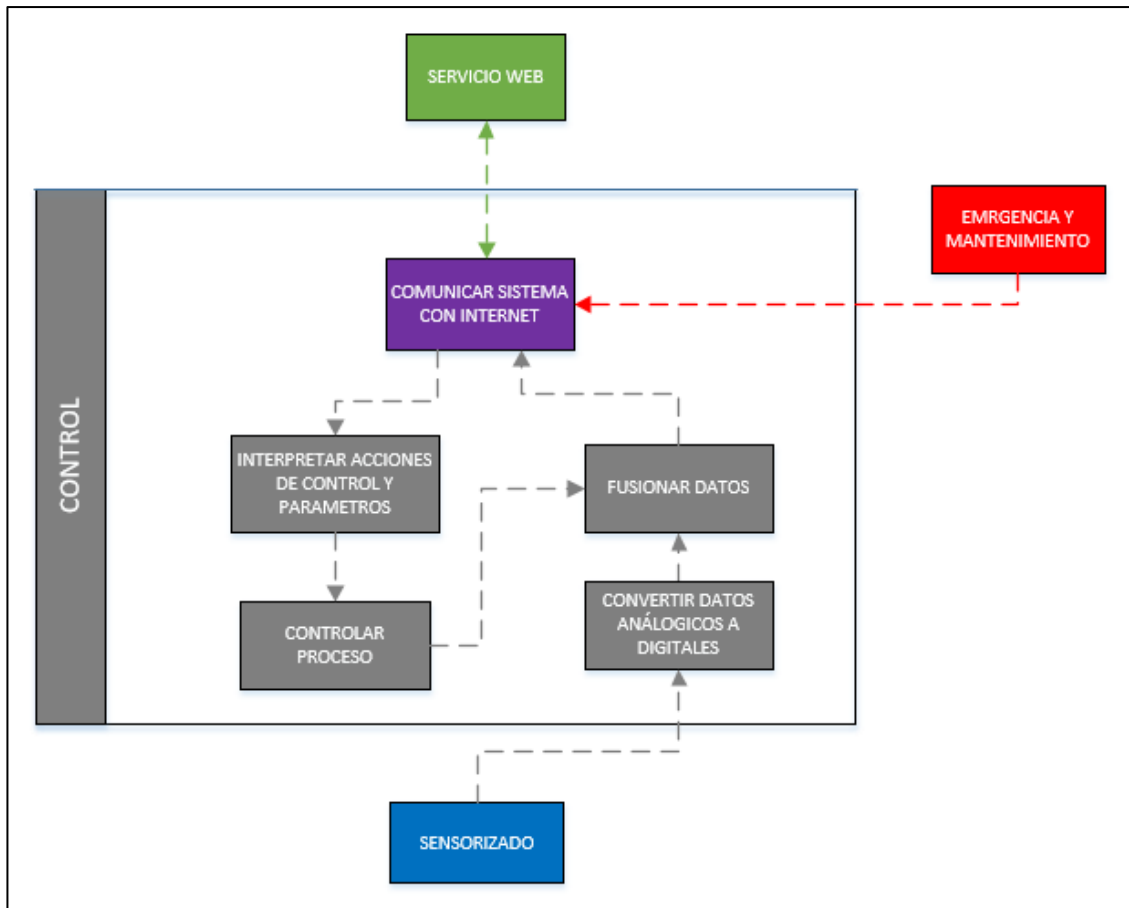


Figura 2.7. Módulo de control.

Las interacciones de los módulos presentados en este capítulo se pueden apreciar mejor en la versión impresa de la estructura de funciones del proyecto presente en los anexos de este documento en formato A3. Asimismo, este documento contiene la leyenda de colores que indica el tipo a que pertenece cada bloque de función y señal presente en la estructura, además de indicar explícitamente las relaciones entre estos ítems.

2.3. Matriz morfológica:

De acuerdo a la metodología de diseño seguida todas las funciones presentadas anteriormente en la estructura deben ser cubiertas por un elemento o ítem dentro del sistema. La elección de este elemento o ítem se realiza entre un conjunto de soluciones tecnológicas que podrían cubrir la función. Luego según criterio se realizará la combinación coherente de los ítems para la conformación de soluciones generales.









Las funciones a incluir en este análisis son establecidas a continuación según los siguientes criterios:

- 1) Las funciones que forman parte del servicio web fueron mostradas en el apartado anterior como parte de una solución general para el proyecto que involucra gestionar estos datos en una plataforma web. En la matriz morfológica se mostrará las alternativas que puedan cubrir todas estas funciones en conjunto.
- 2) Las funciones de acondicionamiento de almacenamiento de energía eléctrica, determinación del nivel de carga y la regulación para su uso en otros módulos recaen en tarjetas electrónicas cuyo diseño o selección se ejecutará como parte del diseño preliminar. Estas tarjetas dependen del ítem encargado del almacenamiento de la energía a elegir en la matriz.
- 3) La función de soporte y protección de los componentes es cubierta por un case, para este proyecto se determina además que este último también cumpla la función de posicionar el sistema para la colección de energía de forma eficiente y acondicionamiento del aire.
- 4) Las funciones del módulo de emergencia serán cubiertas por el controlador principal a elegir en la matriz. Excepto aquellas que permitan la emisión de una alerta sonora o lumínica.
- 5) Las funciones que involucren el sensado de la concentración de un gas o de un tamaño específico de partícula son cubiertas por sensores electrónicos cuya elección se hará en el diseño preliminar ya que está acorde a criterios técnicos especializados.
- 6) Las funciones de medición de condiciones ambientales tales como temperatura, cantidad de lluvia, velocidad y dirección del viento son cubiertas por un sensor o grupo de sensores elegidos en esta matriz.

- 7) Las funciones de acondicionamiento y filtrado de las señales que dan los sensores presentes en el módulo correspondiente serán cubiertas por tarjetas electrónicas cuyo diseño o selección se ejecutará como parte del diseño preliminar.
- 8) Las funciones de control en su mayoría exceptuando aquellas que permitan la comunicación con otros módulos son cubiertas por el controlador principal a elegir en la matriz. Para poder satisfacer estas funciones el controlador contara con un circuito electrónico de acompañamiento.
- 9) Los ítems de protección térmica o eléctrica tales como fusibles, ventiladores, aislantes o disipadores de calor son establecidos en el diseño preliminar.

Después de aplicados los criterios las soluciones a plantear deben cubrir las siguientes funciones que serán dispuestas en la matriz morfológica:

- 1) Procesar datos online, almacenarlos e interactuar con el usuario (Servicio Web).
- 2) Conectar con la red eléctrica.
- 3) Convertir energía solar en energía eléctrica.
- 4) Almacenar energía eléctrica.
- 5) Gestionar energía eléctrica del sistema.
- 6) Brindar soporte de componentes.
- 7) Emitir alerta en caso de emergencia.
- 8) Sensar gases y partículas contaminantes.
- 9) Sensar condiciones ambientales.
- 10) Controlador principal.
- 11) Comunicar sistema con internet.

MATRIZ MORFOLÓGICA			
FUNCIÓN	SOLUCIÓN 1	SOLUCIÓN 2	SOLUCIÓN 3
Servicio Web.	 IBM Watson IOT Platform	 Microsoft Azure IOT Platform	 Amazon Web Services IOT Platform
Conectar con la red eléctrica.	 Conversor 220 VAC / 5 VDC		
Convertir energía solar en eléctrica.	 Panel Solar		
Almacenar energía eléctrica.	 Batería Ion – Litio	 Batería Ácido-Plomo	 Batería Polímero de Litio
Gestionar energía eléctrica del sistema.	DESARROLLADO EN EL DISEÑO PRELIMINAR (APARTADO DE DISEÑO DE TARJETA DE PODER)		

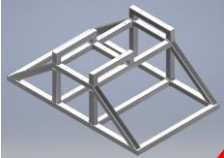










Brindar soporte de componentes.	DESARROLLADO EN EL DISEÑO PRELIMINAR (APARTADO DE DISEÑO MECÁNICO) 		
Emitir alerta en caso de emergencia.	 Alerta Sonora	 Alerta con leds	 Alerta a través de la plataforma.
Sensor gases y partículas contaminantes	DESARROLLADO EN EL DISEÑO PRELIMINAR (APARTADO DE SELECCIÓN DE SENSORES)		
Sensor condiciones ambientales.	 Sensor de clima		
Controlador principal.	 Microcontrolador ARM	 Microcontrolador AVR	 PLC
Comunicar sistema con internet.	 SIM800L	 SIM900 GSM	 ESP8266

Tabla 2.2. Matriz morfológica con la solución óptima tomada.

Fuente: Anexo 2

2.4. Concepto de solución

El concepto de solución desarrollado en el presente trabajo de tesis se encuentra determinado en la matriz morfológica mostrada anteriormente y ha sido elegida mediante una evaluación técnico – económica disponible en los anexos. La solución tomada consiste en un sistema conformado con un grupo de sensores que realizan la medición de los contaminantes atmosféricos presentes en zonas urbanas. Asimismo, cuenta con un sensor de clima conformado por un anemómetro, una veleta de vientos y un pluviómetro. El sistema tendrá la opción de ser energizado mediante una conexión doméstica normal de 220 VAC. Sin embargo, también recibirá energía a través de un panel solar de modo que el costo de su operación no sea elevado.

Por otro lado, el sistema podrá seguir funcionando ante la ausencia de una fuente de energía directa ya que contará con un grupo de baterías de ion litio. El sistema contará con dos tarjetas electrónicas; la primera será una tarjeta de poder que le permitirá gestionar adecuadamente la alimentación de los otros dispositivos. Asimismo, también se cuenta con la tarjeta principal que se encarga de conectar los sensores, sus circuitos de acondicionamiento y el controlador principal que será de la familia AVR debido a su arquitectura simple y facilidad de implementación de algoritmos de filtrado. El diseño de estas tarjetas y la selección específica de cada componente se desarrollará en el diseño preliminar. La tarjeta principal se conectará directamente al dispositivo SIM900GSM que le permitirá enviar la información por internet a la plataforma IBM Watson IOT que será la encargada de gestionar la información recibida. El protocolo de comunicación entre la plataforma y el dispositivo debe contar con las garantías de seguridad y fiabilidad en la entrega de data revisadas en el diseño preliminar. Por otro lado, se establece que a través de la plataforma se haga el envío de mensajes en caso de emergencia para disminuir el tamaño de los componentes electrónicos que son parte del mismo.

Finalmente, los dispositivos antes mencionados serán cubiertos con carcazas preparadas para afrontar las condiciones climáticas similares a una ciudad como Lima. Así también se contará con una estructura metálica que servirá de soporte del sistema y de sus módulos acompañantes y que posicionará de forma adecuada los paneles solares de forma que permitan la colección adecuada de energía.

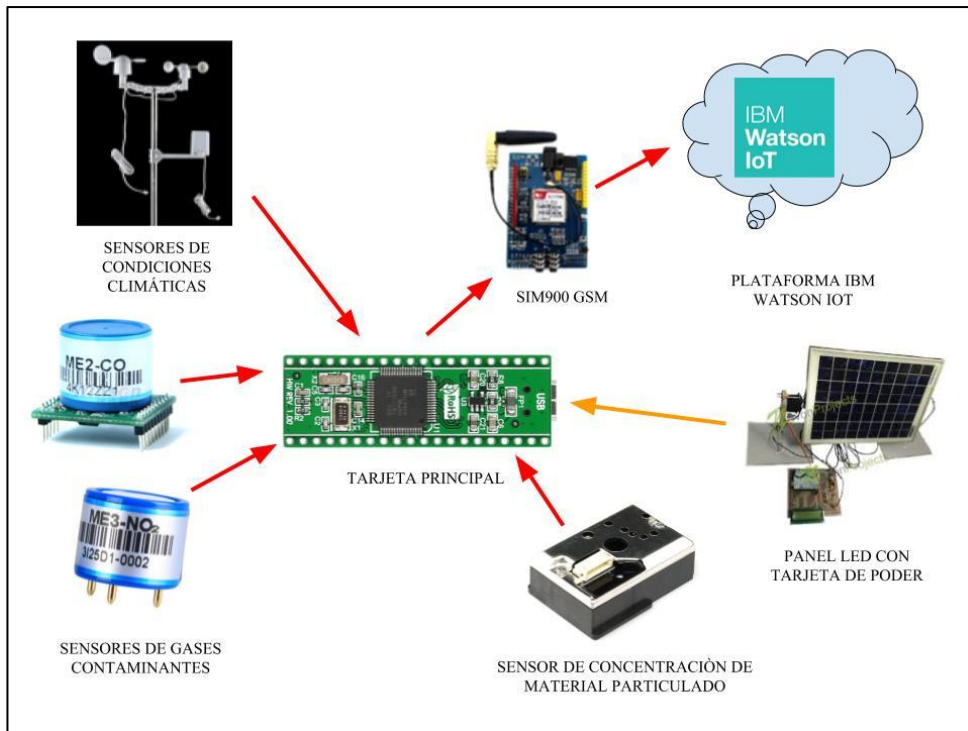


Figura 2.8. Esquema del concepto de solución desarrollado.

Fuente: Anexo 4

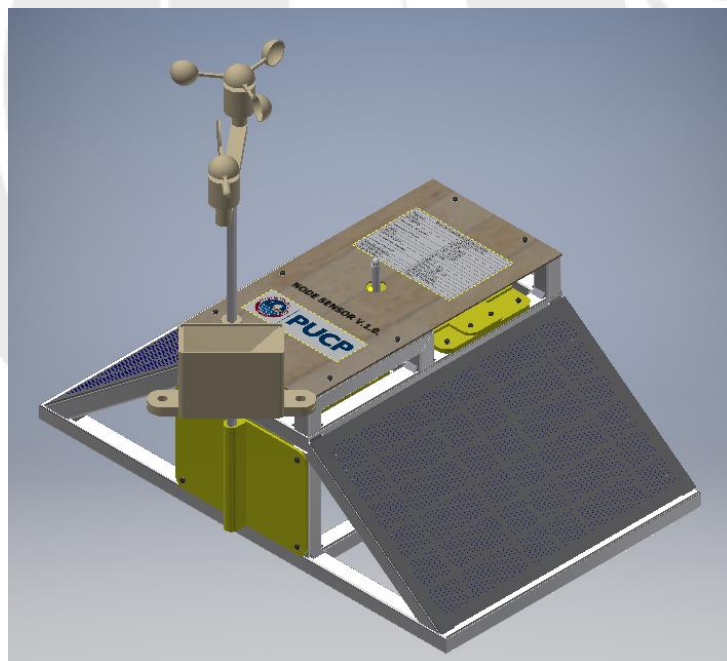


Figura 2.9. Concepto de solución desarrollado.

CÁPITULO 3: DISEÑO DEL SISTEMA MECATRÓNICO

3.1. DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO:

El sistema electrónico del proyecto integra los sensores y módulos necesarios para la operación del nodo sensorial, los cuales continuamente interactuarán con los microcontroladores siguiendo el algoritmo descrito en capítulos posteriores. El sistema electrónico completo puede ser resumido en el diagrama de bloques mostrado en la figura 3.1.

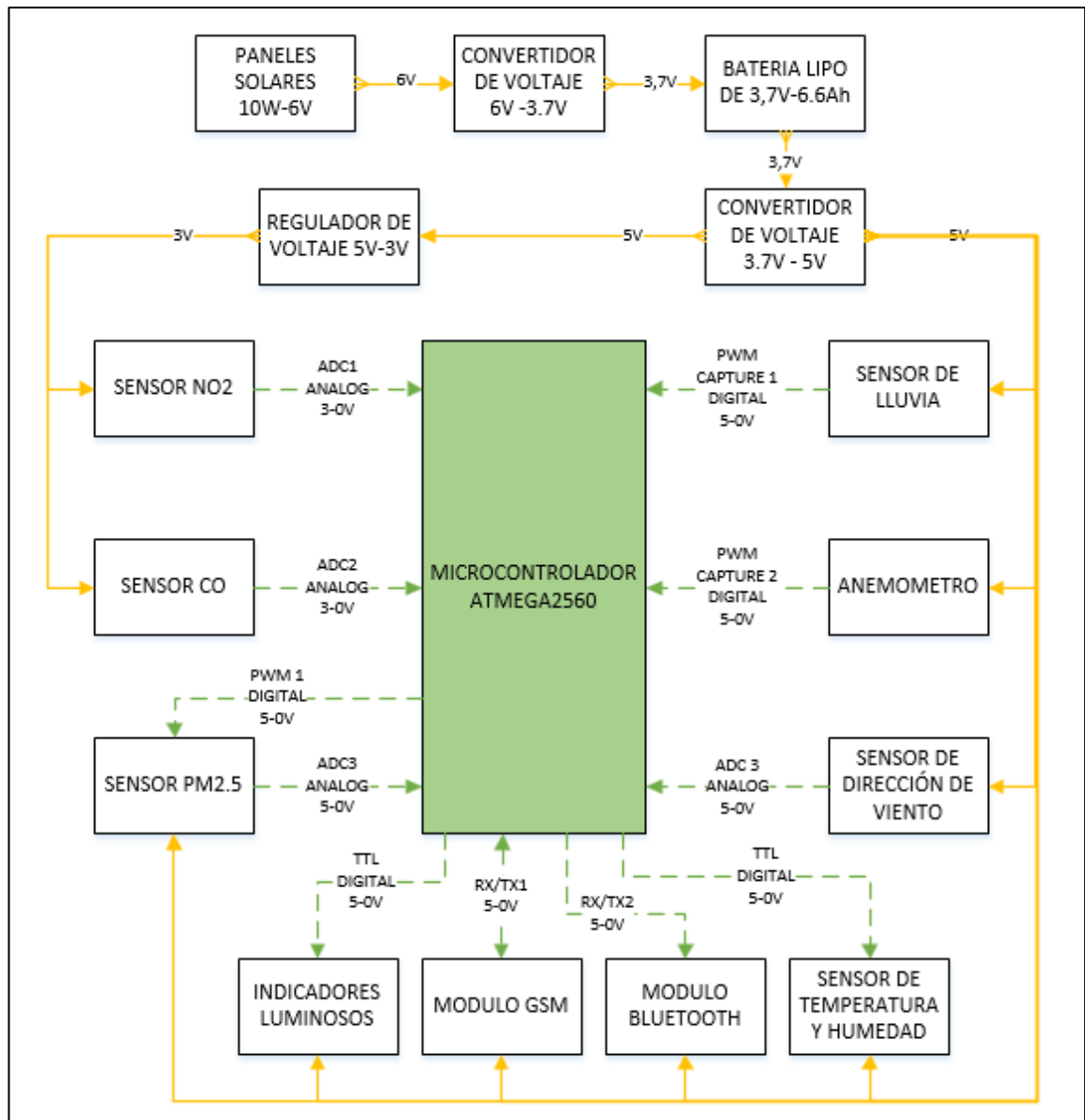


Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema electrónico del proyecto.

Fuente: Anexo 5

En el transcurso de este capítulo se realizará un resumen del diseño y selección de los componentes electrónicos tales como sensores, drivers, microcontroladores y finalmente la selección de las baterías que suministrarán la energía al sistema.

3.1.1. Selección de sensores:

3.1.1.1. Elección de contaminantes a monitorizar:

De acuerdo a lo establecido en la matriz morfológica y en el concepto de solución óptimo se requiere la selección de los sensores para los contaminantes más importantes generados por la combustión. Según se ha demostrado en diversos estudios al respecto la mayoría de gases contaminantes son desechados desde el tubo de escape [11]:

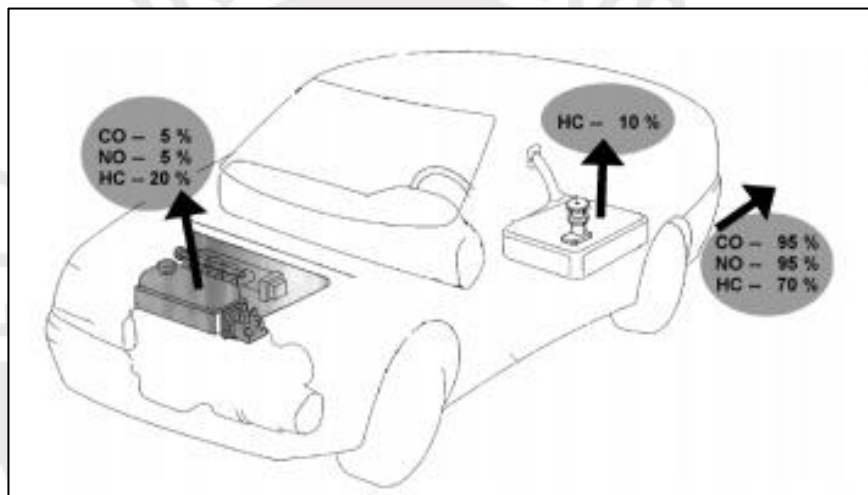


Figura 3.2. Procedencia de los contaminantes producto de la combustión en un automóvil.

(Fuente: [11])

Los contaminantes de mayor concentración emitidos por un motor de gasolina son:

- 1) **CO – Monóxido de carbono.** – Este gas se genera en el interior del motor y se libera al ambiente después de un ciclo de trabajo producto de la combinación de los residuos de combustión y el oxígeno del aire.
- 2) **NO₂ – Dióxido de nitrógeno.** – Este gas se genera en el motor producto de la interacción de las partes metálicas del motor y la combustión.

- 3) **Partículas PM2.5.** – Estas partículas son generadas por la acumulación de residuos de combustión.
- 4) **SO₂– Dióxido de azufre.** – Este gas se genera al momento de la combustión de la gasolina con impurezas. Si bien es cierto, en los automóviles que trabajan con diésel la emisión de este contaminante es mayor. No es prioritaria su medición.

Finalmente, para este proyecto se considera la medición de los tres primeros contaminantes listados anteriormente. La medición de los mismos proporcionará información suficiente sobre el nivel de contaminación que son producto del parque automotor en actividad y esta abalada por el protocolo de monitoreo de la calidad de aire y gestión de datos [12] elaborado por la DIGESA. En este documento se muestra una tabla en la que se muestra una recomendación del contaminante a medir según el tipo de fuente a evaluar. Esta tabla es mostrada a continuación:

Contaminantes a monitorear en función a las principales fuentes

Fuente	Contaminante
Vehículos (tráfico intenso)	Dióxido de nitrógeno Monóxido de carbono Dióxido de azufre PM-10 / PM-2.5
Domicilios / consumo de leña	PM-10 / PM-2.5 Monóxido de carbono
Industrias y domésticas / consumo de carbón	PM-10 / PM-2.5 Dióxido de azufre
Industrias / consumo de combustible residual	PM-10 / PM-2.5 Dióxido de azufre
Pesqueras	Sulfuro de hidrógeno; PM
Fundición	Dióxido de azufre
Cemento	PM-10 / PM-2.5
Generación eléctrica / consumo de carbón, residual y diesel	Dióxido de azufre PM-10 / PM-2.5
Generación eléctrica / consumo de gas	Dióxido de nitrógeno

Figura 3. 3. Contaminantes a monitorear en función a las principales fuentes.

(Fuente: [12])

3.1.1.2. Características de las mediciones a realizar:

De acuerdo al protocolo de monitoreo de la calidad de aire de DIGESA el mínimo intervalo de tiempo para hacer una medición corresponde a una hora. Sin embargo,

para proporcionar una información más útil se escoge un periodo de muestreo de un minuto. Por otro lado, se deben evaluar en el sensor a utilizar una serie de parámetros técnicos de los cuales se listan a continuación los más importantes [12]:

- Selectividad. - En qué grado un método puede determinar fielmente la contaminación propia de un contaminante en específico sin alterar la medición por la presencia de otros contaminantes.
- Límite de detección. - Concentración máxima de contaminante medida por el instrumento antes de su saturación.
- Sensibilidad. - Tasa de cambio de la concentración de contaminante medida con respecto al cambio de los valores reales.
- Exactitud. - Grado de acuerdo o semejanza entre la medida dada por el sensor y la medida real.
- Precisión. - Grado de semejanza entre un grupo de mediciones hechas bajo las mismas condiciones.
- Tiempo de respuesta. - Tiempo necesario para que el sensor entregue una medición después de haberse realizado el pedido de la misma.
- Costo. - Del sensor y sus componentes.
- Unidades. - Según norma las medidas deben estar en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con dos decimales de aproximación.

Se pone en ponderación cada uno de estos criterios usando los pesos mostrados en la siguiente tabla:

MATRIZ DE PESOS TOMADOS PARA LA EVALUACIÓN TÉCNICA-ECONÓMICA DE LOS SENSORES	
1: No importante / 2: Importante / 3: Muy Importante	
Selectividad (SE)	2: Importante
Límite de detección (LD)	3: Muy Importante
Sensibilidad (SB)	2: Importante
Exactitud (EX)	3: Muy Importante
Precisión (PR)	3: Muy Importante
Tiempo de respuesta (TR)	2: Importante
Menor costo (CO)	3: Muy Importante
Unidades (UN)	1: No importante

Tabla 3.1. Pesos tomados para la evaluación técnica-económica de los sensores.

Al momento de evaluar cada sensor se usará la información suministrada por su hoja de datos, se le asignará un puntaje para cada sensor y para cada característica. Este puntaje será obtenido mediante una comparación con la capacidad del mejor sensor para una determinada característica. El sensor a escoger es el que tenga mayor puntaje de la formulación mostrada a continuación:

$$Puntaje = \frac{2.SE + 3.LD + 2.SB + 3.EX + 3.PR + 2.TR + 3.CO + UN}{19}$$

En los siguientes apartados se aplicará el criterio descrito para escoger cual alternativa de los sensores encontrados en el mercado se tendrá en cuenta para cada uno de los contaminantes antes elegidos:

3.1.1.3. Sensor de CO

El sensor de CO a escoger debe tener la característica de poder medir hasta 30000 ug/m³ según la tabla de valores limite recomendados por la oficina general de salud ambiental. Sin embargo, para la elección del sensor se tomará como límite 50000 ug/m³ de concentración lo que también puede ser obtenido en ppm aplicando la siguiente fórmula de aproximación:

$$PPM = \frac{\text{concentración} \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3} \right)}{\text{Peso Molecular CO.} \left(\frac{1000}{24,5} \right)} = \frac{50000}{28. \left(\frac{1000}{24,5} \right)} = 43,57 \text{ ppm}$$

Se tienen en el mercado las siguientes alternativas para la realización de esta medición:

Sensor de gas MQ7	
Selectividad	La presencia de H2 puede alterar la medición de CO.
Rango de medición	20ppm - 2000ppm
Método de medición	Relación de resistencias que cambia logarítmicamente según la concentración.
Tamaño	32mm x φ18mm
Precio (USD)	6,95
Detalles adicionales	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere precalentamiento de 48 h. - 5 años de vida útil

Tabla 3.2. Características del sensor de gas MQ7.

Sensor de gas MQ7 [13]

Es un sensor de la marca Hanwei Electronics que tiene gran sensibilidad por el monóxido de carbono. Sin embargo, también puede alterar sus medidas por la presencia de otros gases en desmedro de su selectividad. En cuanto al rango de medición este esta sesgado ya que no se podrían obtener medidas entre 0 y 20 ppm. La sensibilidad y la exactitud de la medida son mermadas por la magnitud de error dadas por la conversión logarítmica que habría que aplicar para obtener las concentraciones medidas, la curva que demuestra este comportamiento es mostrada en la siguiente figura 3.4. En cuanto al tiempo de respuesta este es adecuado para la aplicación y el costo es bajo comparado con otros dispositivos del mercado.

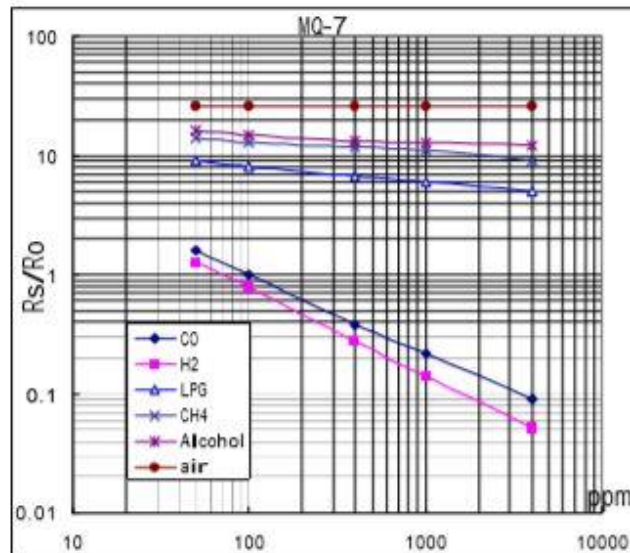


Figura 3.4. Curva de medición del sensor de gas MQ7.

(Fuente: [13])

Sensor de gas ME3 - CO	
Selectividad	La presencia de gases en el aire puede alterar la medición de CO.
Rango de medición	0ppm - 1000ppm
Método de medición	Señal analógica de corriente cambia de acuerdo a la medición.
Tamaño	16,4mm x ϕ 20mm
Precio (USD)	28
Sensitividad	$(0.070 \pm 0.015) \mu\text{A/ppm}$ (Lineal)
Detalles adicionales	- 3 años de vida útil

Tabla 3.3. Características del sensor de gas ME3 - CO.

Sensor de gas ME3-CO [14]:

Es un sensor de la marca Winsen cuya característica es el bajo consumo eléctrico y alta sensibilidad para la detección de monóxido de carbono. La selectividad de este sensor es baja ya que la medición es afectada por otros gases presentes en el aire. El rango de medición de este sensor contiene el rango entre 0 y 44 ppm necesario para la aplicación que se le va a dar. A diferencia de otros sensores, la relación entre la corriente y la concentración medida es lineal por lo que se reduce el error de

medición aumentando la sensibilidad y la exactitud de la medida. Este sensor cuenta con un factor de conversión lineal que se puede resumir en la figura 3.5. donde se muestra la relación entre la medida de concentración y corriente generada. Dado que la corriente generada es del orden de los micro amperes se requiere un circuito de instrumentación como interface antes de suministrar las medidas al microcontrolador. En cuanto al tiempo de respuesta este es adecuado para la aplicación siendo en el peor de los casos de 1 minuto para la determinación de la medida. Asimismo, el precio no es tan elevado en comparación con las características que tiene.

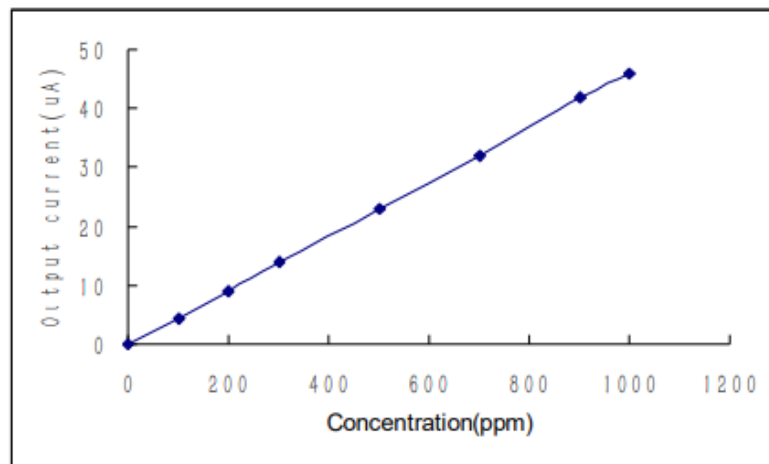


Figura 3.5. Curva de medición del sensor de gas ME3 - CO.

(Fuente: [14])

Sensor de gas Alphasense - CO	
Selectividad	La presencia de gases en el aire puede alterar la medición de CO.
Rango de medición	0ppm - 2000ppm
Método de medición	Señal analógica de corriente cambia de acuerdo a la medición.
Tamaño	15mm x ϕ 10mm
Precio (USD)	170
Resolución (Ruido de medición)	< 1.5 ppm RMS noise
Detalles adicionales	- Mínimo 2 años de vida útil

Tabla 3.4. Características del sensor de gas Alphasense - CO.

Sensor de gas Alphasense – CO [15]:

Es un sensor de la marca Alphasense que cuenta con una buena resolución en la medición del contaminante que va de la mano con su alta sensibilidad. La selectividad de este sensor es baja ya que la medición es afectada por otros gases presentes en el aire.

El rango de medición de este sensor también contiene el rango entre 0 y 44 ppm siendo la máxima medida que puede alcanzar de 2000 ppm. Sin embargo, la sensibilidad y la exactitud de este sensor es competente ya que la relación entre la corriente y la concentración medida es directa como se puede ver en la figura 3.6.

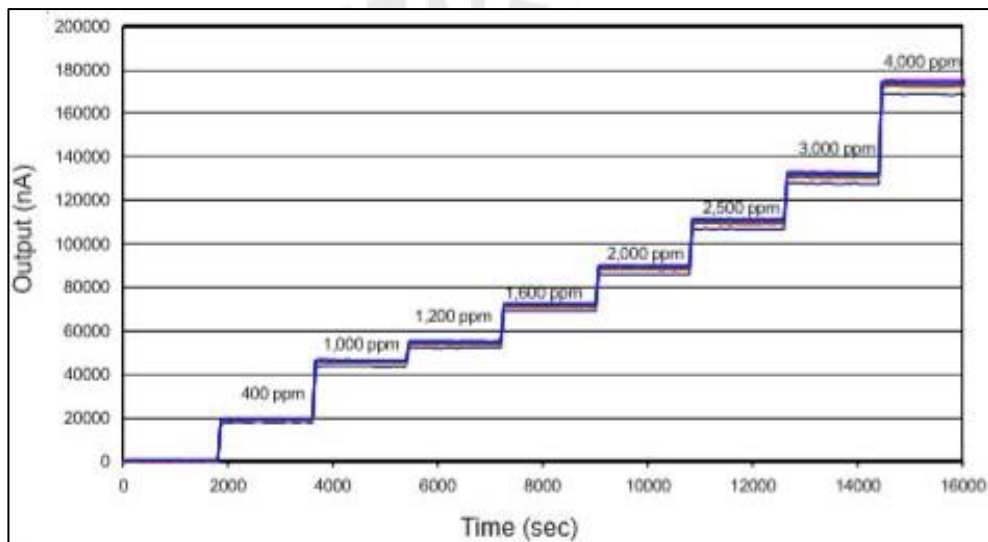


Figura 3.6. Curva de medición del sensor de gas Alphasense - CO.

(Fuente: [15])

La diferencia con otras opciones es que el tiempo de medida es irregular dependiendo de la concentración de contaminante medido. Dado que la corriente generada es proporcional a la medida de la concentración del contaminante se requiere un circuito de instrumentación para que la misma pueda ser obtenida. Finalmente, el precio del sensor resulta elevado en comparación con sus similares.

A continuación, se hace una evaluación entre las alternativas presentadas resumida en la tabla mostrada a continuación:

	MQ7 Gas Sensor	ME3-CO Gas Sensor	Alphasense-CO Gas Sensor
Selectividad	1	1	1
Límite de detección	1	2	2
Sensibilidad	2	3	3
Exactitud	2	3	3
Precisión	0	0	0
Tiempo de respuesta	2	2	2
Menor costo	3	2	1
Unidades	2	2	2
Puntaje	1,579	1,842	1,684
0: Sin información / 1: Deficiente / 2: Adecuada / 3: Idónea			

Tabla 3.5. Evaluación del mejor sensor para CO.

Acorde a la evaluación se escoge el sensor ME3 de la marca Winsen para el cual se diseña el circuito de instrumentación basado en amplificadores operacionales:

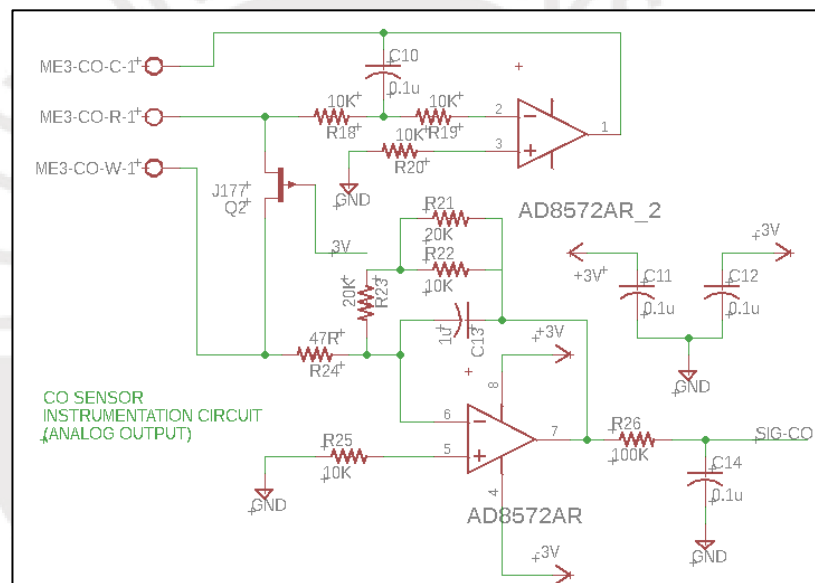


Figura 3.7. Circuito de instrumentación que acompaña al sensor Winsen ME3 - CO.

3.1.1.4. Sensor de NO₂

El sensor de NO₂ a escoger debe tener la característica de poder medir hasta 200 ug/m³ según la tabla de valores limite recomendados por la oficina general de salud ambiental. Sin embargo, para la elección del sensor se tomará como límite 300 ug/m³ de concentración lo que también puede ser obtenido en ppm aplicando la siguiente fórmula de aproximación:

$$PPM = \frac{\text{concentración} \left(\frac{ug}{m^3} \right)}{\text{Peso Molecular NO}_2 \cdot \left(\frac{1000}{24,5} \right)} = \frac{300}{46,01 \cdot \left(\frac{1000}{24,5} \right)} = 0,16 \text{ ppm}$$

Sensor de gas ME3 – NO2	
Selectividad	La presencia de gases en el aire puede alterar la medición de NO2.
Rango de medición	0ppm - 20ppm
Método de medición	Señal analógica de corriente cambia de acuerdo a la medición.
Tamaño	16,4mm x ϕ 20mm
Precio (USD)	88
Sensitividad	(0.78 ± 0.42) μ A/ppm (Lineal)
Detalles adicionales	- 3 años de vida útil

Tabla 3.6. Características del sensor de gas ME3 – NO2.

Sensor de gas ME3-NO2 [16]:

Es un sensor de la marca Winsen cuya característica es el bajo consumo eléctrico y alta sensibilidad para la detección de dióxido de nitrógeno. La selectividad de este sensor es baja ya que la medición es afectada por otros gases presentes en el aire. El rango de medición de este sensor entre 0 y 20 ppm contiene el rango de interés determinado anteriormente, sin embargo, la diferencia de magnitud entre ambos hace que la resolución sea deficiente. La relación entre la corriente y la concentración medida es lineal por lo que se reduce el error de medición aumentando la sensibilidad y la exactitud. La concentración medida es proporcional a una corriente en el orden de los micro amperes como se puede observar en la figura 3.8. Debido a ello se requiere la inclusión de un circuito de instrumentación. En cuanto al tiempo de respuesta este es adecuado para la aplicación siendo en el peor de los casos de 2 minutos para la determinación de la medida. El precio es elevado pero aceptable de acuerdo a las características que ofrece.

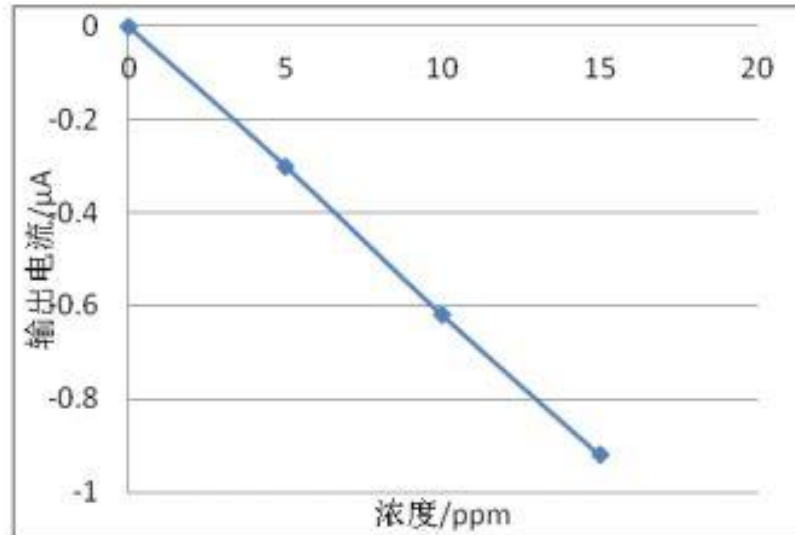


Figura 3.8. Curva de medición del sensor de gas ME3 – NO2.

(Fuente: [16])

Sensor de gas Alphasense – NO2	
Selectividad	La presencia de gases en el aire puede alterar la medición de NO2.
Rango de medición	0ppm – 20ppm
Método de medición	Señal analógica de corriente cambia de acuerdo a la medición.
Tamaño	15mm x φ10mm
Precio (USD)	134
Resolución (Ruido de medición)	< 0.1 ppm RMS noise
Detalles adicionales	- Mínimo 2 años de vida útil

Tabla 3.7. Características del sensor de gas Alphasense – NO2.

Sensor de gas Alphasense – NO2 [17]:

Es un sensor de la marca Alphasense que cuenta con una buena resolución en la medición del contaminante que va de la mano con su alta sensibilidad. La selectividad de este sensor es baja ya que la medición es afectada por otros gases presentes en el aire. El rango de medición de este sensor es de 0 a 20 ppm por lo que su resolución tampoco es adecuada para la aplicación. Sin embargo, la sensibilidad y la exactitud de este sensor es competente ya que la relación entre la corriente y la concentración medida es directa como se puede ver en la figura 3.9.

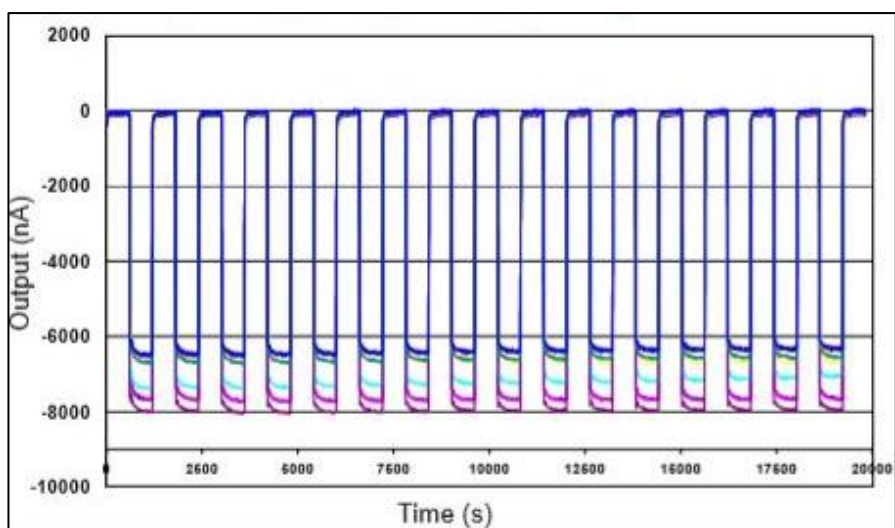


Figura 3.9. Curva de medición del sensor de gas Alphasense – NO₂.

(Fuente: [17])

Finalmente se puede mencionar que el tiempo de medición de este sensor similar al ofrecido por el sensor Winsen. Además de requerir de igual manera el acompañamiento de un circuito de instrumentación que pueda realizar la conversión de las medidas. La diferencia es que el costo de este dispositivo es mayor.

A continuación, se hace una evaluación entre las alternativas presentadas la cual es resumida en la tabla mostrada a continuación. Bajo esta evaluación se escoge al sensor ME3 - NO₂ de la marca Winsen.

	ME3-NO ₂ Gas Sensor	Alphasense-NO ₂ Gas Sensor
Selectividad	1	1
Límite de detección	1	1
Sensibilidad	2	2
Exactitud	2	2
Precisión	0	0
Tiempo de respuesta	2	2
Menor costo	2	1
Unidades	1	1
Puntaje	1,368	1,211
0: Sin información / 1: Deficiente / 2: Adecuada / 3: Idónea		

Tabla 3.8. Evaluación del mejor sensor para NO₂.

El sensor ME3 -NO₂ Winsen es acompañado de un circuito de instrumentación basado en amplificadores operacionales mostrado a continuación:

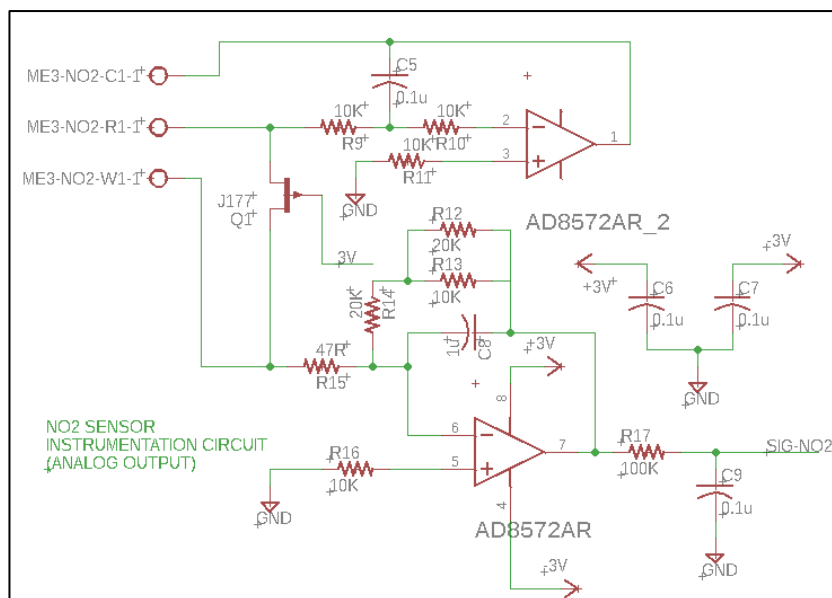


Figura 3.10. Circuito de instrumentación que acompaña al sensor Winsen ME3 – NO2.

3.1.1.5. Sensor de PM 2.5

El sensor que mide la concentración de partículas PM2.5 a escoger debe tener la característica de poder medir hasta 150 ug/m³ según la tabla de valores límite recomendados por la oficina general de salud ambiental. Sin embargo, para la elección del sensor se tomará como límite 300 ug/m³ de concentración.

Sensor óptico GP2Y1010AU0F	
Selectividad	Medición solo de concentración de material particulado.
Rango de medición	0 – 500ug/m ³
Método de medición	Reflexión de haces de luz
Tamaño	46mm x 30mm x 17,6mm
Consumo de corriente	Máximo 20mA a 5V
Precio (USD)	12
Sensitividad	1V/(0,1mg/m ³) (Lineal)
Límite de detección	200 nm

Tabla 3.9. Características del sensor óptico GP2Y1010AU0F.

Sensor óptico de material particulado GP2Y1010AU0F [18]:

Este sensor fabricado por la marca SHARP ofrece alta selectividad ya que está diseñado específicamente para la detección de material particulado aplicando la

técnica de reflexión de haces de luz. Es capaz de detectar partículas de polvo de hasta 200nm por lo que cumpliría adecuadamente la función de medir partículas de 2,5 μm adecuadamente (PM 2,5). La sensibilidad y la exactitud de las medidas no son afectadas por un gran error de conversión ya que la relación entre el voltaje obtenido y la concentración de polvo es lineal tal como se puede comprobar en la figura 3.11.

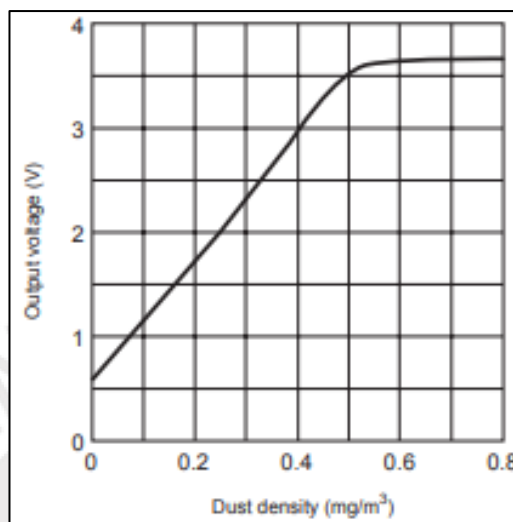


Figura 3.11. Curva de medición del sensor óptico GP2Y1010AU0F.

(Fuente: [18])

Por otro lado, no resultan inconvenientes el tiempo para la obtención de una medida que es como máximo 50 ms, además que su bajo costo lo hace competente con otras alternativas presentes en el mercado. Finalmente, a diferencia de otros sensores no es necesario hacer la conversión de unidades ya que las medidas de concentración se podrían obtener directamente en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Sensor óptico DSM501A	
Selectividad	Medición solo de concentración de material particulado.
Rango de medición	0 – 12600 unidades de material particulado
Método de medición	Reflexión de haces de luz
Tamaño	59mm x 45mm x 20mm
Consumo de corriente	Máximo 90mA a 5V
Precio (USD)	10
Sensitividad	5% PWM low ratio /(4000 unidades) (Lineal)
Límite de detección	1 μm

Tabla 3.10. Características del sensor óptico DSM501A.

Sensor óptico de material particulado DSM501A [19]:

Este sensor fabricado por la marca SAMYOUNG ofrece alta selectividad ya que aplica la técnica de reflexión de haces de luz para determinar la cantidad de partículas están presentes en el aire. Es capaz de detectar partículas de polvo de hasta 1 um como mínimo e incluso tiene como salida una señal de voltaje que permite indicar cuantas de estas partículas presentes en el aire superan el diámetro de 2,5 um (PM 2,5). Sin embargo, la sensibilidad y la exactitud de las medidas dependen de la capacidad para determinar adecuadamente los tiempos en baja de una onda PWM durante un periodo de tiempo entre 5 y 30 segundos (Low ratio). Esto último acrecienta el error de conversión, ya que la medida del número de partículas no es proporcional a una señal de voltaje directa sino en cambio a un ratio definido en una señal PWM como se puede verificar en las figuras 3.12. y 3.13.

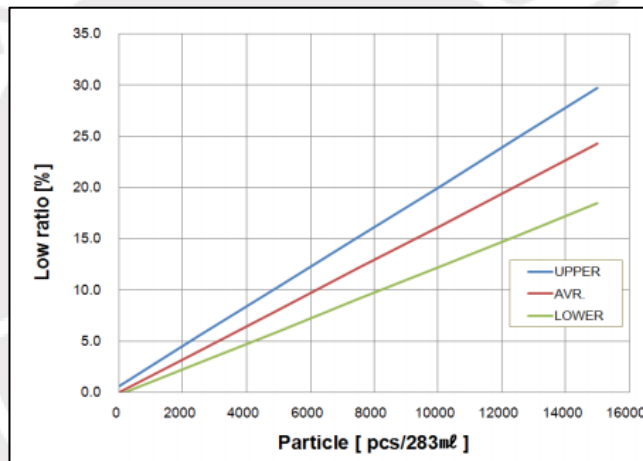


Figura 3.12. Curva de medición del sensor óptico DSM501A.

(Fuente: [19])

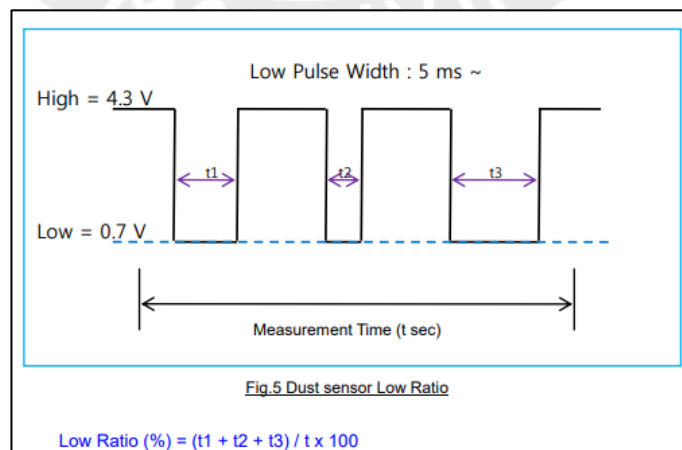


Figura 3.13. Definición de low ratio para el sensor óptico DSM501A.

(Fuente: [19])

Finalmente, es necesario mencionar que si bien es cierto este sensor tiene un precio ligeramente menor que el de sus competidores. Presenta mayor dificultad en su uso ya que es necesario efectuar una serie de conversiones sobre la medida tomada.

A continuación, se hace una evaluación entre las alternativas presentadas la cual es resumida en la tabla mostrada a continuación. Bajo esta evaluación se escoge al sensor óptico GP2Y1010AU0F de la marca SHARP.

	Sensor Óptico GP2Y1010AU0F	Sensor Óptico DSM501A
Selectividad	3	3
Límite de detección	2	2
Sensibilidad	3	2
Exactitud	3	2
Precisión	0	0
Tiempo de respuesta	1	2
Menor costo	1	2
Unidades	2	1
Puntaje	1,789	1,737
0: Sin información / 1: Deficiente / 2: Adecuada / 3: Idónea		

Tabla 3.11. Evaluación del mejor sensor para PM 2,5.

Como lo sugiere la hoja de datos del sensor se acompaña el sensor con un circuito de acondicionamiento simple que se muestra en la figura 3.14.

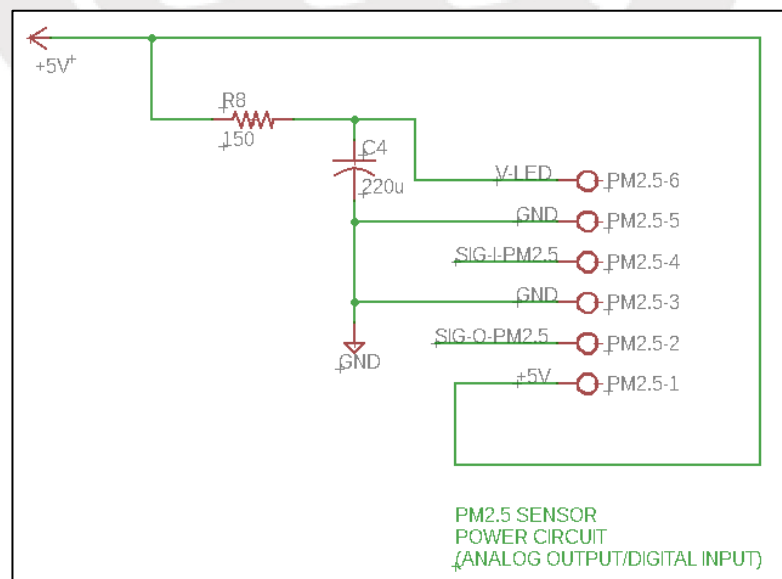


Figura 3.14. Circuito de acondicionamiento que acompaña al sensor óptico GP2Y1010AU0F.

3.1.1.6. Sensor de condiciones climáticas

Como se menciona en la descripción de la solución conceptual es necesario incorporar en el sistema mediciones climáticas tales como velocidad y dirección del viento, así como, de la cantidad de lluvia. Para cumplir tal tarea se selecciona el sensor Weather Sensor Assembly de ARGENT DATA SYSTEMS cuyas características son mencionadas a continuación [20]:

Weather Sensor Assembly	
Sensores que incluye	Anemómetro, dirección de viento, Pluviómetro
Método de medición (Anemómetro)	Cada vuelta de la veleta cierra un contacto. Si el contacto se cierra cada segundo se tiene una velocidad de 2,4 km/h)
Método de medición (Pluviómetro)	Cada vez que se reciba un aproximado de 0,28 mm de lluvia en el área del pluviómetro se cierra un contacto.
Método de medición (Dirección de viento)	Dependiendo de la dirección de viento se cambia el valor de una resistencia ($V_{supply} = 5V$ y $R_o = 10k$).
Tamaño	28,5in x 8in
Conexión	RJ-11
Precio (USD)	76,95

Tabla 3.12. Características del Weather Sensor Assembly.



Figura 3.15. Weather Sensor Assembly.

(Fuente: [20])

Tal como lo indica la hoja de datos el sensor para determinar la medida de la velocidad de viento y la cantidad de lluvia se requiere determinar la frecuencia con la que se cierra el contacto esto se hará a través de la implementación de un PWM tipo captura. Por otro lado, la variación de una resistencia nos permitirá determinar la dirección a la que se mueve el viento según lo mostrado en la siguiente tabla.

Direction (Degrees)	Resistance (Ohms)	Voltage (V=5v, R=10k)
0	33k	3.84v
22.5	6.57k	1.98v
45	8.2k	2.25v
67.5	891	0.41v
90	1k	0.45v
112.5	688	0.32v
135	2.2k	0.90v
157.5	1.41k	0.62v
180	3.9k	1.40v
202.5	3.14k	1.19v
225	16k	3.08v
247.5	14.12k	2.93v
270	120k	4.62v
292.5	42.12k	4.04v
315	64.9k	4.33v
337.5	21.88k	3.43v

Tabla 3.13. Resistencia de la veleta de viento según su dirección.

Para facilitar la conexión con un microcontrolador se diseña el circuito de acondicionamiento mostrado en la figura 3.15.

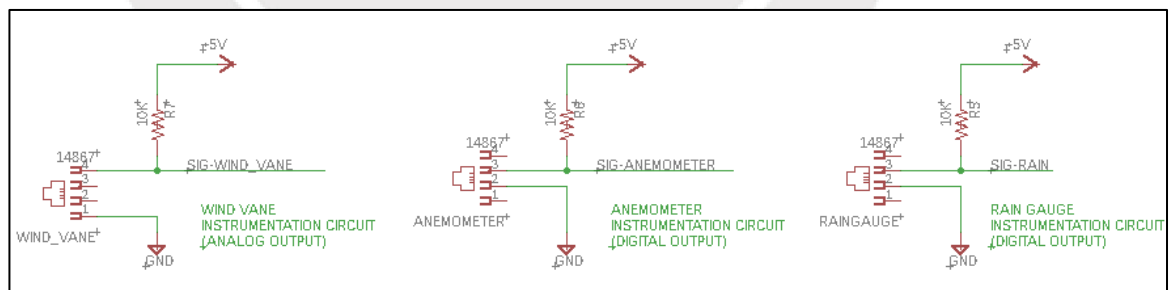


Figura 3.16. Circuito de acondicionamiento que acompaña al Weather Sensor Assembly.

Por otro lado, otra condición climática importante de ser medida es la temperatura para la cual se selecciona el sensor DHT11 de la marca AOSONG [21].

DHT11 Sensor	
Alimentación	3,5 a 5V
Consumo	Máximo 2,5mA
Rango de medición	0°C a 50°C
Resolución	1°C/8-bits
Tiempo de obtención de una medida	50ms
Método de comunicación	Comunicación serial digital
Dimensiones	12mm x 24mm x 6mm
Precio (USD)	3

Tabla 3.14. Características del DHT11 Sensor.

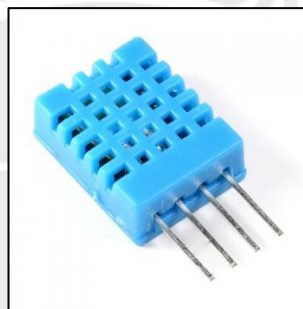


Figura 3.17. DHT11 Sensor.

(Fuente: [21])

Para utilizar este sensor se requiere conectarlo a una fuente de alimentación de 5V similar a la que alimenta al microcontrolador. A continuación, se hace el sensor realizará el envío de un conjunto de tramas de datos (5 Bytes) cada vez que obtiene una medida aproximadamente cada 50 ms. Esta trama es descompuesta para obtener solamente los datos de la temperatura expresada en 16 bits. Finalmente, acorde con lo mencionado anteriormente es necesario que este sensor sea conectado a una entrada digital.

3.1.2. Selección del hardware de comunicaciones:

3.1.2.1. Protocolo de comunicaciones a utilizar [22]

El tema de la comunicación del nodo sensorial con la plataforma web resulta ser crucial ya que requiere satisfacer las necesidades básicas de seguridad y entrega confiable de data.

En ese sentido, es necesario incorporar en el sistema la posibilidad de implementar un protocolo que permita realizar lo mencionado anteriormente. Para este proyecto dado que la aplicación esta orientada a la obtención de medidas de sensores desde un sistema de bajo recursos y con la necesidad de optimizar el ancho de banda se decide utilizar el protocolo de comunicación MQTT (Message Queue Telemetry Transport). De acuerdo a este protocolo se establece entre los nodos sensoriales una topología estrella, donde existe un nodo central el cual será el encargado de recibir los datos de los otros nodos, gestionar la red de sensores y transmitir información. Las principales características del protocolo de comunicación MQTT son listadas a continuación mencionándose algunos detalles propios de este proyecto:

- Topología del tipo estrella que comunica a un nodo central (broker): Se establece que los nodos sensoriales tengan la posibilidad de comunicarse con un nodo central que gestione su información (Servidor Web)
- Permite comunicaciones seguras ya que se añaden los tópicos como una validación extra a la seguridad. Los tópicos o temas son estructuras de datos que sirven como un filtro de comunicaciones, ya que solo se puede establecer una comunicación directa entre 2 ítems que manejen el mismo tópico. Por otro lado, estos tópicos pueden ser jerarquizados según la aplicación.
- El protocolo MQTT es usado mayormente en aplicaciones similares al proyecto. (IOT)

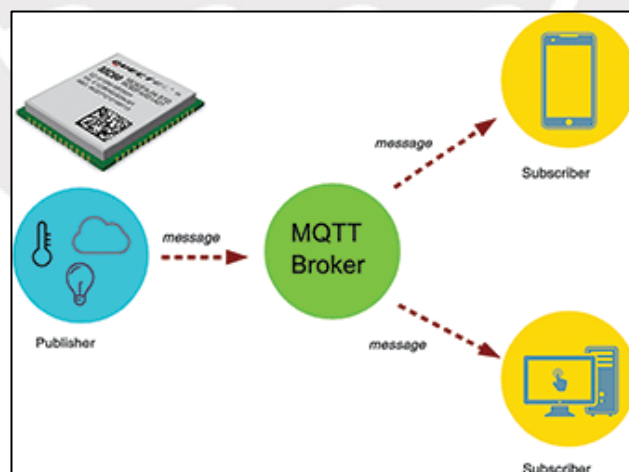


Figura 3.18. Topología Estrella aplicada para el protocolo MQTT.
(Fuente: [23])

3.1.2.2. SIM900GSM [24]

Acorde al protocolo mencionado anteriormente se requiere el hardware de comunicaciones que pueda gestionar MQTT. En ese sentido se elige el dispositivo SIM900GSM cuyas características son mencionadas en la tabla mostrada a continuación:

Módulo SIM900GSM	
Alimentación	5 a 12 V
Quad-Band	850/900/1800/1900 MHz
Protocolos de comunicación que admite	0710 MUX Protocol TCP/UDP Protocol FTP/HTTP MQTT
Comunicación con el microcontrolador	Comunicación Serial RS232
Consumo	Máximo 600 mA
Peso	3,4 g
Velocidad de transmisión de datos	9 – 171Kb/s
Dimensiones	24mm x 24mm x 3mm
Precio (USD)	40
Detalles adicionales	Cuenta un modo de hibernación (bajo consumo)

Tabla 3.15. Características del módulo SIM900GMS.



Figura 3.19. Módulo SIM900GMS.

(Fuente: [24])

El módulo SIM900GSM cuenta con la facilidad de poder conectarse con un sistema embebido mediante comunicación serial RS232 para lo cual es necesario reservar uno de estos puertos en el controlador principal. El módulo cuenta con un microcontrolador capaz de interpretar un listado de comandos AT que le permiten configurar los accesos como cliente y el protocolo MQTT. Para la conexión con el proveedor de servicios se requiere adquirir una tarjeta de telefonía SIM con IP Fija dado que solo se pueda acceder solo a través de esta dirección al dispositivo.

3.1.3. Selección del controlador:

Para la selección del controlador se tomará en cuenta la tabla 3.16 mostrada a continuación en la que se detalla los requerimientos en cuanto a los periféricos necesarios para la interacción con los sensores y los módulos de comunicación:

COMPONENTE	PUERTOS REQUERIDOS
1 Sensor Winsen M3-CO	1 Puerto ADC (Analog Digital Converter)
1 Sensor Winsen M3-NO2	1 Puerto ADC (Analog Digital Converter)
1 Weather Sensor (Sensor de lluvia, Sensor de velocidad de viento, Sensor de Dirección de viento)	2 Puertos PWM (Input Capture) 1 Puerto ADC (Analog Digital Converter)
1 Sensor GP2Y1010AU0F PM2.5	1 Puerto PWM (Generador) 1 Puerto ADC (Analog Digital Converter)
1 Sensor DHT11	1 Puerto Digital TTL
1 Módulo GSM (SIM 900)	1 Puerto RS232 Comunicación serial Duplex
1 Módulo Bluetooth HC05	1 Puerto RS232 Comunicación serial Duplex
Indicadores lumínicos (LEDs)	2 Puertos Digitales TTL

Tabla 3.16. Componentes y puertos requeridos para el microcontrolador.

Para cubrir los requerimientos, se selecciona el microcontrolador Atmega 2560 [25] en su versión SMD mostrada en la figura 3.20. Este microcontrolador tiene las características mostradas en la tabla 3.17.

Características del microcontrolador Atmega 2560	
Comunicación I2C y UART	Sí
Corriente por pin	20 mA
Frecuencia de reloj	16 MHz
Dimensiones	16x16x1.5 mm
Voltaje de entrada	5V
Empaquetadura	TQFP
Número de puertos PWM	12
Resolución puertos PWM	2 -16 Bits
Número de puertos ADC	16
Resolución de puertos ADC	10 Bits
Número de par de puertos UART	4
Capacidad de la memoria EEPROM	4Kb

Tabla 3.17. Características del Atmega 2560.

(Fuente: [25])

Para el adecuado funcionamiento del microcontrolador se realiza el diseño de un circuito de alimentación y de conexión con otros periféricos. El circuito en detalle es mostrado en la figura 3.21, cuenta con un botón de RESET, un oscilador y un grupo de condensadores para la estabilidad de los voltajes de alimentación tal como lo sugiere la hoja de datos. Así mismo, también se cuenta con un led indicador el cual mostrará al usuario el correcto funcionamiento del programa y los puertos ICSP necesarios para realizar la programación del microcontrolador.



Figura 3.20. Microcontrolador Atmega 2560 versión SMD.

(Fuente: [25])

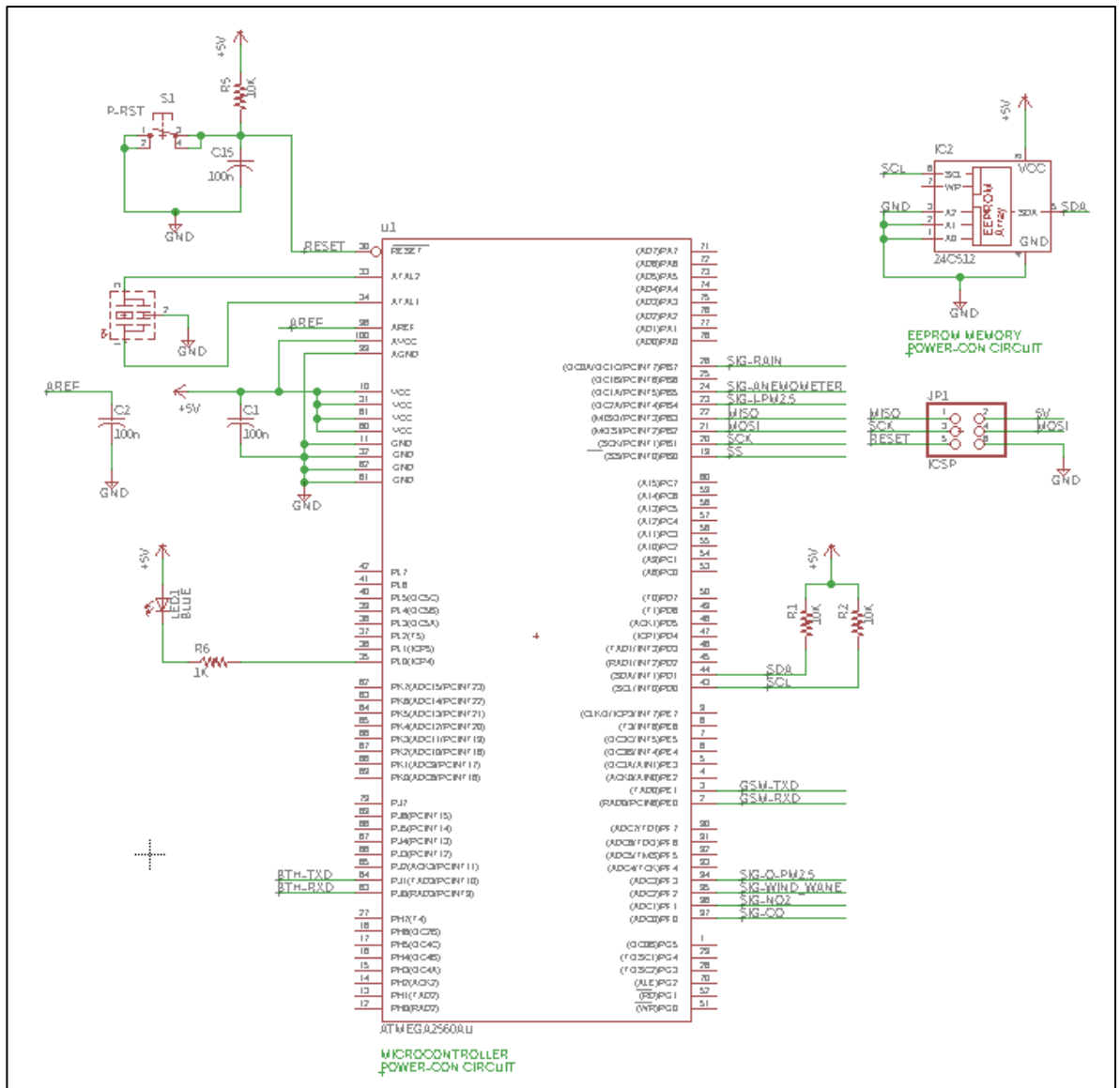


Figura 3.21. Circuito de acompañamiento al microcontrolador Atmega 2560.

MEDICIÓN	Tamaño de información
Monóxido de carbono - CO	10 bits
Dióxido de Nitrógeno - NO2	10 bits
Clima (Sensor de lluvia, Sensor de velocidad de viento, Sensor de Dirección de viento)	30 bits
PM2.5	10 bits
Temperatura	16 bits
Tamaño total	76 bits = 10 bytes

Tabla 3.18. Tamaño de las mediciones de contaminantes realizadas.

Por otro lado, se considera añadir una memoria EEPROM Atmel AT24C512 [26] cuyas características son mostradas en la tabla 3.19. de manera adicional a la que proporciona por defecto el Atmega 2560 de modo que se pueda respaldar las

mediciones en caso de que exista un problema de comunicación con el servicio web. A continuación, se hace un cálculo aproximado del tiempo de grabación que proporcionará esta ampliación de memoria considerando que se va a tomar una medida por minuto, el tamaño de una medida es calculado en la tabla 3.18 y es igual a 10 bytes aproximadamente:

$$\text{Tiempo de respaldo} = \frac{512 \text{ Kb}}{10 \frac{\text{Kb}}{\text{medida}} \cdot 60 \frac{\text{medidas}}{\text{hora}}} = 850 \text{ horas}$$

Características memoria EEPROM Atmel AT24C512	
Alimentación	5 V
Comunicación	I2C
Consumo de corriente	5mA
Tamaño	512 Kb

Tabla 3.19. Características de la memoria EEPROM Atmel AT24C512.

Como se puede comprobar la capacidad de respaldo ofrecida por la memoria resulta más que idónea ya que se considera como requerimiento que en el peor de los casos el sistema permanezca 24 horas o un día completo desconectado del servicio web.

3.1.4. Diseño del módulo de alimentación:

Los componentes del sistema determinados anteriormente requieren ser alimentados eléctricamente con voltajes de -3V, 3v y 5v. Para facilitar el diseño de un circuito de poder adecuado que incluya paneles solares y baterías se hace en primer lugar un recuento de las cargas que se requieren alimentar en el sistema descritas en las tablas 3.20 y 3.21.

Recuentos de cargas con voltaje 3V /-3V	
Sensor Winsen ME3 - NO2	50 mA
Sensor Winsen ME3 - CO	50 mA

Tabla 3.20. Recuento de cargas para voltajes de 3V y -3V.

Recuentos de cargas con voltaje 5V	
Weather Sensor	30 mA
Sensor GP2Y1010AU0F PM2.5	20 mA
Sensor DHT11	3 mA
Módulo GSM (SIM 900)	600 mA
Módulo Bluetooth HC05	20 mA
Microcontrolador Atmega 2560 y módulos acompañantes	40 mA

Tabla 3.21. Recuento de cargas para voltajes de 5V.

En primer lugar, se realiza el diseño de un circuito que pueda realizar la conversión de 5V a los voltajes de -3V y 3V necesarios para el funcionamiento de los amplificadores operacionales utilizados en el circuito de instrumentación de los sensores Winsen. Este circuito es mostrado en la siguiente figura:

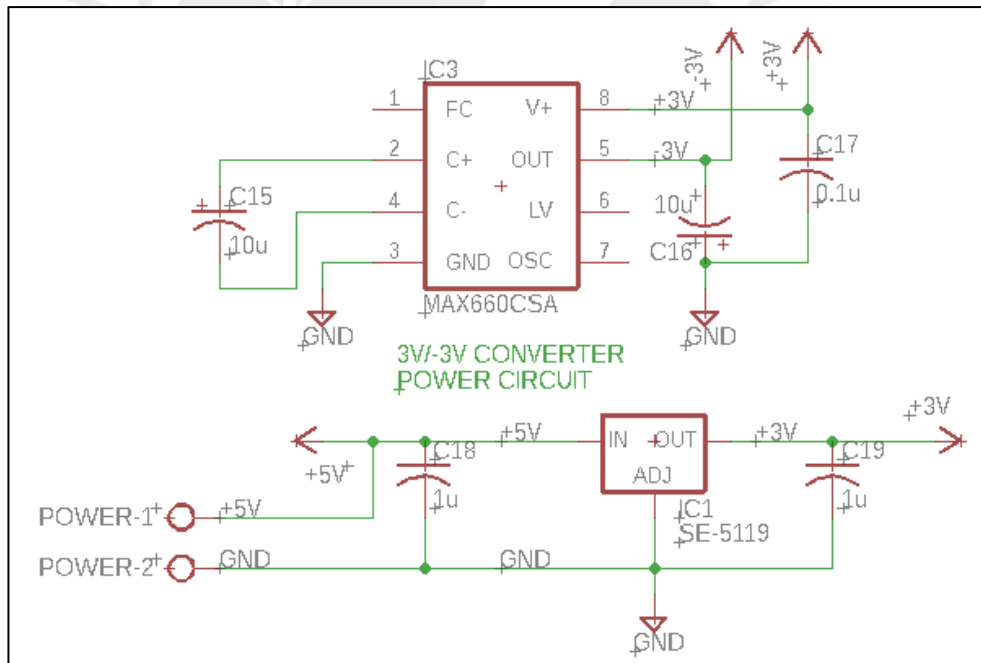


Figura 3.22. Circuito de conversión de 5V a -3V/3V.

Siguiendo la información obtenida de las hojas de datos de los dos circuitos integrados que forman parte del circuito MAX660SA y SE-5119 se puede concluir que existe una eficiencia de conversión de aproximadamente 80%. Por lo que se requerirá a la entrada una potencia 1,25 mayor a la utilizada por los sensores. Usando

el cálculo mostrado a continuación se puede determinar la cantidad de corriente a 5V que requieren los circuitos de conversión para la alimentación de los sensores:

$$I_{eq} = \frac{P_o \cdot fp}{5V} = \frac{3V \cdot 100mA \cdot 1,25}{5V} = 75 \text{ mA}$$

Finalmente sumando todas las cargas a un voltaje de 5V se obtiene lo siguiente:

$$I_{total} = 75 + 30 + 20 + 3 + 600 + 20 + 40 = 788 \text{ mA}$$

Se requiere por tanto una fuente de alimentación que pueda proporcionar hasta 788 mA bajo un voltaje de 5V. Para poder cumplir este requerimiento se seleccionará un módulo Power Boost que pueda proporcionar la alimentación necesaria ya sea desde un grupo de baterías, desde un cargador de 5V-2A conectado a 220VAC o desde un grupo de paneles solares. De acuerdo a ello se selecciona el módulo Power Boost 1000 Charger de Adafruit cuyas características son descritas en la tabla mostrada a continuación [27]:

Características del módulo Power Boost 1000 Charger	
Voltaje de entrada	3,7 V Batería Ion Litio; 5V Cargador USB
Voltaje de salida	5V
Funciones	Carga de baterías Ion Litio; Conversión de voltaje de baterías Ion Litio a 5V
Capacidad de corriente	Hasta 1A
Dimensiones	23mm x 45mm x 10mm
Precio (USD)	20

Tabla 3.22. Características del módulo Power Boost 1000 Charger.

Este módulo de la marca Adafruit permite regular adecuadamente la energía proveniente de distintas fuentes de modo que se tenga un suministro de 1A de corriente máximo a una diferencia de potencial de 5V. Este circuito requiere la selección adecuada de baterías y panel solar que pueda suministrarle alimentación según lo establecido en los requerimientos y que serán seleccionados en el apartado posterior.

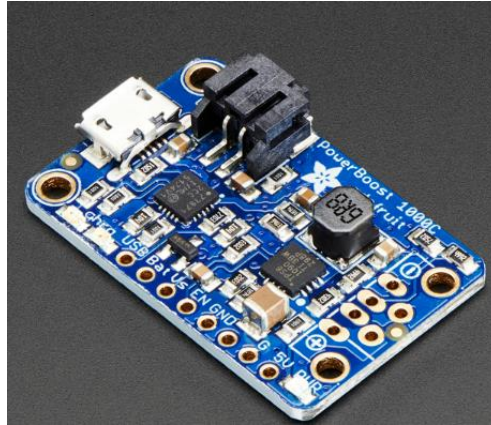


Figura 3.23. Módulo Power Boost 1000 Charger.

(Fuente: [27])

3.1.4.1. Baterías

Debido a la compatibilidad y la demanda de carga se escoge para el proyecto una batería de Ion Litio de 3,7 V con capacidad de 6,6 Ah de Adafruit [28] cuya imagen es mostrada en la figura 3.24 y cuyas características son mostradas en la tabla 3.23.

Características de la Batería Ion Litio de Adafruit	
Voltaje de operación	3,7 V
Capacidad	6,6 Ah
Dimensiones	69mm× 54mm x 18mm
Peso	155 g
Precio (USD)	29,5

Tabla 3.23. Características de la Batería Ion Litio 3,7V – 6,6Ah de Adafruit.

(Fuente: [28])



Figura 3.24. Batería Ion Litio 3,7V – 6,6Ah de Adafruit.

(Fuente: [28])

La batería anteriormente seleccionada va conectada directamente al circuito Power Boost cuya eficiencia de transformación es alrededor de 96% ($fp = 1,04$). En base a esta información se calcula la duración de esta batería, si fuera esta la encargada de suministrar energía al sistema (situación de emergencia):

$$\text{tiempo de duración} = \frac{V_i \cdot \text{Capacidad}}{P_o \cdot fp} = \frac{3,7V \cdot 6,6Ah}{5V \cdot 0,788A \cdot 1,04} = 5,96 \text{ h}$$

Según los cálculos realizados una de estas baterías podría abastecer en el peor de los casos al sistema durante un tiempo aproximado de 6h. Dado que como requerimiento se estableció que en caso de emergencia el sistema debe poder seguir operando durante la mitad de un día se establece que se debe considerar como parte del sistema un par de circuitos Power Boost con sus respectivas baterías.

3.1.4.2. Panel Solar

Debido a la demanda de carga se escoge para el proyecto un panel solar de 6V – 10 W cuyas características son mostradas en la tabla 3.24.

Características del panel solar	
Voltaje de operación	6 V
Potencia máxima	10W
Dimensiones	300mm× 250mm x 5mm
Peso	155 g
Precio (USD)	20

Tabla 3.24. Características del panel solar seleccionado.

(Fuente: [29])

El panel solar seleccionado anteriormente se debe conectar al circuito Power Boost efectuando antes una reducción pequeña de voltaje con ayuda de un diodo tal como se muestra en la figura 3.25. El circuito mostrado en la figura también proporciona información de cómo se realizaría la conexión general del sistema de alimentación.

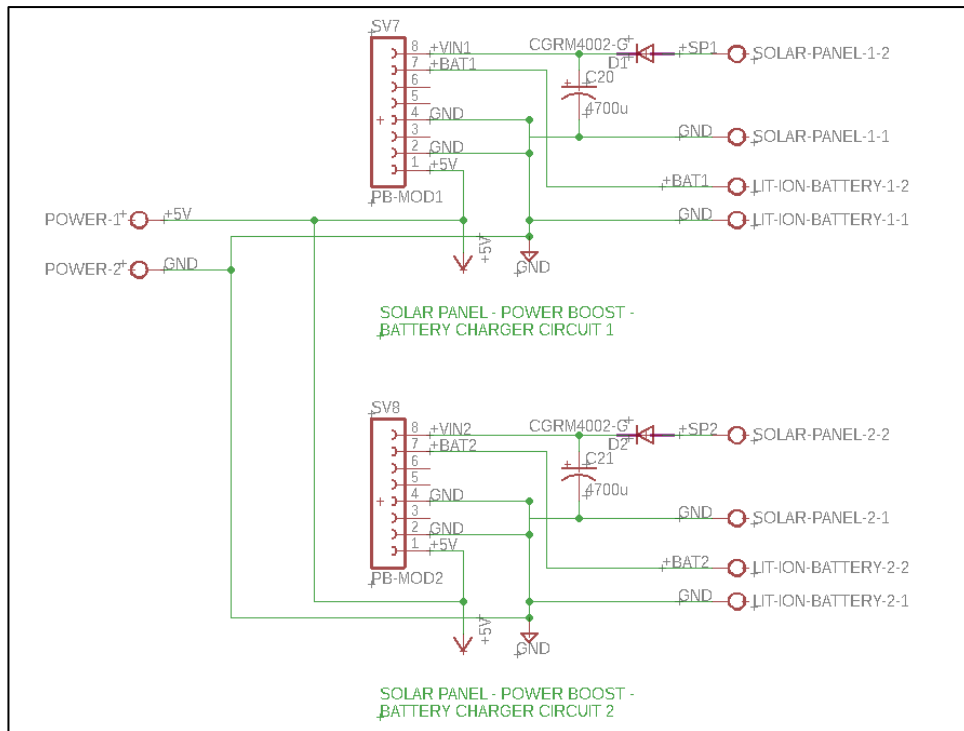


Figura 3.25. Esquemático completo del circuito de potencia.

Para el proyecto se considerará la inclusión de 2 paneles solares de modo que se pueda obtener un mayor factor de seguridad para la colección de energía y de modo que los dos circuitos Power Boost tengan una fuente similar tal como se vio en la imagen anterior. A continuación, se evalúa el factor de seguridad que nos daría la inclusión de un par de paneles:

$$\text{Factor de seguridad} = \frac{2 \cdot P_i}{P_o \cdot fp} = \frac{2 \cdot 10W}{5V \cdot 0,788A \cdot 1,04} = 4,88$$

Según los cálculos realizados el factor de seguridad de la alimentación mediante paneles solares asciende a 4,9 lo cual es considerado adecuado para una ciudad como Lima que tiene el problema de una baja captación lumínica.

3.2. DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO:

3.2.1. Criterios para el diseño mecánico

Los criterios aplicados en el diseño mecánico son listados a continuación:

- La estructura a diseñar debe tener la función de cubrir las tarjetas y componentes electrónicos del proyecto de forma que pueda protegerlos de las precipitaciones y agentes externos.
- La estructura a diseñar para la protección del sistema debe estar construido con materiales ligeros de baja densidad de forma que pueda cumplirse el requerimiento de fácil transportabilidad.
- La estructura a diseñar debe ubicar los paneles solares de modo que pueda obtenerse una colección eficiente de energía.

3.2.2. Cases para la protección de tarjetas electrónicas

Se diseñan dos cases de protección para los componentes eléctricos:

- El primer case, que se puede apreciar en la figura 3.26. cubrirá la tarjeta de poder y las baterías por lo que tendrá para ello tres compartimientos. El compartimiento superior alojará la tarjeta de poder y los módulos con los que cuenta. Así mismo, los compartimientos laterales cumplirán la función de alojar las baterías. El case contará con las tapas respectivas que serán ensambladas mediante unión atornillada de 3mm. Ambos case y tapas serán fabricadas mediante impresión 3D en plástico ABS.

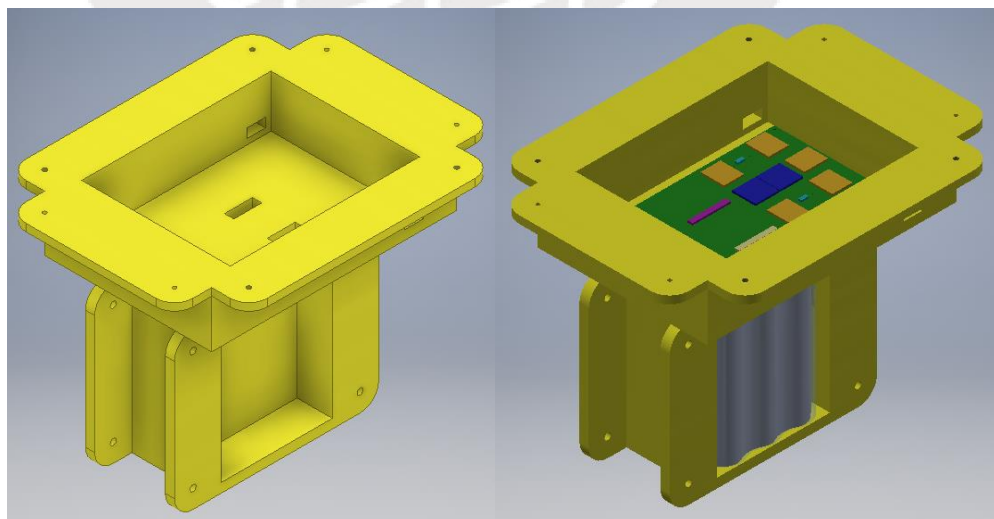


Figura 3.26. Case de protección del circuito de poder y baterías.

- El segundo case, que se puede apreciar en la figura 3.27. cubrirá la tarjeta principal y el módulo de comunicaciones para lo cual tendrá una cavidad principal. Por otro lado, también contarán con compartimientos adicionales que permitan alojar los sensores anteriormente seleccionados. El case contará con la tapa necesaria en la que se alojaran los sensores Winsen que será ensamblada mediante unión atornillada de 3mm. Ambos case y tapa serán fabricadas mediante impresión 3D en plástico ABS.

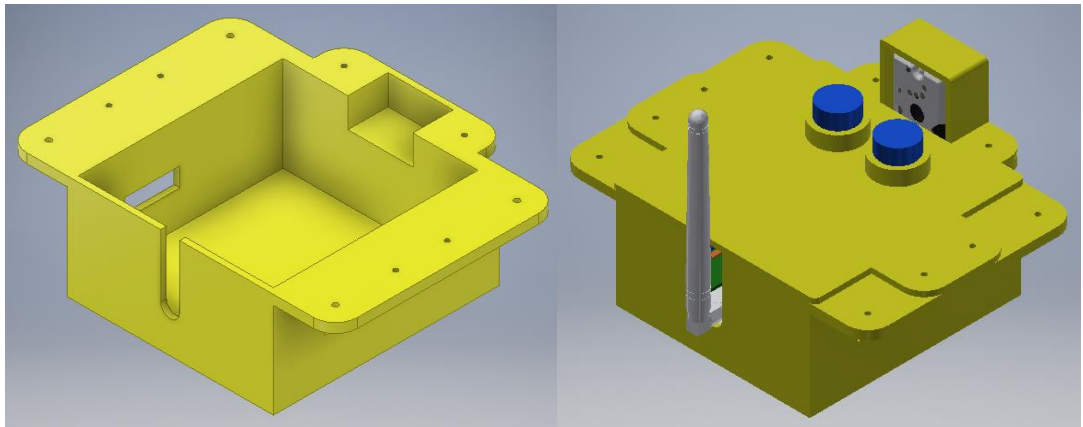


Figura 3.27. Case de protección de tarjeta principal y módulo de comunicaciones.

- Adicionalmente a los cases de protección se añade un soporte para el eje sobre el cual están montados los sensores de clima mostrado en la figura 3.28. El soporte será ensamblado sobre la estructura principal mediante unión atornillada de 3mm y será fabricado mediante impresión 3D en plástico ABS.

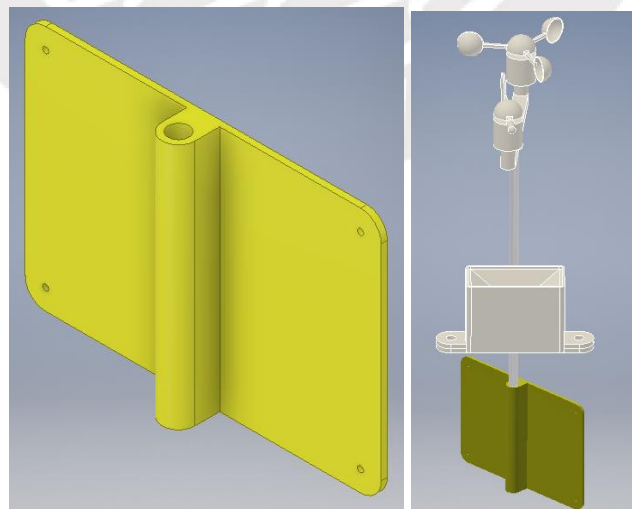


Figura 3.28. Soporte de los sensores de clima.

3.2.3. Estructura soporte del sistema

La estructura soporte del sistema será construida en base a tubos cuadrados de aluminio 6061 soldados sin material de aporte como se puede apreciar en la imagen 3.29., el aluminio estructural ofrece un factor de seguridad alto para las cargas propuestas; además de ser, un material de baja densidad con respecto a otros materiales estructurales. La estructura soporte tiene la forma de tronco de pirámide donde las partes inclinadas servirán de apoyo a los paneles solares, esta geometría permite no solo distribuir el peso de los paneles solares a lo largo de la estructura sino también permitir que se ubiquen inclinados tanto a la izquierda como a la derecha de modo que puedan absorber los haces de luz solar en diferentes orientaciones. Por otro lado, la estructura central de la pirámide permitirá ubicar los cases de protección vistos anteriormente. Finalmente, es importante mencionar que esta estructura se apoyará sobre su base en un plano horizontal, se sugiere una azotea. Por otro lado, se añaden tres orejas que permitan transportar la plataforma de forma fácil y a la vez poder sobre la misma colocar una tapa con la información del sensor y sus datos tal como se muestra en la imagen 3.29.

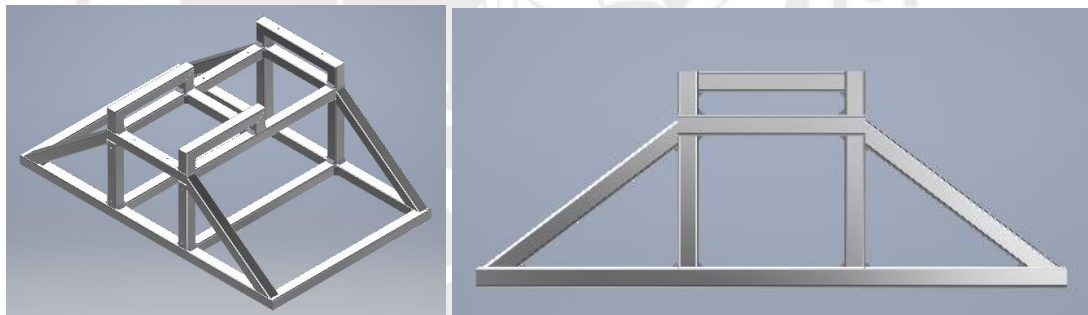


Figura 3.29. Estructura soporte del sistema hecha en aluminio.

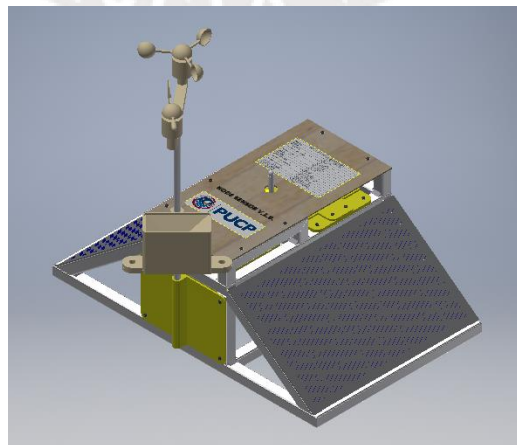


Figura 3.30. Sistema ensamblado.

3.3. DISEÑO DE LAS RUTINAS DE OPERACIÓN PROGRAMADAS EN EL SISTEMA

El programa principal ejecuta el algoritmo descrito en el diagrama de flujo mostrado en la figura 3.31. En primer lugar, se configura la comunicación serial con los módulos SIM900, Bluetooth; así como, los periféricos que se utilizarán como el I2C (Inter-Integrated Circuit), PWM (Pulse Width Modulation) o ADC (Analog Digital Converter). Además de ello, se configura el protocolo MQTT en la tarjeta de comunicaciones para que sean gestionadas de forma segura. La función encargada de recibir los parámetros de funcionamiento establecerá que dispositivo receptor esta listo para recibir los datos pudiendo encontrarse 3 posibilidades (P=0 si no existe un dispositivo de recepción conectado, P=1 si el dispositivo receptor es compatible con bluetooth, P=2 si la recepción la hará la plataforma web) así mismo, se establecerá el tiempo entre mediciones T, por defecto de 1 min.

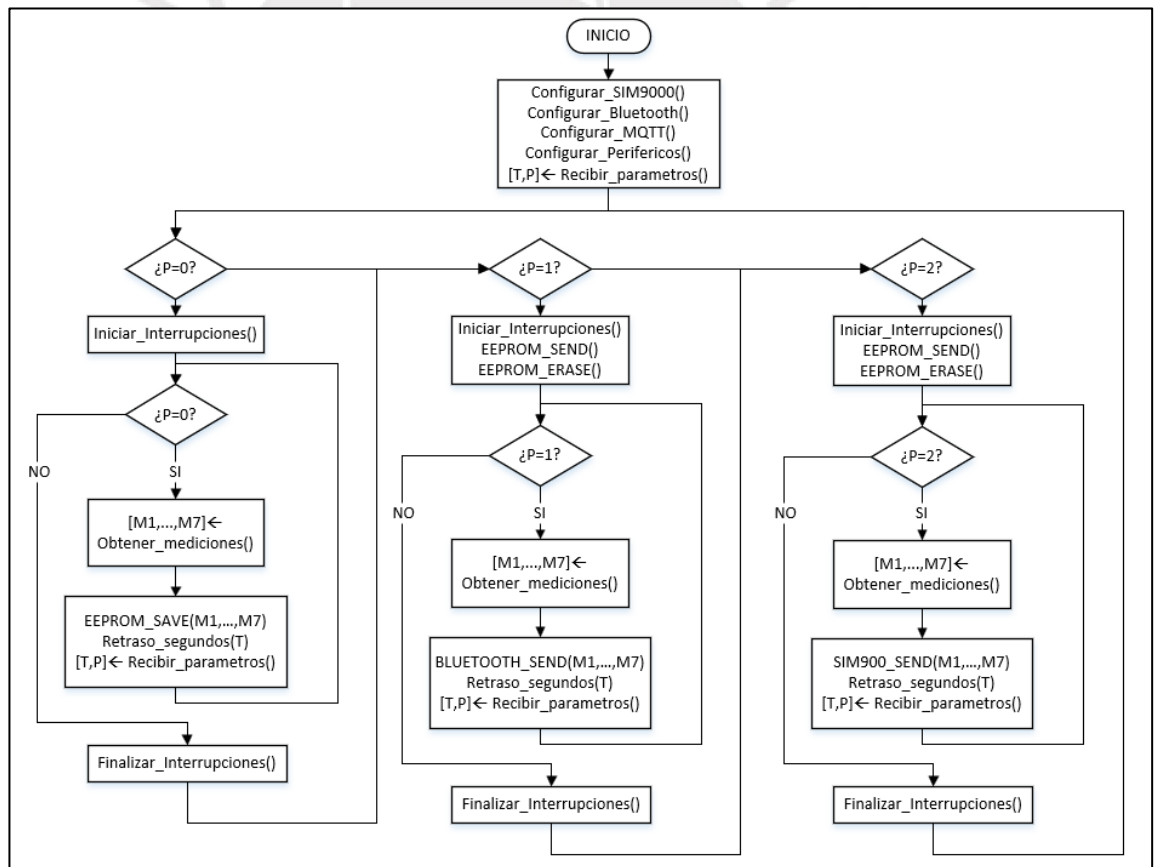


Figura 3.31. Diagrama de flujo del programa principal.

El sistema tiene tres modos de uso, por lo tanto, el mismo número de ramas de ejecución. La primera de ellas se ejecuta cuando no existe un dispositivo receptor

(emergencia). En ese caso se habilitan las interrupciones para obtener las mediciones. Luego cada cierto tiempo, dado por el parámetro T, se tomarán las mediciones y se realizará su almacenamiento en la memoria EEPROM, luego de ello se verificará si los parámetros han cambiado para alterar el tiempo entre mediciones o el modo de operación. En caso de cambiar de modo de operación se finalizan las interrupciones. El segundo modo de operación, se ejecuta cuando el dispositivo receptor es compatible con Bluetooth. En ese caso se habilitan las interrupciones para obtener las mediciones. Luego se realiza el envío de todos los datos almacenados en la memoria EEPROM al dispositivo receptor y se hace una limpieza de esta memoria bajo autorización del usuario. Luego cada cierto tiempo, dado por el parámetro T, se tomarán las mediciones y se realizará su envío al dispositivo receptor, luego de ello se verificará si los parámetros han cambiado para alterar el tiempo entre mediciones o el modo de operación. En caso de cambiar de modo de operación se finalizan las interrupciones. El último modo de operación, se ejecuta cuando la recepción la hará la plataforma web. En ese caso se habilitan las interrupciones para obtener las mediciones. Luego se realiza el envío de todos los datos almacenados en la memoria EEPROM a la web y se hace una limpieza de esta memoria bajo autorización del usuario. Luego cada cierto tiempo, dado por el parámetro T, se tomarán las mediciones y se realizará su envío a la plataforma, luego de ello se verificará si los parámetros han cambiado para alterar el tiempo entre mediciones o el modo de operación. En caso de cambiar de modo de operación se finalizan las interrupciones. De las funciones antes mostradas, resultara importante detallar aquella de la cual se obtendrán las mediciones llamada `Obtener_mediciones()`. Esta función obtendrá en primer lugar usando el periférico ADC las medidas de las concentraciones de CO, NO₂, así como la dirección del viento. Por otro lado, la velocidad de viento será dada por la multiplicación de una constante por un contador cuyo incremento se dará en una rutina de interrupción que se ejecuta cada vez que se cierra un contacto cuya frecuencia de cambio de estado depende de la velocidad de viento. De forma similar, la cantidad de lluvia será dada por la multiplicación de una constante por un contador cuyo incremento se dará en una rutina de interrupción que se ejecuta cada vez que se cierra un contacto cuya frecuencia de cambio de estado depende de haber recibido en el área del pluviómetro una determinada cantidad de lluvia. La concentración de material particulado se obtiene del sensor Sharp para lo cual se requiere mandar una señal de excitación que se hará con la función respectiva. La medida se obtendrá

usando el módulo PWM en modo captura. Finalmente se obtiene la temperatura mediante una función que realiza la interpretación de la trama digital de datos enviada por el sensor DHT11. Las funciones y rutinas de interrupción utilizadas en las mediciones son reutilizadas en los diferentes modos de operación como se apreció en el flujo principal.

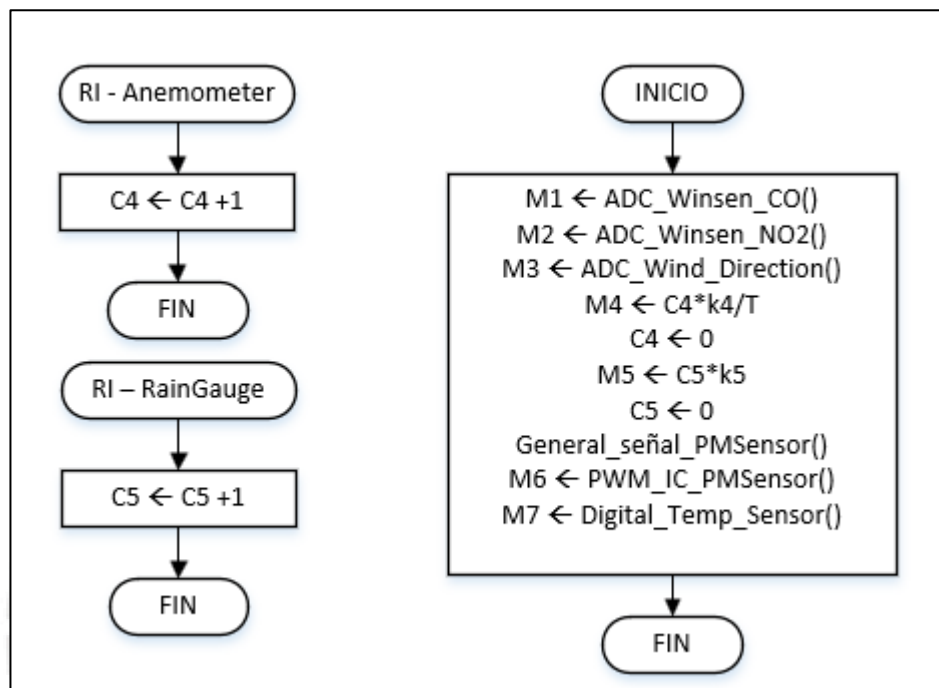


Figura 3.32. Diagramas de flujo de la función y rutinas de interrupción involucradas con la obtención de medidas.

CÁPITULO 4: PUESTA EN OPERACIÓN

En el presente apartado se mencionan aspectos adicionales a considerar al poner el sistema en operación:

4.1. COSTOS DEL SISTEMA:

En este apartado se hablará de los costos del sistema para lo cual se incluye la tabla 4.1. donde se listan los costos de cada componente. Para aquellos componentes que incluyan una exportación se considera su precio original multiplicándolo por un factor de dos, asumiendo el peor de los casos.

CÁLCULO DEL COSTO APROXIMADO DEL SISTEMA			
Concepto	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Submonto (USD)
Sensor Winsen M3-CO	1	20	30
Sensor Winsen M3-NO2	1	79	118,5
Sensor GP2Y1010AU0F PM2.5	1	12	18
Módulo GSM (SIM 900)	1	34	51
Weather Meters (Anemómetro, Dirección de viento y Pluviómetro)	1	77	115,5
Sensor DHT11	1	3	3
Módulo Bluetooth HC05	1	8	8
Panel Solar	2	18	36
PowerBoost 1000 Charger - Adafruit	2	20	60
Batería Ion Litio 3,7V - 6600 mA.h	2	30	90
Tarjeta de Poder	1	30	45
Tarjeta Principal	1	50	75
Cases y soporte de plástico	3	15	67,5
Estructura de aluminio	1	60	60
TOTAL (USD)			777,5

Tabla 4.1. Cálculo del costo aproximado del sistema.

Finalmente se puede comprobar que el costo solo en componentes del sistema bordea alrededor de los 800 dólares americanos. De incluirse los costos por montaje y puesta en operación el costo total por unidad sensorial es de aproximadamente 2600 soles.

4.2. ELECCIÓN DE PUNTOS DE OPERACIÓN:

En el presente trabajo de tesis se tienen que seleccionar dos tipos de puntos de operación: en primer lugar, los puntos de operación donde se colocarán los nodos sensoriales diseñados en el presente trabajo y finalmente los puntos donde se sugeriría colocar un grupo de sensores de alta calidad en base a las mediciones hechas con los nodos sensoriales.

4.2.1. Elección de puntos de operación de los nodos sensoriales.

Existen dos criterios fundamentales para la elección de estos puntos de operación:

- El primer criterio básico es el nivel de contaminación presente en una determinada zona teniendo en cuenta la presencia de emisores de gases contaminantes o material particulado. Para ello se tienen diversos métodos entre los cuales destaca la técnica EMOD/CAMP aplicado en diferentes estudios de impacto ambiental de soluciones de transporte [30]. El protocolo para la aplicación de este método consiste en hacer un recuento o inventario de todos los puntos de emisión, considerando para cada uno de ellos un valor aproximado para la concentración de gases emitidos.

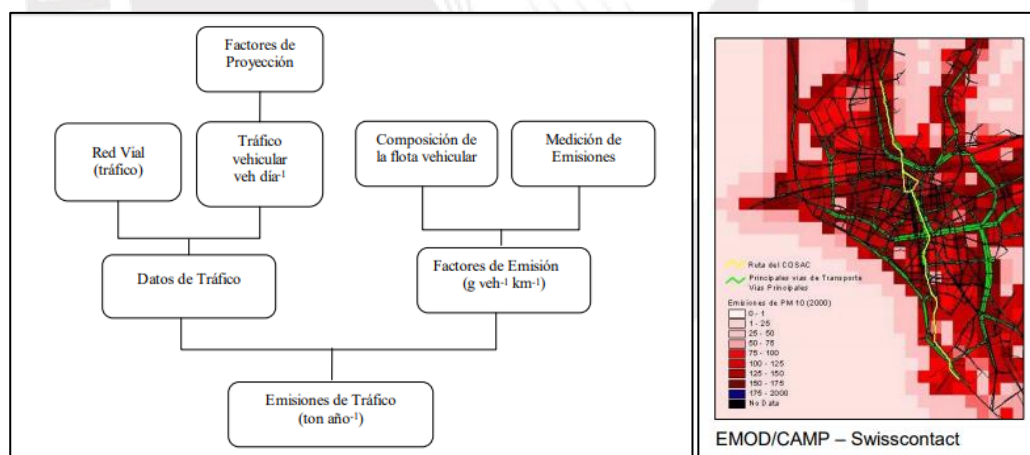


Figura 4.1. Criterios del método EMOD/CAMP y superficie de concentración.

(Fuente: [30])

Para nuestra aplicación se requiere conocer por tanto la ubicación de las avenidas o calles de mayor tráfico, los tipos de vehículos que pasan por las mismas y el horario en el que lo hacen. Luego, con el inventario de estas cargas se calcula aproximadamente la superficie de concentración usando un modelo exponencial de disminución de la concentración según la distancia de separación

de la fuente. Después de obtenido el modelo se puede trazar una superficie de concentración tal como se muestra en la figura 4.1.

- El segundo criterio es la no persistencia de los contaminantes en la zona de emisión, esto debido a las corrientes de aire que permiten su desplazamiento hacia diferentes zonas de la ciudad. Para poder incluir este criterio en la elección de los puntos de operación debemos tener en cuenta la velocidad y dirección de los vientos en la ciudad esto plasmada en el mapa de masas de aire obtenidas para un determinado horario [31] generalmente mediante el uso de información de satélite. Mediante el uso de estos mapas es posible determinar las zonas que corresponden al barlovento (zona desde donde el viento viene) y al sotavento (zona donde el viento va) ya que resulta importante tener sensores en ambas zonas de modo que se pueda medir la diferencia en el nivel de contaminación entre ellas.

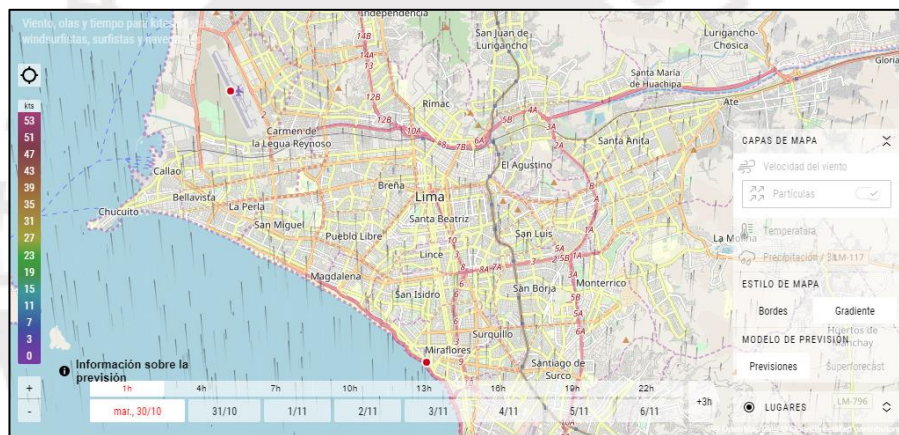


Figura 4.2. Mapa de vientos de la ciudad de Lima.

(Fuente: [31])

Se deben combinar ambos criterios para ubicar los sensores para lo cual se recomiendan los siguientes pasos:

- Determinar un área o región de interés, determinar sobre ella los principales puntos de emisión de contaminantes y obtener un modelo EMOD/CAMP simple.
- Determinar para una cierta estación el mapa de vientos y su variación durante todo un día a fin de determinar las zonas de barlovento y sotavento.
- Identificar las corrientes de aire que pasan por los puntos de emisión mas importantes y determinar en que posiciones estas corrientes pasan por las zonas barlovento o sotavento.
- Ubicar los nodos sensoriales sobre las zonas correspondientes a los cruces entre las corrientes en barlovento y sotavento, sobre puntos a los que se tenga acceso.

Una gráfica del método es mostrada en la figura 4.3., en base a la ubicación de las zonas de emisión y la dirección de los vientos promedio de un día se puede obtener las zonas en las que se podría colocar los nodos sensoriales:

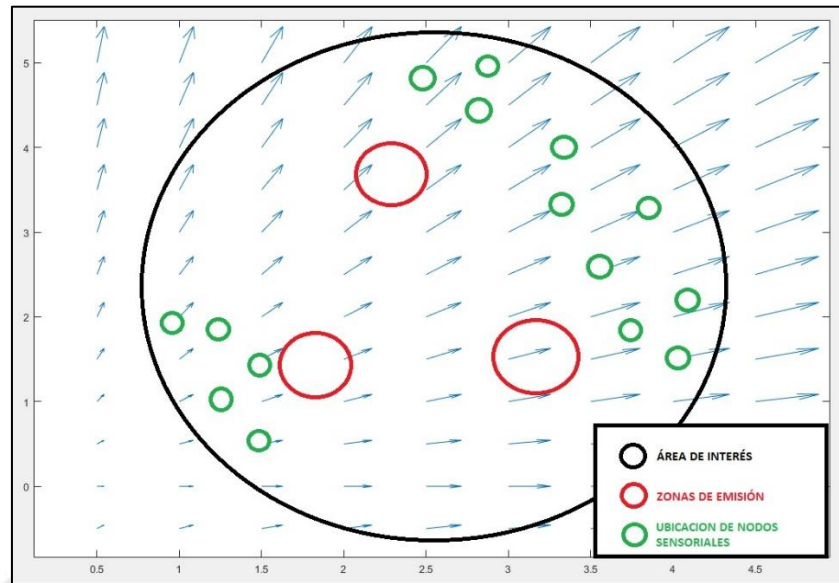


Figura 4.3. Criterios aplicados para la determinación de la ubicación de los nodos sensoriales.

Es importante tener en cuenta que no se recomienda criterios de ubicación más rigurosos para la ubicación de los nodos sensoriales debido a que la principal característica de los mismos es su fácil movilidad y capacidad de sensado que permiten cada cierto tiempo cambiar la ubicación de los sensores. Por otro lado, otro criterio es la altura a la que deberían estar ubicados estos sensores que es establecido según los protocolos manejados por la dirección general de salud ambiental [12], generalmente entre 3 y 15 metros con respecto al piso como se puede apreciar en la tabla 4.2.

Criterios de ubicación de la toma muestra por contaminante y escala de medición

Contaminante	Escala	Altura de la toma de muestra (m)	Distancia vertical y horizontal de las estructuras de soporte (m) ^A
SO ₂ ^{B, C, D, E}	Media Local Urbana Regional	3 – 15	> 1
CO ^{C, D, F}	Microescala	3 ± 0.5	> 1

Tabla 4.2. Criterios recomendados para la altura de ubicación de los nodos sensoriales.

(Fuente: [12])

4.2.2. Elección de puntos de operación de sensores de alta calidad.

Para la elección de los puntos de operación de sensores de alta calidad se utilizará un modelo de regresión con características polinomiales. Los criterios que se tomaran para la implementación de este algoritmo son los siguientes:

- Con la regresión se busca obtener las superficies de concentración, gráficas en donde las abscisas sean las coordenadas de ubicación de sensores y la ordenada el valor estimado de la concentración de CO (z_1), NO₂ (z_2), PM_{2.5} (z_3) y velocidad del viento (z_4). En general, estas superficies cumplen con la siguiente ecuación:

$$z_i = g_i(x, y); i \text{ entre } 1 \text{ y } 4$$

- Se propone que las superficies tengan por lo menos tres puntos de interés con por lo menos un valor máximo y un valor mínimo, para tener una superficie de tal característica usando un modelo simple se escoge una regresión polinomial de cuarto grado tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$z_i = \theta_{0i} + \theta_{1i} \cdot (x + y) + \theta_{2i} \cdot (x^2 + y^2) + \theta_{3i} \cdot (x^3 + y^3) + \theta_{4i} \cdot (x^4 + y^4);$$

i entre 0 y 3 para cada estimación

Un modelo con esta característica es por ejemplo el mostrado en la gráfica 4.4. a continuación correspondiente a la ecuación:

$$z_i = 1 - 1,44 \cdot (x + y) + 4,74 \cdot (x^2 + y^2) - 6,4 \cdot (x^3 + y^3) + 3 \cdot (x^4 + y^4);$$

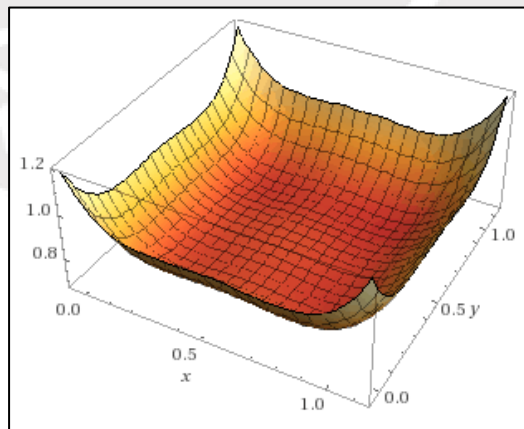


Figura 4.4. Superficie de características similares al modelo.

- El problema de optimización se reduce al siguiente: se realizan “m” mediciones de distintos nodos sensoriales presentes en determinada ubicación denotada con coordenadas cartesianas “x” e “y”. Las mediciones a tomar en

cuenta corresponden a las concentraciones de CO, NO2, PM2.5 y velocidad del viento para distintos horarios. Usando las “m” mediciones se busca obtener el valor de los pesos: $\theta_{0i}, \theta_{1i}, \theta_{2i}, \theta_{3i}, \theta_{4i}$ para cada “i”, es decir finalmente se tendrán que establecer veinte pesos. Por otro lado, teniendo en cuenta la forma de la ecuación se puede determinar que las características serian:

$$X0 = 1, X1 = (x + y), X2 = (x^2 + y^2), X3 = (x^3 + y^3), X4 = (x^4 + y^4).$$

Lo mencionado puede resumirse en la ecuación matricial:

$$\begin{pmatrix} z1 \\ z2 \\ z3 \\ z4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \theta_{01} & \theta_{11} & \theta_{21} & \theta_{31} & \theta_{41} \\ \theta_{02} & \theta_{12} & \theta_{22} & \theta_{32} & \theta_{42} \\ \theta_{03} & \theta_{13} & \theta_{23} & \theta_{33} & \theta_{43} \\ \theta_{04} & \theta_{14} & \theta_{24} & \theta_{34} & \theta_{44} \\ \theta_{05} & \theta_{15} & \theta_{25} & \theta_{35} & \theta_{45} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X0 \\ X1 \\ X2 \\ X3 \\ X4 \end{pmatrix}$$

$$Z = \Theta.X$$

Finalmente, la función de costo a minimizar es la siguiente:

$$J(\Theta) = \frac{1}{2 \cdot m} \cdot \sum_{i=1}^m (\Theta \cdot X^i - Z^i)^2$$

Donde X^i y Z^i son datos obtenidos durante una medición, es importante mencionar que es posible aplicar una normalización en caso los rangos de valores de las características sean de magnitudes muy diferentes.

- El algoritmo de optimización a usar es el descenso de gradiente el cual permitirá actualizar los pesos por cada iteración en función de la derivada parcial. El algoritmo se ejecuta el número de veces necesarias hasta que se consiga una constancia en los valores de los pesos. La actualización de los pesos en cada iteración tendrá la forma:

$$\theta_{ij} = \theta_{ij} - \alpha \cdot \frac{\partial J(\Theta)}{\partial \theta_{ij}}; \text{ para todo } i, j \text{ presente en el problema}$$

El valor de la constante α debe escogerse en base a los datos para permitir una convergencia adecuada.

- Una vez aplicada el algoritmo de descenso de gradiente y obtenido el modelo para cada una de las estimaciones, se obtendrá el modelo general mediante la suma simple de cada modelo obtenido como se describe en la siguiente ecuación.

$$z_g = H(x, y) = g_1(x, y) + g_2(x, y) + g_3(x, y) + g_4(x, y)$$

Será importante evaluar en la implementación real si es que se requiere incorporar pesos para cada sumando de la ecuación presentada anteriormente a fin de resaltar una estimación sobre las demás.

- En el modelo general se determinan los puntos de interés de forma aproximada mediante la gráfica de la superficie o de forma analítica buscando los puntos que cumplan la siguiente ecuación:

$$x \text{ e } y \text{ tal que } \nabla H(x, y) = (0; 0) \text{ ó } \frac{\partial H(x, y)}{\partial x} = 0 \text{ y } \frac{\partial H(x, y)}{\partial y} = 0$$

- Se evalúa en cual de los puntos de interés se colocarían los sensores de mayor calidad considerando que por lo menos deberían ser dos: uno a sotavento y uno a barlovento.

El principio de funcionamiento de este algoritmo radica en el hecho que en un punto de interés determinado con el método anteriormente descrito se cumple que las estimaciones sumadas sean estas concentraciones de gas o velocidad de viento son tienen un valor máximo o mínimo. Un punto donde la suma de estimaciones es mínima es un candidato para un punto de sensado en barlovento y un punto donde, por el contrario, la suma sea máxima; se deberá tener un punto de sensado en sotavento.

4.3. PRUEBA DE CONCEPTO:

Se realiza una prueba de concepto para comprobar la posibilidad de habilitar una conexión entre un sistema embebido y la plataforma IOT de IBM [32]. Así mismo, en esta prueba de concepto se comprueba que es posible implementar el protocolo MQTT para permitir la seguridad en las comunicaciones. En la figura mostrada a continuación se puede ver la configuración del dispositivo en la plataforma, se trata de un nodo sensorial que conecta un sensor MQ3-CO con un sistema embebido NodeMCU basado en el circuito integrado ESP8266.

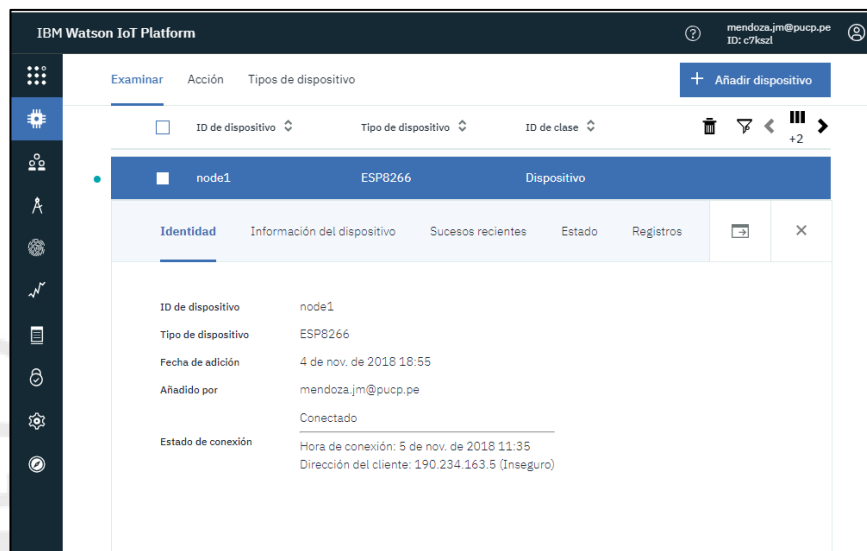


Figura 4.5. Características del dispositivo utilizado en la prueba de concepto.

En el sistema embebido se ejecuta un código de programación, cuyo detalle se puede encontrar en los anexos, que se encarga de conectar el dispositivo a una red wifi disponible y generar automáticamente una dirección IP. Por otro lado, también se configura el periférico que se conecta con el sensor de CO que se utilizará en la prueba de concepto. Luego de verificadas las credenciales suministradas en el programa con la plataforma IOT, se procede a hacer el envío de datos medidos. Estos datos son agrupados en tramas bajo el formato JSON y enviadas a la plataforma, en esta prueba de concepto se decidió por enviar el tiempo de medición y la concentración de CO medida en ppm. El informe del paso a paso dado por el NodeMCU mediante comunicación serial es mostrado en la figura 4.6.

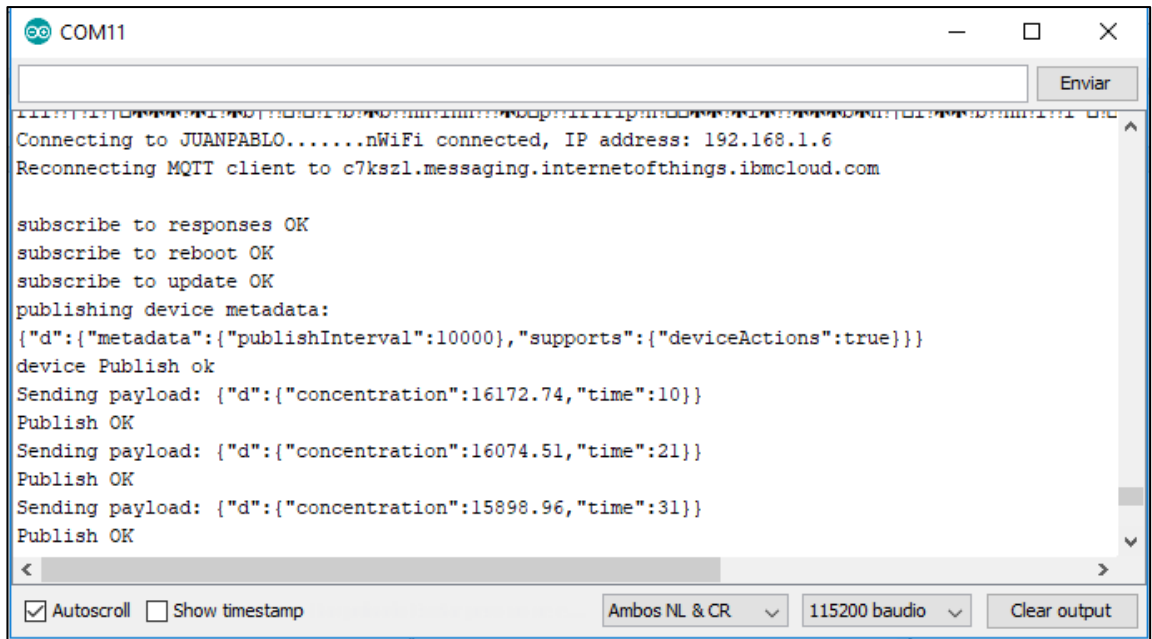


Figura 4.6. Comunicación serial con el NodeMCU mientras se ejecuta la prueba de concepto.

Finalmente se comprueba que los datos suministrados por el nodo sensorial llegan a la plataforma IOT. En esta, se almacenan según el orden de llegada, las tramas de datos dadas en formato JSON. En esta prueba de concepto se logro enviar datos durante todo un día como se puede apreciar en la figura mostrada a continuación. Con esta prueba de concepto puede validarse el envío de datos y la posibilidad de uso de los mismos con otros servicios web para su análisis y generación de informes.

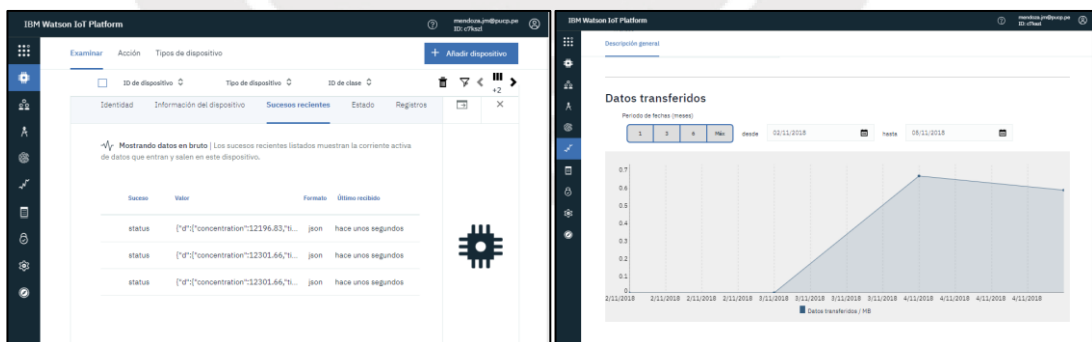


Figura 4.7. Gestión de datos en la plataforma IOT de IBM.

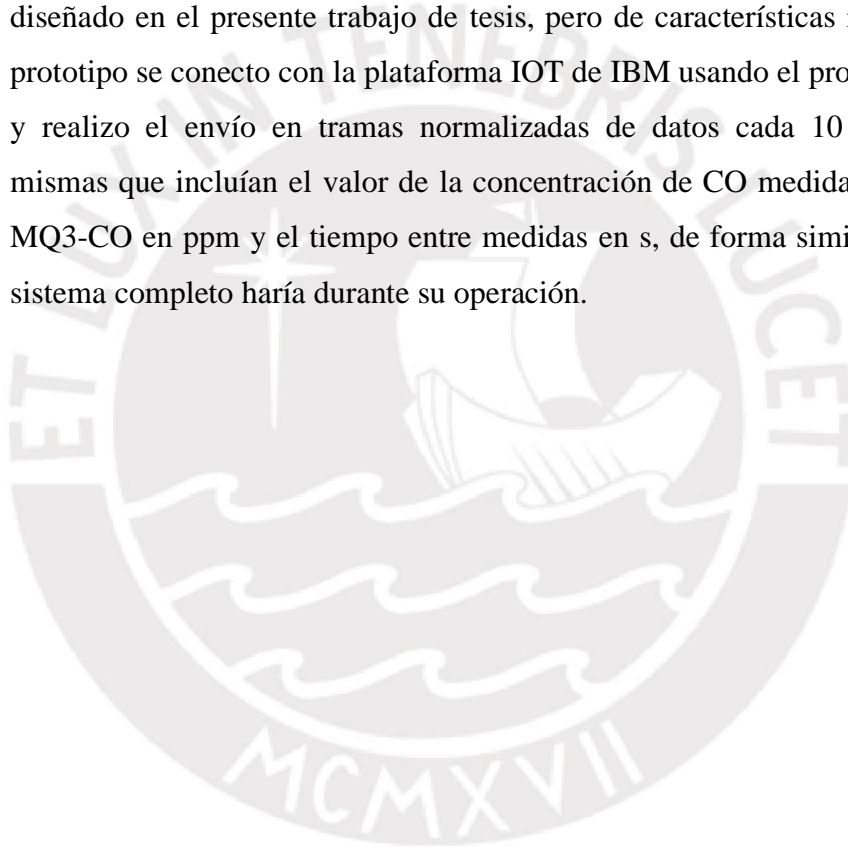
CONCLUSIONES

En el presente capítulo se realiza la comparación entre el sistema final obtenido y los objetivos planteados al inicio de este trabajo:

- Durante el presente trabajo se definió como contaminantes prioritarios de medida, en una ciudad con características similares a Lima, a CO, NO₂, SO₂ y PM_{2.5}. De acuerdo a ello, se diseñó un sistema embebido de costo inferior a 800 USD, dimensiones inferiores a 1m³ y peso menor a 25kg que cuenta con los sensores necesarios para determinar la concentración de los contaminantes antes listados dentro de los rangos recomendados por el MINSA y la capacidad para enviar el resultado de estas mediciones a una plataforma IOT en tiempo real a través de internet.
- Se realizó una revisión de soluciones de monitorización de contaminantes de aire en zonas urbanas planteadas anteriormente a la propuesta, comprobándose la necesidad de desarrollar una solución de bajo costo, autónoma, fácil de transportar, que a la vez se adapte a las necesidades de la zona en la que opere.
- Se realizó una selección de sensores de los contaminantes seleccionados en base a una serie de parámetros técnicos acordes al protocolo de monitoreo de calidad de aire de DIGESA. Como resultado del proceso se determinó los sensores de gas Winsen ME3 para CO y NO₂ cuyos rangos de medición son de 0 a 1000 ppm y de 0 a 20 ppm respectivamente. Así mismo, se seleccionó el sensor óptico SHARP GP2Y1010AU0F para PM_{2.5} con rango de medición de 0 a 500 ug/m³.
- Se estableció MQTT como protocolo para la gestión de comunicaciones entre un nodo sensorial y la plataforma IOT de IBM. En ese sentido, también se seleccionó el módulo de GSM/GPRS SIM900 con capacidad para manejar este protocolo que permite la transmisión de datos en un rango de velocidad entre 9 y 170 Kb/s.
- Se realizó el desarrollo de un sistema electrónico capaz de cubrir los requerimientos de procesamiento, conversión y filtrado de la información recibida de los sensores y del hardware de comunicaciones. Este sistema requiere una alimentación de 5V y corriente máxima de 800 mA. Por otro lado, se diseñó un sistema de alimentación que cuenta con baterías que le permiten

un funcionamiento autónomo por 12 horas; el mismo además cuenta con un par de paneles solares capaz de abastecer al nodo sensorial con una captación lumínica mínima de 25%.

- Se propuso un método para la determinación de los puntos en que los nodos sensoriales serían ubicados en base a modelos estándar como EMOD/CAMP. Asimismo, se propuso como en base a la información obtenida de varios de estos nodos se llegaría a determinar la zona en la que se ubicaría un sensor de mayor calidad y costo, usando algoritmos de aprendizaje automático.
- Se realizó una prueba de concepto exitosa con un sistema embebido similar al diseñado en el presente trabajo de tesis, pero de características reducidas. Tal prototipo se conectó con la plataforma IOT de IBM usando el protocolo MQTT y realizó el envío en tramas normalizadas de datos cada 10 segundos las mismas que incluían el valor de la concentración de CO medida por el sensor MQ3-CO en ppm y el tiempo entre medidas en s, de forma similar a la que el sistema completo haría durante su operación.



BIBLIOGRAFÍA

[1] GRUPO PENSANDO LIMA

Crecimiento y expansión de Lima.

Consulta: 20 de marzo del 2018

<https://pensandolima.wordpress.com/2009/09/13/crecimiento-y-expansion-de-lima/>

[2] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (INEI)

2013. Parque automotor en circulación a nivel nacional, según departamento. Lima: Instituto Nacional de Estadística e Informática.

Consulta: 22 de marzo del 2018

<https://www.inei.gov.pe/estadisticas/indice-tematico/transport-and-communications/>

[3] INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA (INEI)

2018. Población estimada al 30 de junio, por años, calendario y sexo, según departamento. Lima: Instituto Nacional de Estadística e Informática.

Consulta: 22 de marzo del 2018

<https://www.inei.gov.pe/estadisticas/indice-tematico/poblacion-y-vivienda/>

[4] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS)

Calidad del aire ambiente (exterior) y salud.

Consulta: 20 de marzo del 2018

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>

[5] MINISTERIO DE SALUD - DIRECCIÓN GENERAL DE SALUD AMBIENTAL

Programa de vigilancia de la calidad de aire: estándares.

Consulta: 20 de marzo del 2018

http://www.digesa.minsa.gob.pe/DEPA/aire_lc/estandares.asp

[6] MINISTERIO DEL AMBIENTE - SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL

2016. Boletín: Vigilancia de la calidad de aire - Lima Metropolitana.

Consulta: 22 de marzo del 2018

<http://sinia.minam.gob.pe/documentos/vigilancia-calidad-aire-lima-metropolitana>

- [7] G. Varela, A. Paz-Lopez, R. J. Duro, F. Lopez-Peña and F. J. González-Castaño, "An integrated system for urban pollution monitoring through a public transportation based opportunistic mobile sensor network," *2009 IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, Rende, 2009, pp. 148-153.
doi: 10.1109/IDAACS.2009.5343007
- [8] B. A. B. Granda, L. A. Belduma Belduma, E. J. C. González and A. F. S. Sarango, "Designing a wireless sensor network for vehicular traffic and CO2 pollution monitoring in an urban area," *2017 IEEE 9th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, Guatemala City, 2017, pp. 1-6.
doi: 10.1109/LATINCOM.2017.8240168
- [9] K. Bashir Shaban, A. Kadri and E. Rezk, "Urban Air Pollution Monitoring System With Forecasting Models," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 8, pp. 2598-2606, April 15, 2016.
doi: 10.1109/JSEN.2016.2514378
- [10] Guideline, V.D.I, "2206 A New Guideline for the Design of Mechatronic Systems".
Düsseldorf: VDI, 2002.
- [11] XUNTA DE GALICIA – CONSELLERÍA DE EDUCACIÓN, UNIVERSIDADE E FORMACIÓN PROFESIONAL
2018. Boletín de capacitación: Análisis de gases vehiculares y métodos para evitar contaminación.
Consulta: 01 de octubre del 2018.
<http://www.edu.xunta.gal/centros/cifpsomeso/system/files/ANALISIS+DE+GASES.pdf>
- [12] MINISTERIO DE SALUD - DIRECCIÓN GENERAL DE SALUD AMBIENTAL
2005. Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos.
Consulta: 01 de octubre del 2018.
http://www.digesa.minsa.gob.pe/norma_consulta/Protocolo-de-Calidad-del-Aire.pdf
- [13] HANWEI ELECTRONICS
2018. Technical Data MQ-7 GAS SENSOR.
Consulta: 15 de octubre del 2018.
<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-7.pdf>

[14] HANWEI ELECTRONICS

2018. ME3-CO Gas Sensor Manual.

Consulta: 15 de octubre del 2018.

http://www.gassensor.ru/data/files/carbon_monoxide/ME3-CO.pdf

[15] ALPHASENSE

2018. CO-D4 Carbon Monoxide Sensor.

Consulta: 15 de octubre del 2018.

<http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2013/07/COD4.pdf>

[16] WINSEN ELECTRONICS

2018. ME3-NO2 Gas Sensor Manual.

Consulta: 15 de octubre del 2018.

<https://p.gsolimg.com/IMAGES/PDT/SPEC/170/K1059654170.pdf>

[17] ALPHASENSE

2018. NO2-D4 Nitrogen Dioxide Sensor.

Consulta: 15 de octubre del 2018.

<http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2013/07/NO2D4.pdf>

[18] SHARP

2018. GP2Y1010AU0F – Compact Optical Dust Sensor.

Consulta: 15 de octubre del 2018.

https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/gp2y1010au_e.pdf

[19] SAMYOUNG S&C

2018. Dust Sensor Module P/N: DSM501 – SPECIFICATIONS.

Consulta: 15 de octubre del 2018.

<https://elec Freaks.com/estore/download/EF10016-DSM501%5B1%5D.pdf>

[20] ARGENT DATA SYSTEMS

2018. Weather Sensor Assembly p/n 80422.

Consulta: 15 de octubre del 2018.

https://cdn.sparkfun.com/assets/8/4/c/d/6/Weather_Sensor_Assembly_Updated.pdf

[21] AOSONG

2018. Temperature and humidity module – DHT11 Product Manual.

Consulta: 15 de octubre del 2018.

<https://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/DHT11.pdf>

[22] INTERNATIONAL BUSINESS MACHINE

2018. Conozca MQTT.

Consulta: 15 de octubre del 2018.

<https://www.ibm.com/developerworks/ssa/library/iot-mqtt-why-good-for-iot/index.html>

[23] DATAWEEK

2018. Quectel supports MQTT protocol for IoT.

Consulta: 15 de octubre del 2018.

<https://www.dataweek.co.za/9101a>

[24] RHYDOLABZ

2018. SIM900 – RS232 GSM/GPRS Modem

Consulta: 15 de octubre del 2018.

http://www.rhydolabz.com/documents/gps_gsm/sim900_rs232_gsm_modem_opn.pdf

[25] MICROCHIP

2018. ATmega2560

Consulta: 15 de octubre del 2018.

<https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega2560>

[26] MICROCHIP

2018. AT24C512- Two-wire Serial EEPROM

Consulta: 15 de octubre del 2018.

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/doc1116.pdf>

[27] ADAFRUIT

2018. PowerBoost 1000 Charger - Rechargeable 5V Lipo USB Boost @ 1A - 1000C

Consulta: 15 de octubre del 2018.

<https://www.adafruit.com/product/2465>

[28] ADAFRUIT

2018. Lithium Ion Battery Pack - 3.7V 6600mAh

Consulta: 15 de octubre del 2018.

<https://www.adafruit.com/product/353>

[29] ADAFRUIT

2018. Colossal 6V 10W Solar Panel - 10.0 Watt

Consulta: 15 de octubre del 2018.

<https://www.adafruit.com/product/2747>

[30] S. Alvarado, M. Luján and C. Bomblat,

2018. "Modelación de las emisiones del parque automotor en la ciudad de Cochabamba - Bolivia" Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería. Universidad Católica Boliviana. Cochabamba.

<http://ucbconocimiento.ucbcba.edu.bo/index.php/ran/article/viewFile/144/139>

[31] WINDFINDER

2018. Mapa de vientos en tiempo real – Ciudad de Lima

Consulta: 15 de octubre del 2018.

<https://es.windfinder.com/#10/-12.0219/-77.1144>

[32] INTERNATIONAL BUSINESS MACHINE

2018. IBM Watson IOT Platform.

Consulta: 15 de octubre del 2018.

<https://internetofthings.ibmcloud.com/>