



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA**

**DISEÑO Y DESARROLLO DE MICROSENSOR PARA
LA DETECCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GASES Y
MATERIAL PARTICULADO A NIVEL RESIDENCIAL
EN LA CIUDAD DE CURICÓ**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROF. GUÍA: JORGE MORALES FERREIRO

FRANCISCO HENRIQUEZ BRIONES

**CURICÓ - CHILE
2020**

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS UNIVERSIDAD DE TALCA' and the right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO'.

Curicó, 2022

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, me gustaría agradecer a mi familia por el apoyo incondicional ante mis decisiones y dificultades vividas a lo largo de este proceso tan extenuante que es la educación superior. A mi pareja María José Mejías por mantenerse a mi lado y apoyarme. Agradecer también a mis colegas su apoyo y buena disposición a compartir sus vidas y experiencias conmigo.

Agradecer en gran medida a todos los profesionales que aportaron en mi formación académica, resaltando el trabajo de los académicos Jorge Morales Ferreiro y su labor como el docente guía de este trabajo, al académico Ambrosio Olivos Pérez por sus consejos siempre acertados, a la académica María Elisa Quinteros Cáceres por compartir sus conocimientos y buenas prácticas en el manejo de equipos especializados y a la señorita María Alejandra Cabrera Mancilla por sus incontables asesorías, consejos y guía a lo largo de la carrera.

Agradecer al proyecto NAC-I-035-2014 por facilitar el uso de equipo especializado Dustrack II y al señor Patricio Ubilla Thompson por el equipo multiRAE lite y su asesoría en el uso del dispositivo y la experiencia brindada.

Finalmente, agradecer a cada uno de mis amigos, los cuales me acompañaron en incontables ocasiones, días y noches, apoyándome y motivándome a seguir para alcanzar mis metas. En especial a Valentina Gutiérrez Muñoz, Fernanda González Rojas, Carlos Imas Espinoza, Ariel Torres Mora y Matías Soto Poblete.

DEDICATORIA

Documento dedicado a mi amada familia por los esfuerzos dirigidos a mi persona.

Dedicado a mi padre, Luis Alberto Henríquez Piérola, por transmitirme valores como la honradez, humildad, gratitud y responsabilidad, así como también demostrarme día a día que todo esfuerzo obtiene su recompensa.

Dedicado a mi madre., Mabel Margot Briones Herrera por el amor incondicional, la tolerancia y la disciplina que inculco en mi persona desde siempre.

Dedicado a mi hermano, Daniel Esteban Henríquez Briones, para demostrar con esto que, si los sueños nacen en el corazón, serán logrados con esfuerzo y perseverancia.

RESUMEN

El presente trabajo inicia bajo la oportunidad de ampliar la resolución espacio-tiempo que mantiene la ciudad de Curicó, región del Maule, Chile, referente al monitoreo de calidad del aire. Este es un concepto que ha crecido en los últimos años en el ámbito de la salud pública debido a los amplios estudios que relacionan ciertos contaminantes con enfermedades específicas. En este contexto, se expone una alternativa de bajo costo que permite realizar un monitoreo continuo mediante el uso de tecnología IoT para contaminantes atmosféricos de interés en zonas residenciales de la ciudad.

La validación del dispositivo desarrollado se realizó en dos etapas; una primera etapa contemplando pruebas de laboratorio con dispositivos certificados para material particulado y compuestos orgánicos volátiles (Dustrack II y multiRAE), realizando un análisis comparativo, ajustando la programación y manejo de señales obtenidas, obteniendo un factor de correlación (ρ) de 0.82 según la correlación de Spearman. Luego en la segunda etapa, pruebas en terreno comparando los valores del dispositivo con la central de monitoreo oficial ubicada en la ciudad de Curicó, estos últimos publicados en la red SINCA gestionada por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile, evidenciando una fuerte tendencia indicada en el gráfico 3-3.

Debido a las condiciones que afrontó el país en el periodo en el que se desarrolló este trabajo, se presenta un excelente horizonte de desarrollo y mejora, tomando en consideración el precio de fabricación y las respuestas registradas a lo largo de las comparativas realizadas. Con lo anteriormente expuesto, se refleja una opción viable para la expansión en el monitoreo de la calidad del aire en las zonas residenciales de la ciudad de Curicó y terminar con la información actualmente publicada, la que no representa la condición total de la ciudad.

Palabras Claves: calidad del aire - IoT - material particulado - SINCA - compuestos orgánicos volátiles

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
RESUMEN.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA.....	4
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
1.5. RESULTADOS ESPERADOS.....	5
1.6. METODOLOGÍA.....	5
1.6.1. Investigación de tecnología disponible.....	5
1.6.2. Pruebas y selección de componentes.....	6
1.6.3. Diseño y fabricación de dispositivos.....	6
1.6.4. Validación de datos obtenidos.....	7
1.6.5. Rutas y puntos de monitoreo.....	7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. CONTAMINACION DEL AIRE E IMPACTO EN LA SALUD.....	10
2.2. NORMATIVA PARA LA MEDICIÓN DE CALIDAD DE AIRE.....	12

2.3.	MÉTODOS DE DETECCIÓN DE GASES Y MATERIAL PARTICULADO	13
2.3.1.	Método MOS (<i>Metal Oxide Semiconductor</i>).....	14
2.3.2.	Método electromecánico para detección de gas	15
2.3.3.	Método NDIR (<i>Non-Dispersive InfraRed</i>).....	16
2.3.4.	Método Pellistors.....	17
2.3.5.	Método PID (<i>Photo-Ionization Detector</i>).....	18
2.3.6.	Método <i>Laser-Scattering</i>	19
2.4.	PROGRAMACIÓN.....	20
2.5.	SISTEMAS IOT	20
2.6.	OBTENCIÓN Y PREPROCESAMIENTO DE DATOS.....	21
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA		22
3.1.	SOLUCIÓN	23
3.1.1.	Apartados generales.....	23
3.1.2.	Alcances y restricciones	23
3.1.3.	Conectividad y comunicación	25
3.2.	DISPOSITIVO.....	25
3.2.1.	Selección de componentes.....	25
3.2.2.	Fabricación	26
3.2.3.	Manejo de muestras y envío de datos.....	27
3.2.4.	Especificaciones técnicas	28
3.3.	VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA.....	29
3.3.1.	Etapa inicial	29
3.3.1.1.	Medición de material particulado.....	30
3.3.1.2.	Medición de compuestos orgánicos volátiles.....	32
3.3.1.3.	Medición de Benceno.....	34

3.3.2. Etapa en terreno	34
3.3.3. Despliegue	36
3.4. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	39
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
4.1. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN CON RED LOCAL.....	41
CONCLUSIONES.....	44
REFERENCIAS	46
ANEXO 1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MÓDULO ESP32	51
ANEXO 2: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SENSOR DSM501A.....	52
ANEXO 3: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SENSOR CJMCU-811	54
ANEXO 4: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SENSOR MQ-3.....	56
ANEXO 5: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MÓDULO GPS Neo-6.....	58
ANEXO 6: COTIZACIÓN DE COMPONENTE EMPRESA AFEL.....	59
ANEXO 7: COTIZACIÓN DE COMPONENTE EMPRESA MECHATRONICSTORE...	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Representación del mecanismo MOS y el efecto eléctrico para la conductancia. Fuente: J.E. Thomson [17]	14
Figura 2-2: Principio de funcionamiento para un dispositivo electromecánico de gas tipo amperímetro. Fuente: J.E. Thomson [17].....	15
Figura 2-3: Descripción de un dispositivo típico NIRD. Fuente: J.E. Thomson [17]	16
Figura 2-4: Elementos principales de un sistema pellistor. Fuente: J.E. Thomson [17]	17
Figura 2-5: Componentes y principio de funcionamiento de un sensor PID. Fuente: J.E. Thomson [17]	18
Figura 2-6: Principio de medición Laser-Scattering. Dispositivo DSM501A. Fuente: Y. Wang, J. Li, H. Jing, Q. Zhang, J. Jiang, P. Biswas [36]	19
Figura 3-1: Montaje de componentes seleccionados. Fuente: Elaboración propia	27
Figura 3-2: Condiciones de monitoreo continuo comparativo a la estación formal de la red SINCA. Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 3-3: Despliegue de referencia para las zonas residenciales de la ciudad de Curicó. Fuente: Elaboración propia.....	37
Figura 3-4: Rutas de la locomoción colectiva local: a) Empresa Renacer Santa Fé-Boldo, b) Empresa Intercomunal Aguas Negras-Bombero Garrido, c) Empresa Intercomunal Aguas Negras-Rauquén, d) Empresa Intercomunal Aguas Negras-Santa Fé. Fuente: Moovitapp.com	38
Figura 4-1: Visualización de la página Cayenne desarrollada para la estación de monitoreo de calidad del aire. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 4-2: Especificaciones técnicas de módulo ESP32. Fuente: Espressif Systems [43]	51
Figura 4-3: Diagrama de funcionamiento y pines del sensor. Fuente: Dust Sensor Module[44]	52
Figura 4-4: características eléctricas para interpretación de valores. Fuente: Dust Sensor Module[44]	52
Figura 4-5: Resistencias para determinación de diámetro aéreo de partículas. Fuente: Dust Sensor Module[44]	52
Figura 4-6: Gráfico para determinar e interpretar señales. Fuente: Dust Sensor Module[44] ..	53

Figura 4-7: Principio físico para la medición de concentraciones. Fuente: Samyoungsnc S&C [45].....	53
Figura 4-8: Especificaciones eléctricas del sensor CJMCU-811. Fuente: AMS Datasheet [46]	54
Figura 4-9: Especificaciones generales de operación. Fuente: AMS Datasheet [46].....	54
Figura 4-10: Recomendaciones para la conexión del sensor al host. Fuente: AMS Datasheet [46].....	55
Figura 4-11: Especificaciones generales del sensor MQ 3. Fuente: Hanwei Electronics [47]..	56
Figura 4-12: Diagrama de sensibilidad características para diversos gases a 20°C con 65% de humedad relativa. Fuente: Hanwei Electronics [47]	56
Figura 4-13: Dependencia típica del sensor a la temperatura y humedad relativa. Fuente: Hanwei Electronics [47]	57
Figura 4-14: Estructura del módulo MQ-3. Fuente: Hanwei Electronics [47].....	57
Figura 4-15: Especificaciones generales para el módulo GPS Neo6. Fuente: U-blox [48]	58
Figura 4-16: Especificaciones eléctricas del módulo GPS Neo6. Fuente: U-blox [48]	58

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3-1: Comparativa del monitoreo de material particulado $PM_{2.5}$ en zona residencial de Curicó. Fuente: Elaboración propia.....	31
Gráfico 3-2: Comparativa para la calibración del sensor de COV's en condiciones controladas. Fuente: Elaboración propia.....	33
Gráfico 3-3: Gráfico comparativo entre el dispositivo desarrollado y la estación oficial de calidad de aire de la ciudad de Curicó. Fuente: Elaboración propia	36
Gráfico 4-1: Concentraciones de TCOV's medidos en ppm representadas por la herramienta gráfica de Cayenne. Fuente: Elaboración propia.....	41
Gráfico 4-2: Concentraciones de benceno medidos en $\mu g/m^3$ representadas por la herramienta gráfica de Cayenne. Fuente: Elaboración propia.....	42
Gráfico 4-3: Concentraciones de $PM_{2.5}$ medidos en $\mu g/m^3$ representadas por la herramienta gráfica de Cayenne. Fuente: Elaboración propia.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Mayores contaminantes, fuentes de procedencia y peligro a la salud humana.....	11
Tabla 3-1: Servicios básicos de operación	23
Tabla 3-2: Restricciones y alcances del dispositivo	24
Tabla 3-3: Componentes principales para dispositivo de medición	26
Tabla 3-4: Especificaciones técnicas generales del dispositivo	28
Tabla 3-5: Comparativa de datos estadísticos para monitoreo de material particulado	31
Tabla 3-6: Comparativa de datos estadísticos para monitoreo de TCOV's	33
Tabla 3-7: Definición de la escala del índice de calidad de aire por US-EPA 2016	34
Tabla 3-8: Costo asociado a los componentes seleccionados en la fabricación del dispositivo desarrollado.	39

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Una de las principales preocupaciones en la actualidad, a nivel global, es el estado en que se encuentra el medio ambiente, esto debido a los altos niveles de contaminación presentes en zonas de media y alta densidad poblacional, caracterizadas por una urbanización progresiva y sin control que producen altas emisiones de contaminantes relacionados al transporte, procesos industriales poco regulados, calefacción, entre otros. Lo que presentan una gran preocupación sanitaria debido a los daños que producen en la salud humana [1–3].

La ciudad de Curicó, región del Maule, Chile, debido a su creciente densidad poblacional, que asciende a 149.136 habitantes en la comuna de Curicó según el censo del 2017 [4], en los últimos años ha llegado a niveles de contaminación alarmantes para los parámetros permitidos para la salud de las personas, decretando en el 2019 alerta sanitaria por contaminación ambiental en el Diario Oficial de la República de Chile [5]. Esta información puede ser corroborada por una única estación dedicada a medir parámetros de calidad de aire en la ciudad siendo estos: material particulado, ozono y dióxido de azufre. Datos que son registrados y actualizados cada una hora aproximadamente en la página web oficial dispuesta por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile Airechile¹.

Monitorear y evidenciar el material particulado presentes en el ambiente en el que se desenvuelve la población ha dado pie a comprender las causas y el comportamiento que siguen muchas complicaciones respiratorias y cardiovasculares, entregando una respuesta concreta a estas e identificando las fuentes más comunes que perjudican en mayor medida a la población joven y de la tercera edad, siendo estas: procesos industriales, quema leña y/o carbón, polinización, levantamiento de polvo, etc. [6–10]

Los compuestos orgánicos volátiles (COV's) producidos principalmente por sistemas de calefacción de combustión o procesos de obtención de combustibles son relacionados, en gran medida, con algunos tipos de cáncer, daño acumulativo a diversos órganos y al sistema nervioso central [11–14] siendo principalmente la familia de los hidrocarburos aromáticos y aldehídos responsables de estas últimas complicaciones.

¹ Estación de calidad de aire en la ciudad de Curicó. <http://airechile.mma.gob.cl/comunas/curico>

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La ciudad de Curicó actualmente cuenta con una sola estación dedicada al monitoreo de la calidad del aire la cual está ubicada en Av. Juan Luis Diez 1345, Curicó, Maule (coordenadas geográficas: -34.974953, -71.233727). Esta se encarga de medir material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), además de gases como ozono (O_3) y dióxido de azufre (SO_2) los cuales son actualizados y entregados a la comunidad cada 1 hora a través de la página web administrada por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile Airechile².

La central de monitoreo descrita anteriormente no se encuentra en una zona de alto flujo de personas ni de una densidad poblacional muy alta, lo que permite un monitoreo estable. Sin embargo, al ser una sola estación, no es posible establecer una representación total de la ciudad, lo que genera una entrega de información deficiente para un estudio completo, ya que los datos pierden representatividad mientras más se alejan de la estación de monitoreo [15]. Esto podría presentar un problema para la población de riesgo, propensa a complicaciones respiratorias o cardiovasculares debido a concentración de contaminantes en el aire [6–10]. Tales condiciones no son ideales para que la población tome decisiones preventivas, lo que podría indicar que los programas de descontaminación ambiental propuestos para la ciudad, a la fecha, podrían ser poco eficientes, lo que ha generado que la ciudad de Curicó se convierta en una de la ciudades más contaminadas por material particulado del país [16].

La implementación de nuevas centrales de monitoreo de calidad del aire es muchas veces inviable debido a su alto costo de implementación y mantención, y no necesariamente cumplen con las nuevas necesidades para el monitoreo de parámetros de mayor toxicidad presentado en estudios recientes[11–13].

² Estación de calidad de aire en la ciudad de Curicó. <http://airechile.mma.gob.cl/comunas/curico>

1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA

El presente trabajo pretende desarrollar una solución de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Curicó a través del desarrollo de dispositivos de carácter móvil y fijos de medición continua que, mediante tecnología de internet de las cosas (IoT: “*Internet of Things*”) pueda enviar, actualizar y almacenar datos en la red para su posterior análisis y publicación en tiempo real.

La disponibilidad de estos datos permitirá la geolocalización y hora de monitoreo, para establecer curvas de comportamiento en posibles estudios que puedan usarlos como referentes. El desarrollo de los dispositivos será en base al uso de microsensores y microcontroladores del tipo System On Chip (SOC) el cual posee la característica de funcionalidad Wifi incorporado, lo que facilita y asegura la conexión, reduciendo posibles fallas de comunicación y subida de datos de calidad de aire a la nube.

Dadas las condiciones y prestaciones que ofrecen los microsensores de bajo costo, se espera trabajar con un margen de error como indica la literatura, el que se verá compensado con la cantidad de datos aportados a la base de datos en relación a las fuentes de información oficiales actualmente propuestas por el Ministerio del Medio Ambiente de Chile y notificado en el presente documento bajo condiciones de correlación estadística.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un microdispositivo inteligente que permitan medir compuestos orgánicos volátiles totales (TCOV's) y benceno, así como también material particulado PM_{2.5} para el monitoreo de calidad de aire en el sector residencial de la ciudad de Curicó.

1.4.2. Objetivos específicos

- Investigar acerca de la problemática de los gases (TCOV's y Benceno) y material particulado (PM_{2.5}) en la comuna de Curicó.
- Calibrar microsensores para la detección y medición de gases y material particulado en condiciones controladas.
- Desarrollar y fabricar microdispositivo para el monitoreo de calidad de aire.
- Medir los gases y material particulado a través del microdispositivo en condiciones reales de operación.
- Calibrar los microdispositivos en base a los resultados obtenidos.
- Validar la confiabilidad de los dispositivos fabricados.

1.5. RESULTADOS ESPERADOS

- Diseño y fabricación de un microdispositivo de monitoreo de calidad de aire (PM_{2.5}, COV's, Benceno).
- Implementación de un sistema de almacenamiento de datos en nube virtual.
- Establecer rutas de monitoreo en la ciudad de Curicó con el propósito de abarcar un área de interés representativa de la condición actual de la calidad de aire.

1.6. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para este trabajo contempla una serie de pasos y etapas para la realización de este, las que se indicaran y detallan a continuación.

1.6.1. Investigación de tecnología disponible.

Dentro del proceso de investigación de la tecnología disponible en el mercado local a la hora de desarrollar esta propuesta se contempla:

Capítulo 1. Introducción

- Realizar una investigación sobre los componentes existentes en el mercado actual que estén relacionados con la aplicación requerida.
- Comparación de microcontroladores con funciones de conexión WiFi incluidas, formas de programación para microcontroladores y protocolos de comunicaciones mediante señales analógicas y digitales.
- Tipos de sensores para la detección de gases y material particulado, así como rango de funcionamiento, requerimientos técnicos y rangos de valores entregados, protocolos de comunicación, restricciones de uso y confiabilidad.
- Revisión bibliográfica con el propósito de conocer la evidencia internacional en cuanto al uso de microdispositivos, sus ventajas, desventajas y mejoras que a través de este proyecto se puedan conocer.

1.6.2. Pruebas y selección de componentes.

Los componentes seleccionados se basarán en la disponibilidad de estos en el mercado actual y comparación de funcionamiento entre componentes similares con principios de funcionamiento como lo son el “*Laser Scattering*”, “*Electrochemical gas sensor*” y MOS (del inglés “*metal oxide semiconductors*”)[17]. Estos componentes serán sometidos a funcionamiento individual en condiciones interiores y exteriores (*indoor* y *outdoor*), así como en conjunto ante las mismas condiciones contemplando un funcionamiento continuo de 24 horas. Esto para establecer funcionalidad mientras son transportados y sometidos a cambios de humedad y temperatura además de formas de comunicación con los microcontroladores y estabilidad en la conexión WiFi.

1.6.3. Diseño y fabricación de dispositivos.

- Se desarrollará el diseño del dispositivo para cumplir con las condiciones de flujo en ambientes *indoor* y *outdoor* manteniendo una dirección de flujo continuo de aire

procurando respetar la normativa vigente propuesta por el estado chileno para monitoreo de la calidad del aire [12,15,16]

- Se dispondrán los espacios de manera que el diseño sea lo más compacto posible, respetando la dirección de flujo de muestra manteniendo además la modularidad del sistema para la revisión, mantención y cambios de componentes según requiera la vida útil que propone cada fabricante.
- La circuitería será diseñada a través de herramientas de diseño CAD con la finalidad de obtener un plano eléctrico del dispositivo.
- La fabricación de los dispositivos será apoyada con impresión 3D y métodos de mecanizado CNC disponibles en las instalaciones de la Universidad de Talca.

1.6.4. Validación de datos obtenidos.

- Los dispositivos fabricados serán, en una primera instancia, validados con instrumentos de medición industriales disponibles en la universidad tales como Dustrack II, multiRAE, cromatógrafos. Esto en condiciones controladas dentro de los laboratorios de la universidad
- Se ajustarán curvas y programación de señales obtenidas desde los sensores.
- Se realizará un monitoreo comparativo entre el dispositivo desarrollado y la estación oficial, recopilando los datos obtenidos para expresar la confiabilidad de este.

1.6.5. Rutas y puntos de monitoreo.

Se pretende fabricar un total de 10 nodos de monitoreo, los cuales serán dispuestos en diversos puntos clave de la ciudad de Curicó. De estos nodos se implementarán 2 dispositivos móviles que serán repartidos a colaboradores de la Universidad de Talca para monitorear rutas específicas dentro de la ciudad a diversas horas del día y 8 estaciones fijas en diversas zonas residenciales de la ciudad para un monitoreo continuo de 24 horas del día.

Capítulo 1. Introducción

La finalidad de esto será mantener monitoreada la mayor área de la ciudad, con el fin de mantener informada a la población de la ciudad sobre la calidad del aire para que estos puedan tomar medidas de prevención.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. CONTAMINACION DEL AIRE E IMPACTO EN LA SALUD

En los últimos años el crecimiento de los sectores urbanos como resultado de un progreso colectivo en países de alto, medio y bajos ingresos ha generado oportunidades a la población a acceder a un estilo de vida con mayores oportunidades de trabajo, transporte, atención médica especializada, educación, entre otros. No obstante, el crecimiento de estos sectores trae consigo un riesgo a considerar dentro del marco sanitario y medioambiental [19].

El aumento sostenido de contaminantes enviados al ambiente producto de la urbanización no planificada, regidos por el transporte, emisiones por calefacción e industrialización generada en zonas pobladas, siendo además, poco regularizadas, ha incidido considerablemente en la salud de las personas [1].

La concentración de contaminantes presentes en un ambiente urbano ha aumentado considerablemente, lo que tiene relación directa con el aumento de complicaciones en la salud humana y consultas médicas. A la luz de estos resultados, se ha comprobado que los niveles de contaminación del aire presentan relación directa con enfermedades respiratorias, cardiovasculares, daños degenerativos a diversos órganos, irritación en piel y vías respiratorias, tos, asma y agravación del asma, disminución del transporte de oxígeno y diversos tipos de cáncer, esencialmente cáncer pulmonar [2,3, 5–8, 10–13,18–23].

Los estudios demuestran además que dependiendo del origen de los contaminantes y su composición, estos tienen diversas respuestas biológicas, lo que fomenta y determina la necesidad de aumentar en número de estudios relacionados con la composición del material particulado en las zonas urbanas, dando un mayor entendimiento de los potenciales riesgos de diversas fuentes de emisión de contaminantes [25].

Recientemente la Agencia Internacional de Investigación sobre el cáncer (IARC) ha clasificado a diversos contaminantes presentes en el aire en distintos grupos, dependiendo de la evidencia científica y su posibilidad de producir cáncer en la población humana durante periodos de exposición continua a estos agentes. La clasificación es: Grupo 1: agentes carcinógenos para humanos, Grupo 2A: agente probablemente carcinógeno para humanos, Grupo 2B: agente posiblemente carcinógeno para humanos, Grupo 3: agente no carcinógeno para humanos, Grupo 4: agente es probablemente no carcinógeno para humanos [3].

Capítulo 2. Marco teórico

La tabla 2-1 exhibe los mayores contaminantes monitoreados por las agencias de salud y que presenta una evidencia de cómo influyen en la salud de las personas, junto con sus principales fuentes de emisión, como lo son el dióxido de sulfuros, material particulado, compuestos orgánicos volátiles, entre otros. Esto propone un claro ejemplo de lo dañinos que pueden llegar a ser y las complicaciones que puede traer consigo una exposición prolongada a estos elementos.

Tabla 2-1: Mayores contaminantes, fuentes de procedencia y peligro a la salud humana

Contaminante	Simbología	Mayor fuente de emisión	Toxicidad
Ozono	O_3	Generado desde reacciones de NO_x , COV's y procesos naturales.	Asmas en niños y adultos mayores, dificultades respiratorias, inflamación e irritación de las vías aéreas, enfermedades pulmonares obstructivas crónicas.
Dióxido de sulfuro	SO_2	Quema de combustibles fósiles, fuentes naturales (volcanes), procesos industriales.	Daña el sistema respiratorio y dificulta la respiración en personas con asma, penetra en los pulmones produciendo obstrucciones.
Monóxido de carbono	CO	Quema de combustibles fósiles (automóviles), emisiones de COV's	Posiblemente carcinógeno, reduce el transporte de oxígeno a diversos órganos, mareos, confusión y desmayos en altas concentraciones, anigma en personas con capacidad cardiaca reducida.
Compuestos orgánicos volátiles	VOC	Combustión incompleta, emisiones de procesos químicos y uso de solventes.	Cáncer, irritación en ojos y vías aéreas, náuseas, reacciones alérgicas en la piel [3].
Mercurio	Hg	Combustión de carbón mineral, refinación de minerales, de forma natural.	Temblores y atrofia muscular, insomnio, dolores de cabeza, déficit de funciones cognitivas, problemas renales y pulmonares [26].
Plomo	Pb	Procesos industriales con plomo y quema de combustibles con plomo.	Afecta al sistema nervioso, funciones renales, sistema inmune, reproducción, transporte de oxígeno, desarrollo del sistema cardiovascular [4].
Material particulado	$PM_{2.5}$ y PM_{10}	Tormentas de polvo, quemadas de combustibles fósiles o biomasas, uso de fertilizantes, entre otros.	Muerte prematura en personas con enfermedades cardiacas o pulmonares, arritmias, agravar el asma, disminución de función pulmonar, irritación en vías aéreas y tos.
Óxidos de nitrógeno	NO_x	Procesos de combustión en general y en algunos procesos industriales.	Irritación en las vías aéreas, producir asma, provocar tos, silbidos y dificultad para respirar, aumenta la susceptibilidad de infecciones respiratorias.

Nota: La tabla ha sido completada por información recolectada desde la Agencia Internacional de Investigación sobre el cáncer (AIRC) y el apartado de contaminantes críticos presentes en el aire, publicado por la Agencia de Protección Medioambiental (EPA): <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants>

La tabla 2.1 exhibe los mayores contaminantes monitoreados por las agencias de salud y que presenta una evidencia de cómo influyen en la salud de las personas, junto con sus principales fuentes de emisión. Esto propone un claro ejemplo de lo dañinos que pueden llegar a ser y las complicaciones que puede traer consigo una exposición prolongada a estos elementos.

Organismos como la IARC y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) han incurrido en constantes estudios para determinar una clasificación adecuada de cada contaminante ya mencionados, estableciendo registros y clasificaciones de toxicidad como la EPA, la clasificación por grupos ya mencionada implementada por la IARC e incluso organismo como el instituto nacional para la seguridad y salud ocupacional (NIOSH) ha implementado un registro de efectos tóxicos de sustancias químicas (RTECS).

2.2. NORMATIVA PARA LA MEDICIÓN DE CALIDAD DE AIRE

En la actualidad Chile cuenta con variados instrumentos para la gestión y el cuidado del medio ambiente a través de sus políticas públicas, entre las cuales se pueden comentar: El sistema de información nacional de calidad del aire y red de monitoreo (SINCA)³ y el plan de prevención y descontaminación atmosférica (PPDA)⁴.

Chile se rige mediante la Ley N°19.300 promulgada el 1 de marzo del 1994 y publicada en el Diario Oficial el 9 de marzo del 1994, la cual fue modificada por la Ley N°20.417 en el 2010. Esta se encarga de las problemáticas relacionadas con el medio ambiente y la calidad del aire a la cual estamos expuestos todos los chilenos⁵ [27].

Dentro de los parámetros contenidos a tratar en el artículo N°2 de la Ley en comento, se define normativas primarias y secundarias para la calidad del aire dentro de las que es necesario mencionar entre las normativas primarias:

³ Sistema de información nacional de la calidad del aire en Chile: <https://sinca.mma.gob.cl/>

⁴ Planes administrados y diseñados por el ministerio del medio ambiente de Chile: <https://ppda.mma.gob.cl/>

⁵ Documento recuperado en la página de la red SINCA: <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/documentos>

Capítulo 2. Marco teórico

- Normativa para PM_{2.5} (D.S. N°12/2010 Ministerio del Medio Ambiente) [27,28]
- Normativa para PM₁₀ (D.S. N°45/2001 Ministerio y Secretaria General de la Presidencia) [27,29].
- Normativa para SO₂ (D.S. N°104/2018 Ministerio del Medio Ambiente) [27,30].
- Normativa para NO₂ (D.S. N°114/2002 Ministerio y Secretaria General de la Presidencia) [27,31].
- Normativa para CO (D.S. N°115/2002 Ministerio y Secretaria General de la Presidencia) [27,32].
- Normativa para Pb (D.S. N°136/2000 Ministerio y Secretaria General de la Presidencia) [27,33].
- Normativa para O₃ (D.S. N°112/2002 Ministerio y Secretaria General de la Presidencia) [27,34].

2.3. MÉTODOS DE DETECCIÓN DE GASES Y MATERIAL PARTICULADO

El avance tecnológico referente a materiales y propiedades de estos ha abierto la puerta a nuevas técnicas de medición produciendo respuestas específicas a estímulos variados.

La oportunidad de conocer la composición de las partículas que componen una muestra determinada en espacios cada vez más reducidos y con respuestas mucho más rápidas, ha despertado el interés general de la comunidad y dado pie para enfocar esfuerzos en esta área.

A medida que pasan los años y la tecnología avanza, aumenta la necesidad de que estos dispositivos, capaces de medir un rango de concentraciones amplio en compuestos de interés, sean de tamaños cada vez más pequeños, con protocolos de comunicación estables, confiables, ligeros, de bajo consumo y de producción masiva y de bajo costo.

A continuación, se presentan una serie de métodos de medición centrados en la detección de compuestos gaseoso y tamaños de partículas, de diversas fuentes, composiciones y rangos valores admisibles.

2.3.1. Método MOS (*Metal Oxide Semiconductor*)

El método MOS consiste principalmente en un calentador y un elemento activo sensible, generalmente óxido de aluminio u óxido de estaño. Este mecanismo funciona a través de quimio-absorción de oxígeno en la superficie de la placa, lo que tapa los agujeros de la banda de conducción del material, que al crear una capa límite de agotamiento (Barrera de Schottky) altera la conductancia del dispositivo. Si un elemento reactivo reacciona a esta superficie a través de los electrones libres o agujeros producidos en el semiconductor por la ionización del oxígeno, se produce una cobertura en la capa de agotamiento lo que produce un diferencial de conductividad eléctrica medible en el dispositivo.

Los dispositivos MOS a menudo son de bajo costo por su composición y el monitoreo de la resistencia no es lineal con la concentración del gas estudiado, pero mantienen un consumo bajo y son realmente compactos [17].

La figura 2-1, presente a continuación, demuestra gráficamente la forma en la que operan los dispositivos MOS y como se hace posible una medición para un compuesto de interés.

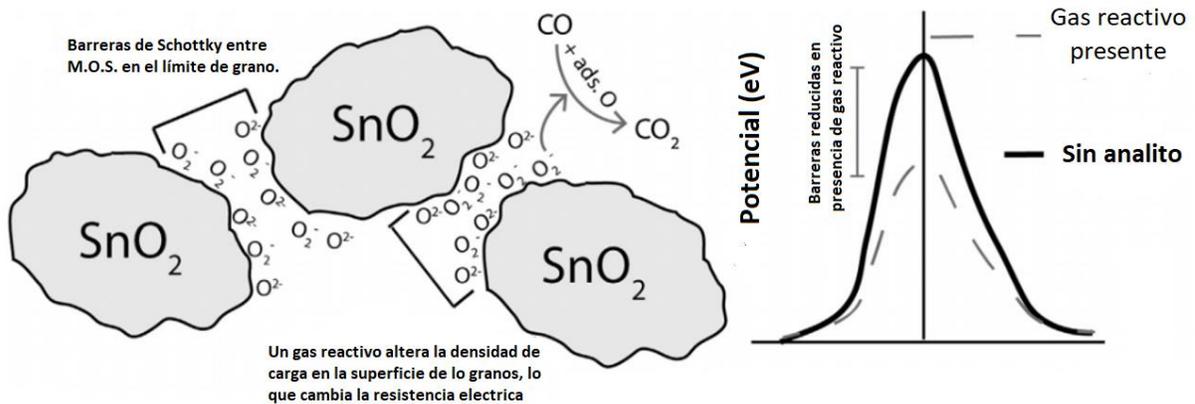


Figura 2-1: Representación del mecanismo MOS y el efecto eléctrico para la conductancia.

Fuente: J.E. Thomson [17]

Uno de los mayores inconvenientes de este tipo de tecnología es la limitación que tienen al trabajar en un rango útil de 20 a 100 ppb (partículas por billón) en donde el error porcentual podría ser sobre el 20% para una medición de múltiples puntos con representación de valores promedios. Esto para los estudios realizados en la detección de concentraciones de ozono [17].

2.3.2. Método electromecánico para detección de gas

Los sensores electromecánicos de gases funcionan de forma similar a la de un amperímetro, en donde a través de un potencial fijo se aplica trabajo a un electrodo. A través de una reacción REDOX, entre el gas que se desea medir y el electrodo se produce una corriente medible, la cual es proporcional a la concentración del compuesto [17].

Normalmente los gases atmosféricos se miden a través de la difusión de pequeños capilares y una capa hidrofóbica permeable antes de alcanzar el electrodo, esto con el fin de que el gas penetre el electrolito requerido en el sensor, pero este no escape de la cámara de medición. Por lo general se agrega una porción de oxígeno que ayude en la reacción del gas con el electrodo en la cámara de medición.

Estos se caracterizan por su límite de detección en bajas concentraciones, funcionando adecuadamente en rango de presión que van desde los 80 a los 120 kPa y que dependen de la temperatura de operación en el rango de error en la medición, teniendo un aproximado de un 1% de error por un cambio de 1°C de temperatura [17].

La figura 2-2 representa el funcionamiento de un sensor electromecánico convencional y sus principales componentes.

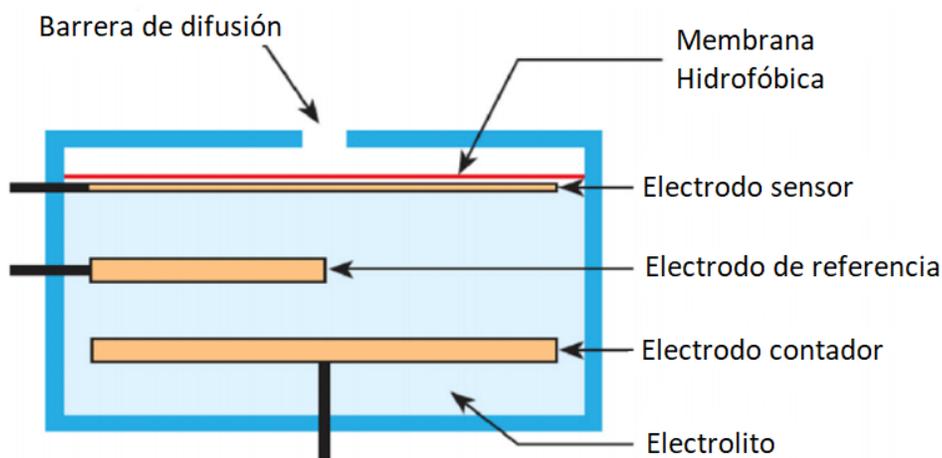


Figura 2-2: Principio de funcionamiento para un dispositivo electromecánico de gas tipo amperímetro. Fuente: J.E. Thomson [17]

2.3.3. Método NDIR (*Non-Dispersive InfraRed*)

El método de detección por dispersión infrarroja consiste principalmente de una fuente de luz, una cámara de gas, un filtro de óptico y un detector. Debido a que muchos gases reaccionan a la radiación infrarroja, este método es especialmente útil si se desean detectar compuestos como monóxido de carbono (CO), óxidos nitrosos (NO_x), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno fluorhídrico (HF), metano (CH₄), entre otros.

El funcionamiento de este método de medición radica en que la radiación al atravesar la muestra de gas, pasando por el filtro adecuadamente diseñado previamente cambia su frecuencia específica, debido a la absorción de energía desde el gas. Se consideran, además, parámetros como la sección transversal, la longitud de recorrido de la radiación y la absorción de la concentración característica del gas. Esto hace que el detector identifique a través de estos parámetros la concentración dentro de la cámara y el posible gas que se encuentra para ser analizado.

La tecnología actual ha demostrado que los límites de concentración medibles oscilan entre un 0,1-10 ppm (partículas por millón) y presentan inestabilidad debido a la susceptibilidad de interferencia de diversos gases atmosféricos en las mediciones, lo que convierte a esta opción poco recomendable para el monitoreo de contaminantes atmosféricos [17].

La figura 2-3 describe la trayectoria del flujo de gas y los componentes implicados para la detección a través radiación infrarroja en un espacio establecido para su análisis.

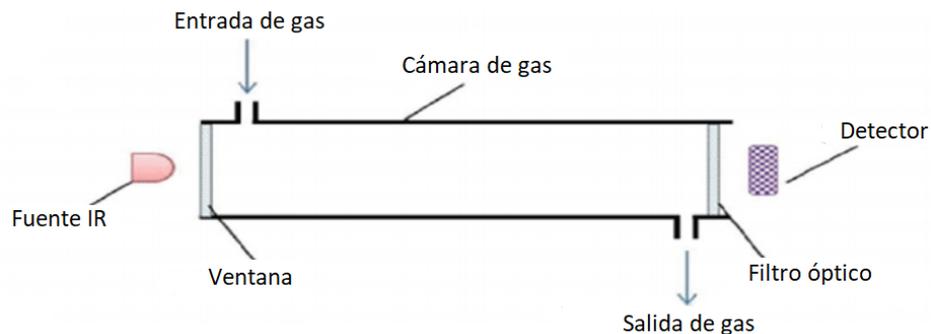


Figura 2-3: Descripción de un dispositivo típico NIRD. Fuente: J.E. Thomson [17]

2.3.4. Método Pellistors

Un pellistor es un dispositivo sensible a gases inflamables el cual consiste principalmente en dos pequeñas “lentejas” cerámicas. Las “lentejas” son calentadas eléctricamente al punto que la “lenteja” que posee el catalizador promueve la combustión, mientras que la lenteja restante se utiliza para mantener una medición referencial. Cuando la lenteja que posee el catalizado se quema, se produce un diferencial de temperatura que provoca diferencia en la resistencia eléctrica. Esta señal producida por el cambio de temperatura es amplificada mediante un puente de Wheatstone [17].

Este tipo de dispositivos se usan a menudo para la detección de gases inflamables en ambientes industriales como medida de seguridad, pero su sensibilidad los hace inviables para la detección de gases atmosféricos. Otro punto destacable, es que las cerámicas pueden ser contaminadas con diversos gases que contengan sulfuros, haluros y siliconas. Además, en ambientes húmedos, estos no son capaces de reaccionar adecuadamente [17].

La figura 2-4 demuestra gráficamente el principio de operación y los componentes necesarios para la detección de gas por medio del método pellistor

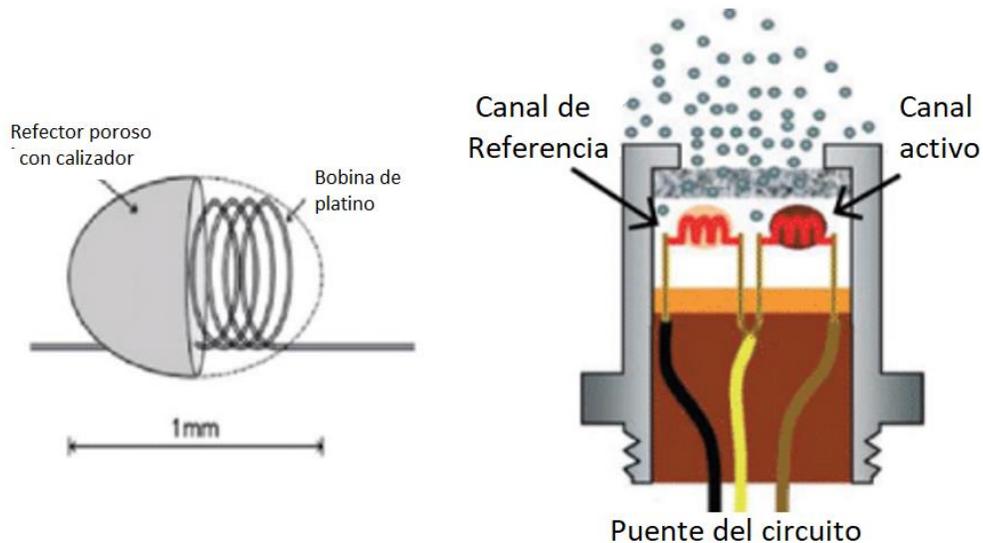


Figura 2-4: Elementos principales de un sistema pellistor. Fuente: J.E. Thomson [17]

2.3.5. Método PID (*Photo-Ionization Detector*)

El método de fotoionización se basa en la utilización de radiación ultravioleta de alta energía, la cual, al ser dirigida a una muestra de gas, ioniza todas las moléculas que posean un nivel de energía de ionización mejor que la energía administrada. Luego de la ionización los electrones que llegan al colector producen una corriente eléctrica medible, la que es proporcional a la velocidad de ionización y a concentración de compuesto a analizar.

Los tipos de sensores que utilizan esta tecnología suelen usar lámparas de criptón (energía entre los 10 - 10,6 eV), argón (11,7 eV) y xenón (8,4 – 9,6 eV).

Un punto por considerar es que los detectores del tipo PID no identifican los compuestos que están midiendo, ionizan a todos los compuestos que estén bajo la energía emitida por la lámpara, lo que hace necesario contar con otro tipo de tecnologías que identifiquen a los compuestos detectados por el sensor. Pero los tiempos de respuesta de estos son bastante bajos y los límites de detección rondan los 1ppb (partículas por billón) [17].

La figura 2-5 presenta el principio de detección por medio de fotoionización de los compuestos presentes en una muestra de gas.

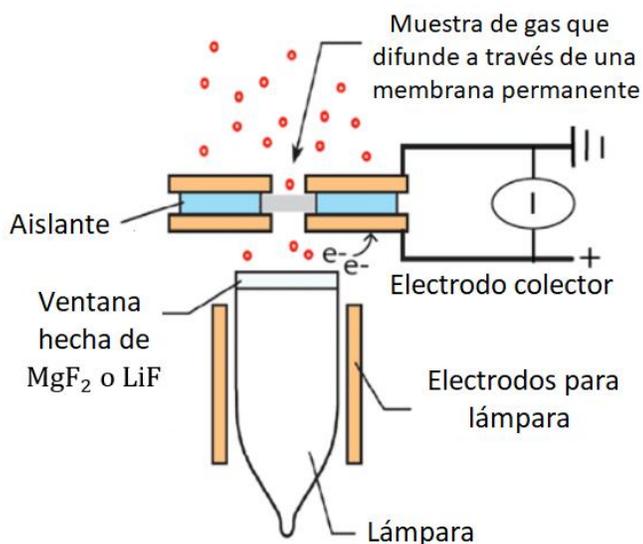


Figura 2-5: Componentes y principio de funcionamiento de un sensor PID. Fuente: J.E.

Thomson [17]

2.3.6. Método *Laser-Scattering*

Este método de detección es ampliamente utilizado para la detección de partículas mediante la interacción de la luz con ella, en donde la refracción, reflexión y absorción dan como resultados patrones de dispersión característicos del tamaño de la partícula.

La longitud de onda tiene un rol importante dentro este tipo de métodos de detección, ya que, si el tamaño de la partícula es igual o menor al de la longitud de onda de la luz utilizada, esta es dispersada en ángulos cada vez más grandes. La teoría de dispersión de Mie se basa en la detección de los distintos ángulos de refracción, difracción y absorción para, a través de algoritmos, determinan el tamaño de partículas y concentración de las partículas de interés por medio de detectores dispuestos en los dispositivos.

La configuración básica para los dispositivos que usan este tipo de tecnología contemplan además la disposición de un lente de Fourier, el que es ubicado con gran precisión dependiendo del tamaño de partículas el cual se desea medir, ya que esto incide en el ángulo de incidencia de la dispersión de la luz [35].

La figura 2-6 presente a continuación describe el proceso para la detección de material particulado por medio del método *laser Scattering*.

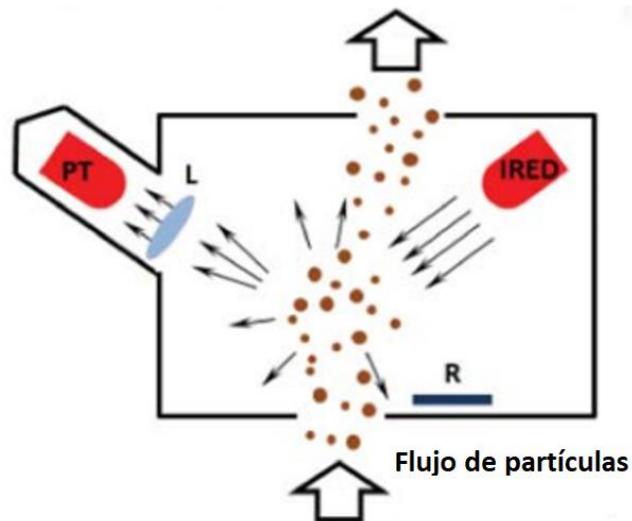


Figura 2-6: Principio de medición *Laser-Scattering*. Dispositivo DSM501A. Fuente: Y. Wang, J. Li, H. Jing, Q. Zhang, J. Jiang, P. Biswas [36]

2.4. PROGRAMACIÓN

La programación en los últimos años ha jugado un papel vital en el desarrollo de nuevas tecnologías, pues permite realizar tareas complejas de forma rápida y con un margen de error mínimo.

La programación se ha posicionado fuertemente en las tareas de automatización de equipos y procesos industriales. Donde nace el término programación orientada a objetos (OOP), la que tiene como finalidad principal evitar el caos en los códigos de programación, dando funciones y parámetros que se asemejan a las órdenes y estímulos que podría experimentar un objeto [37].

La programación orientada a objetos se puede clasificar dentro de dos tipos principales:

- Basados en clases: Declaraciones de estructuras moldes con especificaciones de parámetros y metodologías para el procesamiento y salida de datos.
- Basados en prototipos: Estos usan el principio de clonación de objetos para la definición y utilización de parámetros reales, los que se suelen utilizar como plantillas para crear prototipos de objetos reales.

Dentro de la OOP se puede nombrar lenguajes de programación como: C++, Java, ADA, Objective C, Ruby, Arduino, entre otras.

2.5. SISTEMAS IOT

Los sistemas IoT (del inglés “*Internet of Things*”) hacen referencia a la interconexión de dispositivos o equipos a través de una red, abiertas o privadas, donde interactúan entre sí entregando, recibiendo o procesando información. Esto ha revolucionado en gran medida situaciones tanto cotidianas como industriales con el desarrollo de la domótica⁶ y la posibilidad de aplicarlo al control de procesos complejos y monitoreo de estos mismos en forma remota.

Uno de los protocolos de comunicación que ha ganado relevancia en los últimos tiempos es el MQTT (MQ *telemetry transport*), el cual consiste en una comunicación M2M (*machine to machine*) que se mantiene abierta y se reutiliza en cada instancia de comunicación.

⁶ Se define domótica como la automatización de viviendas o algún tipo edificaciones en bienestar, seguridad y ahorro energético.

Dicho sistema de comunicación se basa en el formato publicador/suscriptor (pub-sub) y cada mensaje es codificados bajo un tópico que lo guía hacia el receptor indicado, llamado comúnmente “*broken*”.

Este tipo de protocolo de comunicación se basa en su ligereza, estabilidad, acoplamiento y desacoplamiento de clientes. Lo que lo presenta como un candidato ideal al momento de trabajar con dispositivos de baja potencia.

2.6. OBTENCIÓN Y PREPROCESAMIENTO DE DATOS

Los datos obtenidos por los sensores encargados de monitorear cada uno de los parámetros de interés en este proyecto serán tomados cada 3 segundos. Estos se someterán a un preprocesamiento con el fin de reducir el error y mejorar la representatividad antes de ser enviados a la nube y sistema de almacenamiento en la red.

El preprocesamiento constará de descartar datos que no se encuentre dentro del rango de mediciones anteriores y posteriores, además de almacenar una cantidad considerable de datos con el fin de, a través de métodos estadísticos, definir valor representativo para la medición realizadas durante un periodo de tiempo predeterminado.

Los datos subidos a la nube contarán con parámetros necesarios para usarse como referentes para estudios estadísticos, modelos predictivos y modelos de simulación de comportamiento. Siendo estos la hora y fechas de subida del valor además de la geolocalización de cada una de las mediciones.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA

3.1. SOLUCIÓN

3.1.1. Apartados generales

Considerando la investigación implicada en la elaboración del presente proyecto, la solución propuesta se centra en el diseño y fabricación de dispositivos de monitoreo continuo y en tiempo real de parámetros como: PM, COV's y benceno. Esto para determinar la calidad del aire de las zonas residenciales de la ciudad de Curicó.

La búsqueda de colaboradores que apoyen la realización y operación del proyecto deberán ser informados de los servicios básicos para el funcionamiento, por lo que, se les dará a conocer de antemano los consumos eléctricos, consumo de internet y posibles mantenimientos o consideraciones diarias para los equipos, situación que puede representar una restricción para el proyecto.

La tabla 3-1 establece las restricciones y consideraciones para la selección de colaboradores y la correcta operación de los dispositivos fabricados.

Tabla 3-1: Servicios básicos de operación

Servicios básicos para operar	Restricción fundamental	Consideración media
Electricidad	NO	SI
Internet (Wifi)	SI	NO
Espacio alejado de una fuente de contaminación inmediata	SI	NO

3.1.2. Alcances y restricciones

Una de las principales restricciones que podría alcanzar al proyecto es la disposición de los posibles colaboradores ante los consumos básicos necesarios para el correcto funcionamiento de los dispositivos desplegados en las zonas residenciales de la ciudad de Curicó.

Otro punto por considerar es la Legislación Nacional vigente que rige a las estaciones de monitoreo de contaminantes ambientales, las que deben ser adoptadas para el diseño y desarrollo

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

del dispositivo planteado como solución. Siendo un punto de referencia válido para esto, la red SINCA, refiriéndose al manejo y publicación de datos.

La tabla 3-2 presentada a continuación indica las principales consideraciones para el desarrollo del dispositivo, indicando los alcances que cumple y cuales no contempla su fabricación.

Tabla 3-2: Restricciones y alcances del dispositivo

Legislación nacional vigente	Parámetro de interés	Alcance del dispositivo
Decreto 61 para estaciones de medición de contaminantes atmosféricos [38]	Calibración y margen de error tolerable inferior al 10%	NO
	Monitoreo de elementos contaminantes de interés sanitario	SI
	Obtención y publicación de datos crudos	SI
	Expresar el porcentaje de error presente en la medición	
	Formato de fecha y hora	SI
	Soportar condiciones climáticas	
	Datos oficiales	NO
	Chequeo de transmisión de datos y funcionamiento general 1 vez al año	SI
	Almacenamiento en medios magnéticos	NO
	Ubicación geográfica	SI
	Datos de promedios en horas y en días	
	Validación de datos por un experto y/o personal calificado	NO
	Uso de materiales no reactivos con las muestras de contaminantes	SI
	Tiempos de residencia de muestra no mayor a 20 segundos	SI
Registro de parámetros operacionales	SI	
Libro foliado de registros	SI	
Decreto 12 Establece norma primaria de calidad ambiental para PM [28]	Establece límites para para la concentración de material particulado fino 2,5	SI

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Decreto 115 Establece norma Establece límites para la concentración de monóxido de SI
primaria de calidad de aire para carbono presente en el ambiente
CO [32]

Resolución EXENTA 106	Localización en áreas urbanas	SI
Establece criterios de emplazamiento para estación de monitoreo de PM fino [39]	Exposición a la atmosfera con cielo despejado	NO
	Distancia a fuente emisoras	NO

3.1.3. Conectividad y comunicación

Una de las restricciones de mayor calibre para el éxito de los dispositivos es la dependencia de una conexión estable a la internet de forma inalámbrica. Esto se ve altamente influenciado por diversos factores, los cuales deben ser considerados a la hora de seleccionar a los colaboradores de este proyecto, ya que, se deben considerar las caídas del servicio espontáneas, la morosidad en los pagos de estos servicios o factores climáticos que afecten la comunicación y conectividad de los dispositivos a la red.

3.2. DISPOSITIVO

3.2.1. Selección de componentes

La arquitectura propuesta como solución en este documento pretende abordar un dispositivo liviano, de bajo costo, de fácil mantención y rápido despliegue urbano, procurando una comunicación IoT para el monitoreo en tiempo real y de forma continua de muestras de aire.

A través de una evaluación basada en la investigación realizada y disponibilidad de componentes en el mercado local y nacional se opta por sistemas basados en el entorno de desarrollo que ofrece Arduino para la programación dirigida a objetos.

De esta manera la tabla 3-3, a continuación, presenta los componentes usados para la fabricación del dispositivo de monitoreo de calidad de aire.

Tabla 3-3: Componentes principales para dispositivo de medición

Componente	Función principal	Descripción
Módulo ESP32	Microcontrolador con Wifi incluido	Anexo 1
DSM501A	Sensor de material particulado	Anexo 2
CJMCU-811	Sensor de COV's	Anexo 3
MQ 3	Sensor alcoholes-benceno	Anexo 4
NEO-6M V2	Módulo GPS	Anexo 5
Batería ion litio	Alimentación	Alimentación 5V - 2600mAH
Ventilador 40X40X10	Ventilación de las muestras de aire	Ventilador 5V DC 50W
TP4056	Módulo controlador de carga	Controlador 5V a 1A, entrada micro USB

3.2.2. Fabricación

El dispositivo de monitoreo de calidad de aire consta de un sensor de polvo para la medición de material particulado DSM501a el cual sigue los principios de *light Scattering*, un sensor MOX CJMCU-811 para la detección de COV's y eCO₂ (dióxido de carbono equivalente), y un sensor electroquímico MQ-3 para la caracterización de benceno. Estos componentes son controlados y coordinados a través de un microcontrolador ESP32, manteniendo las funciones de ventilación adecuada para el manejo de muestras de aire con un ventilador de 40x40x10 mm.

La distribución de los componentes está asociada a las condiciones de modularidad del dispositivo y conexiones rápidas para cada componente. Además, se mantiene el volumen total del dispositivo al mínimo posible.

El conexionado de los componentes se realizó a través del cableado de terminales de conexión rápida hacia los pines del microcontrolador ESP32. Además, la alimentación del dispositivo se realizó por medio del sistema micro USB directo al microcontrolador desde el módulo de control de carga conectado al sistema de almacenamiento de energía (Batería recargable).

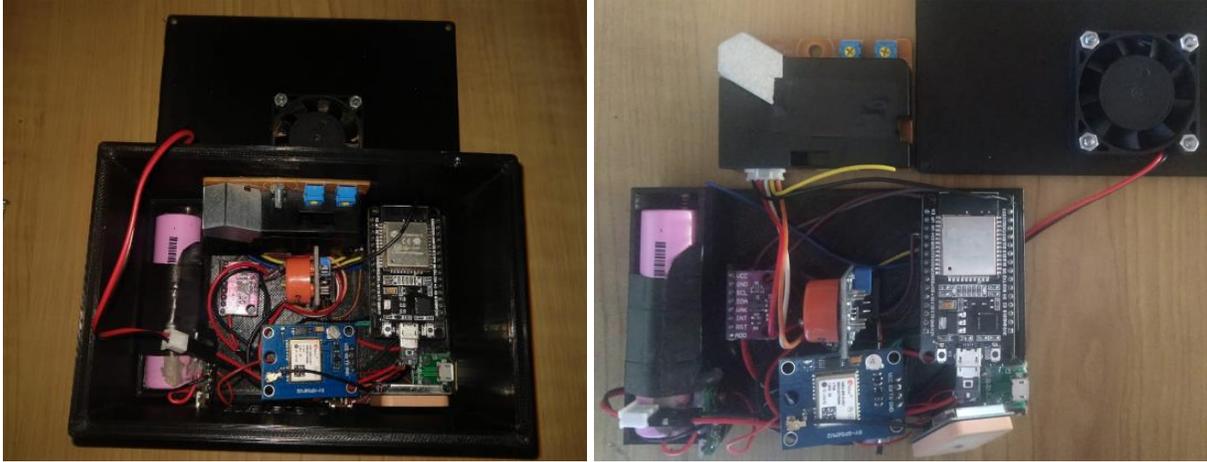


Figura 3-1: Montaje de componentes seleccionados. Fuente: Elaboración propia

La figura 3-1 exhibe las conexiones de los componentes seleccionados dentro del dispositivo de medición de calidad de aire. Todos estos montados en una estructura diseñada y fabricada en impresión 3D con filamento PLA.

3.2.3. Manejo de muestras y envío de datos

Para un correcto manejo de las muestras de aire atmosférico se debe considerar lo propuesto en el Decreto 61 para estaciones de medición de contaminantes [38], este indica como principales factores para el manejo de una buena calidad en las muestras: mantener un cambio constante en el aire que ingresa a la cámara de mediciones, que los componentes al interior de la cámara de medición deben ser tales que no reaccionen con la muestra y no alteren la composición de esta y se debe mantener registro de los datos crudos de las mediciones logradas y las condiciones de operación deben mantenerse lo más estables posibles, sin alterar de ninguna manera los registros obtenidos.

La comunicación y subida de datos obtenidos se realiza a través de un protocolo de comunicación MQTT por medio del dispositivo ESP32, el cual mantiene una conexión estable a la red WiFi. Estos datos serán subidos a la nube por medio de la versión gratuita que ofrece la

compañía Cayenne⁷ para desarrolladores de dispositivos IoT, la que facilita a sus usuarios el desarrollo de dispositivos de prueba manteniendo restricciones para la publicación de datos.

3.2.4. Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas del dispositivo se muestran a continuación en la tabla 3-4 manteniendo los parámetros principales de interés y operación.

Tabla 3-4: Especificaciones técnicas generales del dispositivo

Categorías	Condiciones	Unidad de medida
Tensión de alimentación	5.0 – 5.1	V
Consumo	600 - 1030	mAh
Temperatura de operación	2 - 50	°C
Humedad de operación	>95%	RH
Wi-Fi	Modo Wifi	Station/softAP/P2P
	Frecuencia	2.1 - 2.4
Precisión GPS	2 - 2.5	m
PM _{2.5}	0 - 5	mg / m ³
COV's	0 - 50	ppm
eCO ₂	400 - 2000	ppm
Benceno	(-)	mg / m ³
Flujo de aire	4.5 - 5	L/min
Dimensiones	133 x 89 x 71	mm
Peso	250	gr

De manera que se pueden establecer las condiciones mínimas de operación y alcances que se pueden esperar del dispositivo presentado en este trabajo.

⁷ Sitio de desarrollo: <https://developers.mydevices.com/cayenne/features/>

3.3. VALIDACIÓN DE LA PROPUESTA

La validación del equipo se realizó en dos etapas para determinar los parámetros de funcionamiento continuo, envío de datos a la nube, conectividad, margen de confiabilidad y ajustes en el diseño y programación final para cada uno de los sensores implicados.

La primera etapa corresponde a los ajustes de programación y manejo de señales para la medición en cada uno de los sensores implicados al dispositivo, los parámetros de autonomía y estabilidad de funcionamiento continuo.

La segunda etapa refiere al funcionamiento en condiciones reales de operación, estabilidad en la comunicación MQTT e influencia de las condiciones medioambientales sobre los componentes del dispositivo.

3.3.1. Etapa inicial

Teniendo la estructura del dispositivo ya completa, se procedió al manejo de los datos obtenidos por medio de las señales de cada uno de los sensores implicados al dispositivo. Luego de comprender las señales brutas y establecer un medio para su registro se debió confirmar la estabilidad del equipo en relación con los tiempos de autonomía, los parámetros máximos y mínimos de concentraciones de contaminantes que realmente se podrían monitorear, la estabilidad en la conexión del equipo y funcionamiento continuo.

El proceso inicial para esta validación del dispositivo fue exponerlo a condiciones “*indoor*” de operación ajustando detalles en la programación de algoritmos para el manejo de señales de cada sensor implicado al dispositivo. Se determinó una autonomía de 2,5 horas a su máximo funcionamiento con la posibilidad de operar conectado a alimentación directa de 5V a 1A durante más de 24 horas de forma estable.

La conectividad y envío de valores por medio del protocolo de comunicación MQTT fue establecida a través de los servicios que otorga la página de Cayenne⁸ para el desarrollo de

⁸ Página para el desarrollo de proyectos IoT: <https://developers.mydevices.com/cayenne/features/>

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

aplicaciones IoT, en donde se comprobó una conexión estable y registro confiable de valores enviados en tiempo real.

3.3.1.1. Medición de material particulado

Para el monitoreo y validación de material particulado ($PM_{2.5}$) que registró el dispositivo en una primera etapa, se realizó una experiencia comparativa con un equipo Dustrack II modelo 8532 manteniendo una recopilación de datos por segundo en una zona residencial de la ciudad de Curicó, ubicada en el sector de Bombero Garrido.

El monitoreo y los ajustes en la programación del equipo se realizaron en el periodo comprendido entre el 28 de septiembre y el 9 de octubre del año 2020 siendo pruebas de al menos 4 horas de monitoreo continuo y comparación de valores para luego ajustar los parámetros de programación y repetir el procedimiento hasta una correlación de señales evidente entre los equipos implicados.

Para mantener una medición estable y confiable en el monitoreo de contaminantes se decidió establecer un algoritmo programado en función a un promedio móvil de 60 valores, tomando un total de 2 minutos de muestras con la finalidad de aumentar la confiabilidad de la medición y mantener su estabilidad.

Los datos obtenidos en el ajuste final durante esta etapa se pueden observar en el gráfico 3-1 presentado a continuación, los cuales comprenden un intervalo de monitoreo de 24 horas ininterrumpidas.

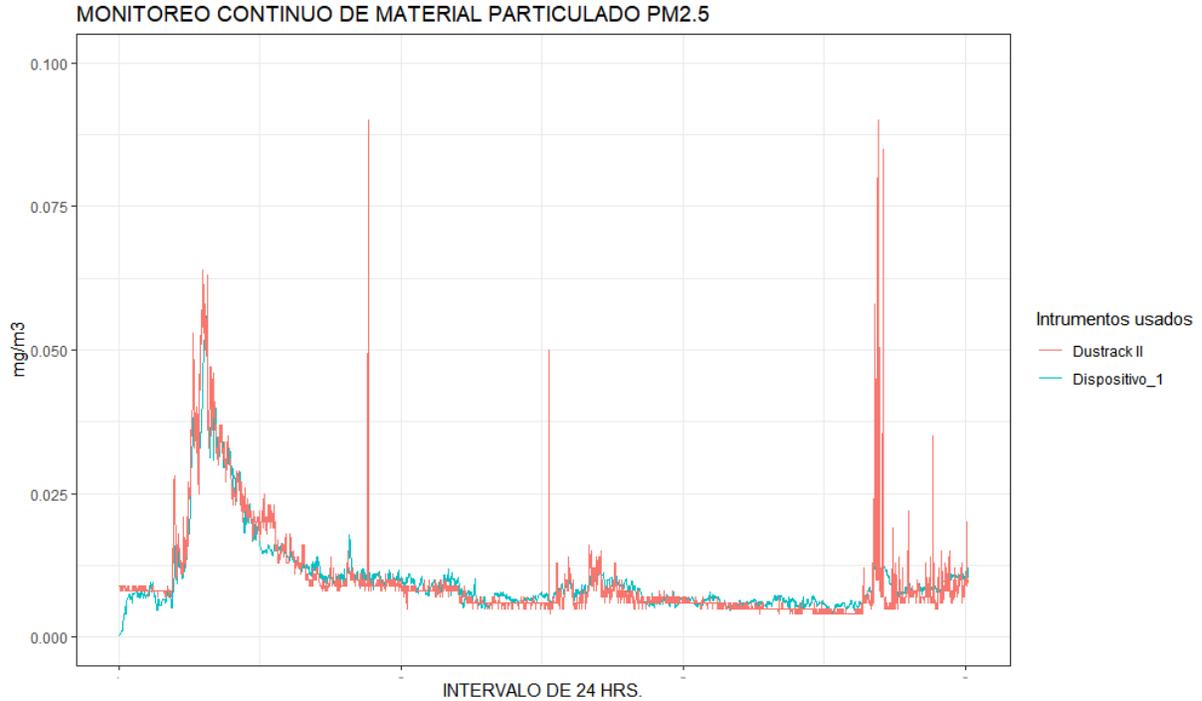


Gráfico 3-1: Comparativa del monitoreo de material particulado $PM_{2.5}$ en zona residencial de Curicó. Fuente: Elaboración propia

Dados los resultados obtenidos y expuestos en el gráfico 3-1 se puede establecer que, la tendencia de las concentraciones de material particulado monitoreadas en un ambiente “indoor” son bastante aceptables y notorias. Se expone, además, en la tabla 3-5 una comparativa de valores estadísticos para un mayor análisis de los datos recolectados.

Tabla 3-5: Comparativa de datos estadísticos para monitoreo de material particulado

Equipo	Prom.	Media	Moda	Desv.		Percentiles			
				Estand	P5	P25	P50	P75	P95
Dispositivo_1	0,01019	0,00815	0,00732	0,007155	0,00528	0,0064	0,00815	0,0105	0,02837
Dustrack II	0,01017	0,00800	0,00600	0,009078	0,00528	0,0060	0,00800	0,0100	0,02800

Otro factor importante obtenido por medio de la comparativa de equipos ya mencionados es el factor de correlación de Spearman (ρ) obtenidos por medio del software Rstudio en el análisis de datos, el que asciende a un 0.8281, lo que indica alta fuerza en la tendencia de los valores obtenidos.

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Contemplado lo expuesto anteriormente se puede concluir que, debido al algoritmo implementado en el dispositivo desarrollado, el que contempla un promedio móvil, las concentraciones extremas y puntuales se pierden dentro de la data recopilada lo que se evidencia en los datos estadísticos comparados y el factor de correlación expuesto.

3.3.1.2. *Medición de compuestos orgánicos volátiles*

La validación para el monitoreo de compuestos orgánicos volátiles en la etapa inicial se desarrolló mediante la comparación de valores obtenidos con un equipo multiRAE lite, modelo de bombeo de aire.

Las mediciones se realizaron en intervalos de 5 minutos, para mantener la confiabilidad del equipo, identificándose un algoritmo interno del equipo (multiRAE lite) que suaviza los cambios bruscos en las concentraciones del contaminante monitoreado, no obstante, la tendencia de los valores monitoreados en ambos equipos se observa similar.

Para mantener las mediciones en igualdad de condiciones y establecer uniformidad, se utilizaron muestras de aire emitidas desde la misma fuente (bolsas para muestras de aire) manteniendo un monitoreo simultáneo.

Luego de un ajuste y arreglos en el algoritmo de programación para el dispositivo, los resultados promedio de las experiencias comparativas se muestran a continuación en la gráfica 3-2.

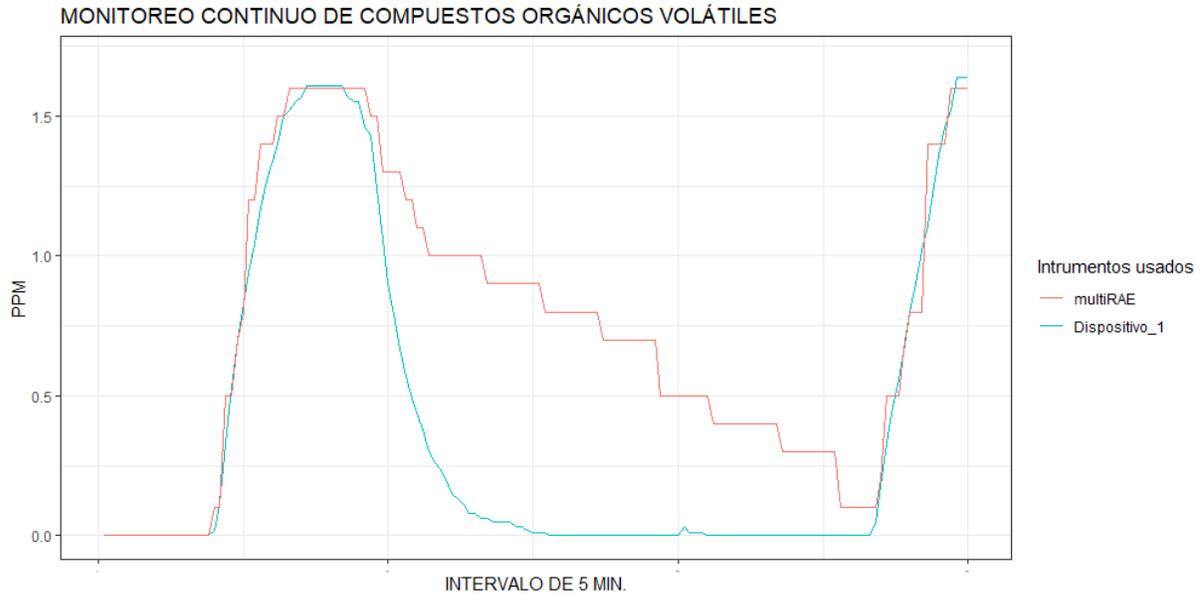


Gráfico 3-2: Comparativa para la calibración del sensor de COV's en condiciones controladas. Fuente: Elaboración propia

De los datos recolectados y expuestos en el gráfico anterior se construye la tabla 3-6, para identificar la relación existente entre las mediciones de los dos equipos utilizados por medio de un análisis de valores estadísticos.

Tabla 3-6: Comparativa de datos estadísticos para monitoreo de TCOV's

Equipo	Prom.	Media	Moda	Desv. Estándar	Percentiles				
					P5	P25	P50	P75	P95
Dispositivo_1	0,39887	0,01000	0	0,59077	0	0,0	0,01	0,7925	1,61
multiRAE	0,74200	0,70000	0	0,52165	0	0,3	0,70	1,1250	1,60

De este modo se comprobó una tendencia en los valores obtenidos del dispositivo fabricado en relación con la desviación estándar y moda. Los demás parámetros expuestos anteriormente se presentan bastante diferentes.

Luego de realizar el estudio estadístico anterior, se calculó el factor de correlación de Spearman (rho) para estos valores, a modo de estimar una fuerza en la tendencia entre ambas mediciones, el que asciende a 0.8291, siendo este obtenido a través de las herramientas del software Rstudio para los datos registrados. Lo que finalmente indica una fuerte tendencia entre las mediciones realizadas con los equipos multiRAE lite y el dispositivo desarrollado.

3.3.1.3. *Medición de Benceno*

Debido al contexto social en que se desarrolló este trabajo (cuarentena restrictiva, condiciones sanitarias que implicaron no contar acceso a las instalaciones de la universidad ni a los equipos especializados, como es el caso del cromatógrafo), la validación y determinación de la confiabilidad del sensor usado para la caracterización de benceno no pudo ser realizada usando un equipo certificado.

A raíz de lo anteriormente mencionado, la programación del dispositivo está completamente enfocada en los parámetros entregados por el fabricante siguiendo las curvas indicadas en el anexo 4.

3.3.2. **Etapa en terreno**

Para la etapa de validación en terreno se realizó un contra muestreo con la estación meteorológica perteneciente a la red SINCA ubicada en Av. Juan Luis Diez 1345, Curicó, Maule (coordenadas geográficas: -34.974953, -71.233727). Las pruebas realizadas correspondieron a un monitoreo continuos de 6 horas comprendidos entre el día 28 de octubre al 30 de octubre del presente año.

Los valores obtenidos referente a las concentraciones de PM_{2.5} debieron ser trabajados según la escala AQI (índice de calidad de aire, “*Air Quality Index*”) según la normativa EPA de Estados Unidos [40]. Este índice escalona valores de 0-500 utilizando en código de colores del sistema “*NowCast*”, el que se encarga de notificar los promedios de la hora más actual, los que a su vez se dividen en niveles de preocupación, los cuales se pueden visualizar en la tabla 3-7.

Tabla 3-7: Definición de la escala del índice de calidad de aire por US-EPA 2016

IQA	Concentración $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Calidad de Aire
0 - 50	0 - 12	Buena
51 - 100	12.1 - 35.5	Moderada
101 - 150	35.6 - 56	Dañina a grupos sensitivos
151 - 200	56.5 - 150	Dañinas a la salud
201 - 300	151 - 250	Muy dañinas a la salud
300 - 500	251 - 500	Arriesgado

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Dadas las condiciones sanitarias en la ciudad de Curicó, Chile, al momento de la elaboración de este documento el monitoreo comparativo no resulta ser el óptimo, esto debido a la diferencia de alturas y la obstrucción que produce la edificación al viento, el cual es el principal medio que transporta el contaminante de interés [15].

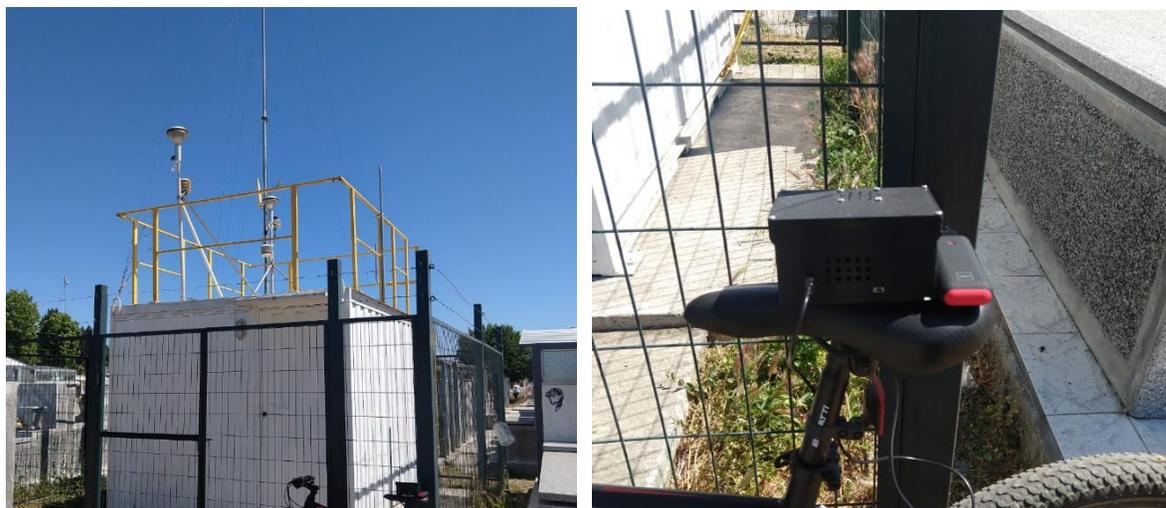


Figura 3-2: Condiciones de monitoreo continuo comparativo a la estación formal de la red SINCA. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, los valores monitoreados fueron separados por hora de medición efectiva, entregando un valor promedio, el que fue comparado con la estación oficial de la red SINCA perteneciente a la ciudad de Curicó según los datos históricos recolectados del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire SINCA⁹. Los resultados de esta comparativa hacen referencia al horario comprendido entre las 11:00 y las 18:00 de los días mencionados anteriormente y se presentan en el gráfico 3-3.

⁹ Base de datos de la red SINCA para la región del Maule: <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/VII>

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

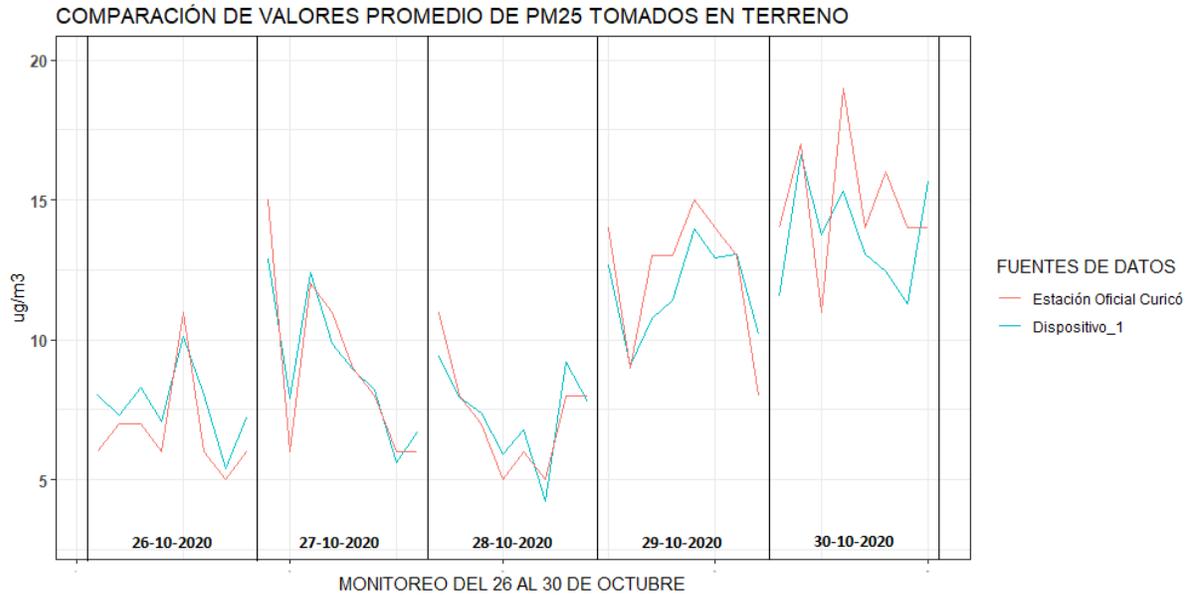


Gráfico 3-3: Gráfico comparativo entre el dispositivo desarrollado y la estación oficial de calidad de aire de la ciudad de Curicó. Fuente: Elaboración propia

Como se refleja en el gráfico expuesto anteriormente, los valores obtenidos no presentan la misma magnitud que la estación oficial de la ciudad de Curicó, esto por las condiciones ya mencionadas, pero aun así presentan una gran proximidad, lo que se puede deducir como un área representativa de las condiciones actuales de contaminantes presente en la zona monitoreada.

3.3.3. Despliegue

El despliegue de los dispositivos considerados en una primera instancia hace referencia a la zona residencial de la ciudad de Curicó. Debido a lo anteriormente mencionado, los puntos tentativos para la instalación de las centrales de monitoreo se pueden apreciar en la figura 3-3, donde, además, se hace referencia al área que se podría considerar representativa del monitoreo.

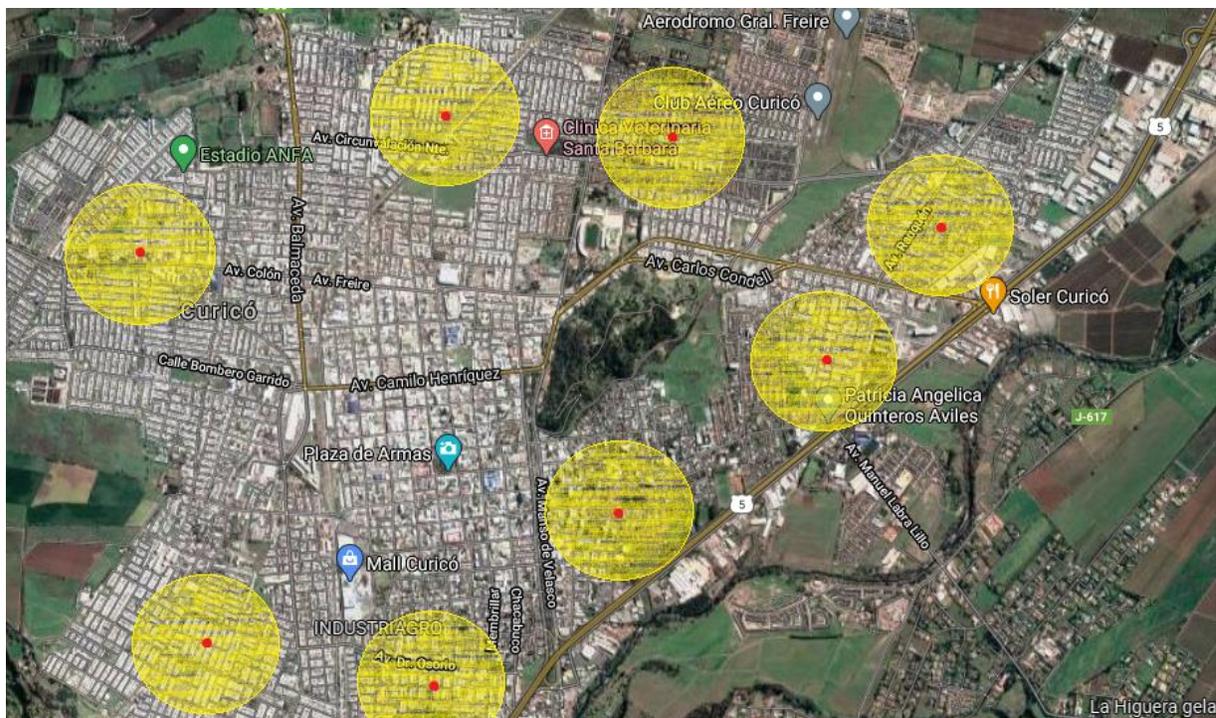


Figura 3-3: Despliegue de referencia para las zonas residenciales de la ciudad de Curicó.

Fuente: Elaboración propia

La figura 3-3 representa la ubicación y el área de monitoreo de las estaciones que actuarán de manera fija a través de los colaboradores seleccionados para la implementación del proyecto. Además, los dispositivos móviles considerados para el proyecto seguirán las rutas establecidas por la locomoción colectiva local para abarcar una mayor área en el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad. Las rutas móviles se presentan en la figura 3-4 correspondientes a las distintas líneas de locomoción colectiva local.

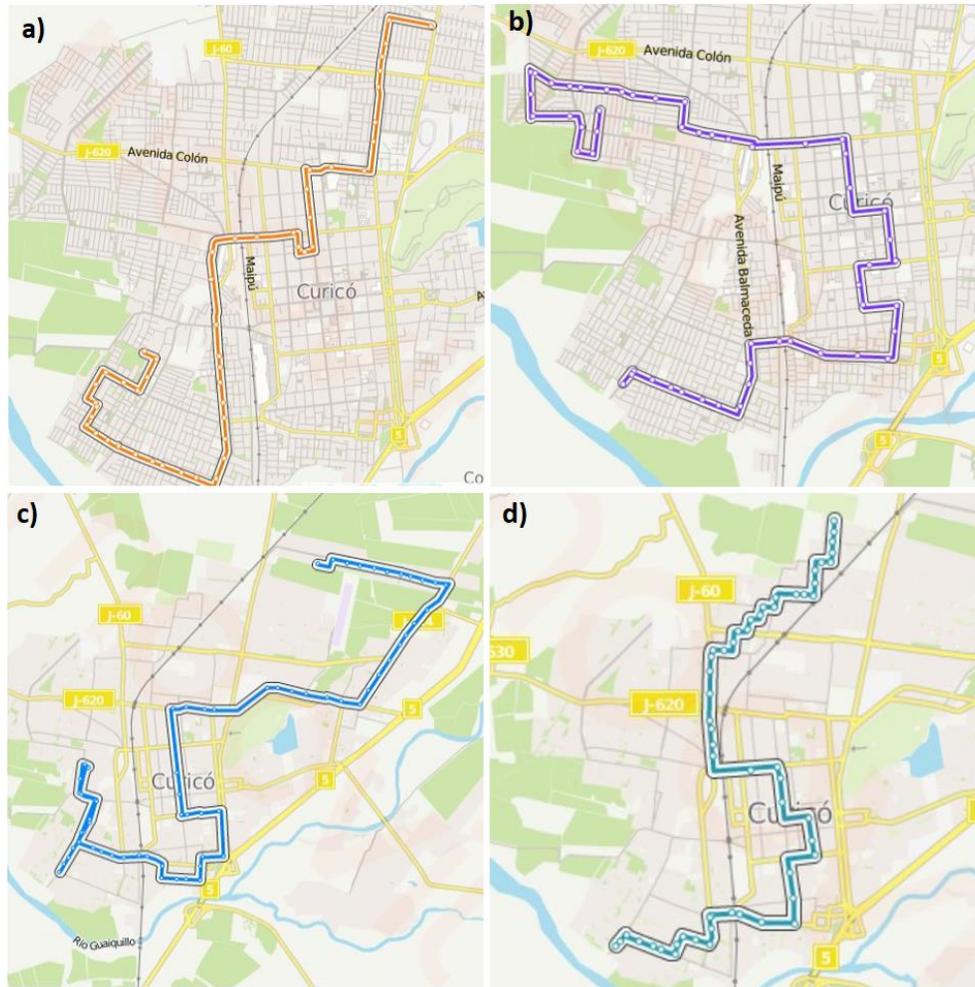


Figura 3-4: Rutas de la locomoción colectiva local: a) Empresa Renacer Santa Fé-Boldo, b) Empresa Intercomunal Aguas Negras-Bombero Garrido, c) Empresa Intercomunal Aguas Negras-Rauquén, d) Empresa Intercomunal Aguas Negras-Santa Fé. Fuente: Moovitapp.com¹⁰

A causa de la situación que vivió el país al momento del desarrollo de este trabajo (Estallido Social de Chile a partir de finales del año 2019 y la posterior pandemia del virus COVID-19), el apartado del despliegue de los dispositivos de monitoreo no pudo ser realizado. Esto provocado por el retraso del proceso de compra de componentes, el restringido acceso a los laboratorios e instalaciones de la universidad y el impedimento en la búsqueda de colaboradores.

¹⁰ Locomoción colectiva de la ciudad de Curicó: https://moovitapp.com/index/es-419/transporte_p%C3%BAblico-Curic%C3%B3-5156

3.4. ANÁLISIS ECONÓMICO

A través de la tabla 3-8 representa el costo económico implicado a la fabricación de un dispositivo de monitoreo de calidad de aire, esta sin contemplar el costo asociado a recursos humanos, es decir, no se han considerado los costos incluidos al diseño, desarrollo de software, construcción de hardware y puesta en marcha. La tabla se sustenta a través de los anexos 6 y anexo 7.

Tabla 3-8: Costo asociado a los componentes seleccionados en la fabricación del dispositivo desarrollado.

ITEM	CANT.	PRECIO UNI.	PRECIO TOTAL
Placa WROOM ESP32	1 unid.	\$ 7.563	\$ 7.563
GPS Ublox NEO-6M v2	1 unid.	\$ 6.714	\$ 6.714
Módulo de carga micro USB Tp4056	2 unid.	\$ 840	\$ 1.680
Sensor de polvo DSM501a	1 unid.	\$ 6.302	\$ 6.302
Sensor de gas MQ-3	1 unid.	\$ 2.941	\$ 2.941
Sensor CJMCU-811	1 unid.	\$ 10.915	\$ 10.915
Ventilador 40X40X10 5V ¹¹	1 unid.	\$ 2.025	\$ 2.025
Batería ¹²	1 unid.	\$ 3.232	\$ 3.232
Regleta conexiones rápidas	1 unid.	\$ 220	\$ 220
Pack 20 Cables	1 unid.	\$ 1.680	\$ 1.680
Interruptor	1 unid.	\$ 336	\$ 336
Filamento PLA	0,2 kg	\$ 20.160	\$ 4.032
Convertidor lógico 3.3V a 5V	1 unid.	\$ 1.590	\$ 1.590
		IVA TOTAL	\$ 9.354
		TOTAL FINAL	\$ 58.584

De lo anteriormente expuesto, se puede corroborar el bajo costo implicado a la fabricación de estos equipos, manteniéndolos como una opción viable en la problemática planteada en este documento.

¹¹ Ventilador cotizado en tienda8: https://www.tienda8.cl/mini-ventiladores/ventilador-silencioso-5v-40x40x10mm-multiples-usos?search_query=ventilador+5v&results=24

¹² Precio de referencia: https://simple.ripley.cl/bateria-portatil-power-bank-de-2400mah-para-celularesmp4gps-color-verde-mpm00002005258?color_80=verde&s=0

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN CON RED LOCAL

Tomando en consideración los resultados expuestos en el capítulo anterior, la información que se logró recopilar del dispositivo desarrollado para este documento, se aproxima en gran medida a las fuentes oficiales de monitoreo de calidad el aire, pertenecientes a la red SINCA gestionada por el Ministerio de Medio Ambiente de Chile.

El parámetro que se pudo corroborar y validar ante la red oficial local fue el material particulado $PM_{2.5}$, a través de la información histórica para contaminantes atmosféricos, lo que puede ser observado en el gráfico 3-3.

Debido a forma en la que se monitorean los compuestos orgánicos volátiles en el dispositivo desarrollado, se hace imposible caracterizar los compuestos existentes en las muestras, por lo que implementar un índice de peligrosidad se torna complejo, ya que los distintos compuestos que pueden ser detectados, mantienen diferentes concentraciones aceptables para la salud humana [41,42]. Por esto, se decidió generalizar el índice de peligrosidad, estableciendo un punto crítico de 10 ppm para TCOV's, dando como resultado la creación de una alerta dentro de la página. En la página, se pueden visualizar las concentraciones de TCOV's en tiempo real, así como también los otros parámetros de interés, además se mantiene un registro gráfico el cual puede presentarse como una curva de los últimos minutos, horas, días, semanas, mensual, trimestral, semestral y anual si los registros así lo permiten. Los gráficos que se presentan a continuación son los que se pueden presentar directamente en la página de Cayenne.



Gráfico 4-1: Concentraciones de TCOV's medidos en ppm representadas por la herramienta gráfica de Cayenne. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 4. Análisis de resultados



Gráfico 4-2: Concentraciones de benceno medidos en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ representadas por la herramienta gráfica de Cayenne. Fuente: Elaboración propia.

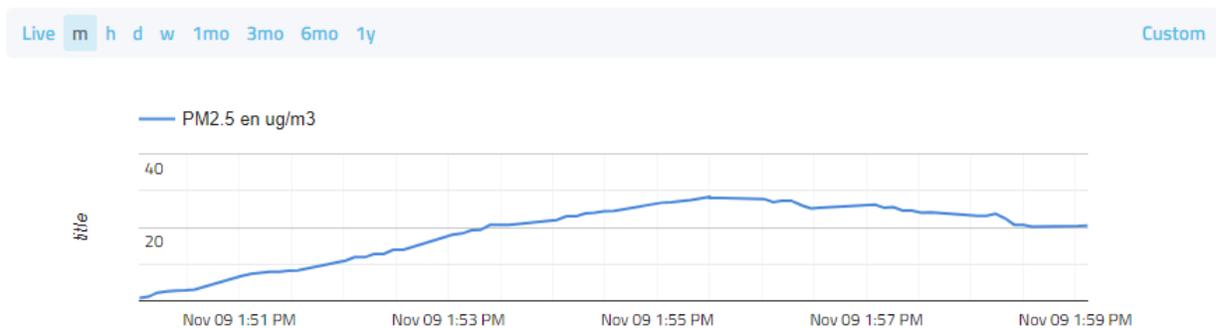


Gráfico 4-3: Concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ medidos en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ representadas por la herramienta gráfica de Cayenne. Fuente: Elaboración propia.

La calibración y validación del sensor encargado de monitorear los niveles de concentración de benceno no pudo ser realizada de forma adecuada y confiable, por lo que, para este parámetro no se generará una alerta gráfica como los parámetros anteriormente mencionados, aun así, en el presente se informa el valor de concentración aceptable para ese gas, el que asciende a $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ [42].

La estabilidad de la conectividad se ha podido demostrar de manera exitosa y la visualización de cada parámetro en la en la página establecida en el desarrollor del dispositivo se demuestra de fácil comprensión, junto con un registro de datos de forma gráfica horarios consistentes.

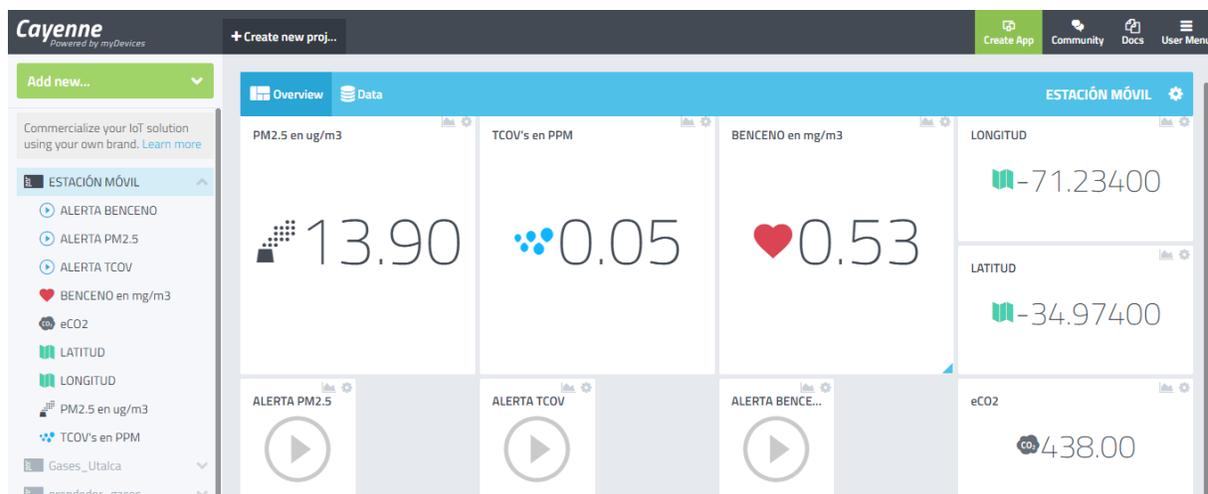


Figura 4-1: Visualización de la página Cayenne desarrollada para la estación de monitoreo de calidad del aire. Fuente: Elaboración propia.

Luego de la experimentación y simulación de diversas situaciones que podrían afectar el correcto funcionamiento del equipo en un entorno de trabajo aceptable, se identificó como una gran oportunidad de mejora establecer un protocolo de registro de datos “*offline*” ante una posible desconexión de la red WiFi, esto por medio de la implementación de una tarjeta SD y algoritmos de actualización en la base de datos antes de la reconexión.

Otro factor importante para la mejora del dispositivo es implementar un sistema que asegure el cable de alimentación al equipo, con el fin de evitar desconexiones inesperadas.

Con lo mencionado previamente, el dispositivo desarrollado en este trabajo presenta un alto índice de correlación con los equipos certificados comparados en el capítulo anterior junto con un funcionamiento aceptable en terreno determinado por la correlación presentada con la estación de monitoreo oficial de la ciudad de Curicó. Esto hace viable el despliegue de dispositivos, como se tenía planeado en un inicio, en la zona residencial de la ciudad, lo que a su vez entregará nueva información y posibles mejoras en la robustez del dispositivo, por lo cual, se requiere continuar con el análisis de nuevas variables, modelos y algoritmos para disminuir las tasas de errores y mejorar las condiciones de operación del dispositivo.

CONCLUSIONES

Por medio del desarrollo de este documento se ha reflejado la posibilidad y viabilidad de aplicar una solución de bajo costo para el monitoreo de calidad de aire en las zonas residenciales de la ciudad de Curicó, esto corroborado con los datos oficiales entregados por la red SINCA y comparados con el equipo desarrollado, el que muestra una tendencia aceptable en los parámetros que fueron considerados, estableciendo alertas cuando las concentraciones de contaminantes exceden las normas vigentes en el país.

La tecnología implementada a pesar de ser polémica para la detección de material particulado “*Laser Scattering*”, se demuestra como una alternativa razonable, demostrado en el capítulo 3 del presente documento. La tecnología para medir la concentración de compuestos orgánicos volátiles totales se demuestra aceptable frente al dispositivo certificado MultiRAE lite, lo que se demuestra frente a la tendencia de los valores obtenidos y presentados en capítulo 3 al igual que el parámetro anteriormente mencionado.

El diseño del dispositivo a nivel de *software* como *hardware* presentó una serie de modificaciones a lo largo de su desarrollo para mejorar las señales emitidas y la estabilidad del funcionamiento general, lo que se adecuó a las condiciones ambientales en la temporada de primavera-verano, esto hace que el dispositivo aún esté sujeto a mejoras, ya que debido al periodo de desarrollo del mismo, no se corroboró el funcionamiento en condiciones de lluvia, fuertes vientos, altas concentraciones de humedad y bajas temperaturas.

Dadas las condiciones generales en las cuales se vio envuelto Chile en el año correspondiente a la elaboración de este documento, hitos como el estallido social y la posterior restricción sanitaria debido a la propagación del virus COVID-19, la construcción de los dispositivos contemplados en un inicio no se completó, por ende, el despliegue de dispositivos en las distintas zonas residenciales de la ciudad de Curicó y la creación de una fuente amplia de datos no se efectuó. Otro parámetro importante que se percibió truncado por la situación ya mencionada fue la validación del monitoreo de benceno, debido a la restricción al acceso a los laboratorios de la universidad y al equipo contemplado para esta tarea (cromatógrafo).

A través de distintas conversaciones establecidas con profesionales dedicados a la salud pública y monitoreo de contaminantes (María Elisa Quinteros - Departamento de Salud Pública de la

Capítulo 4. Análisis de resultados

Universidad de Talca, Francisco Rubilar - Desarrollador de Aire Temuco¹³), la solución propuesta se presenta atractiva para seguir trabajando en las mejoras y consideraciones de robustez en el diseño ante complicaciones como desconexiones espontáneas por problemas en la red wifi o en las fuentes de poder de los dispositivos, un sistema de almacenaje *offline*, un sistema de actualización de datos diarios para evitar la fuga de datos, entre otras mejoras.

Se recomienda en un futuro para este tipo de desarrollo, explorar soluciones con la tecnología de “*Machine Learning*”, lo que mejoraría el desempeño de estos dispositivos y ayudaría a identificar errores o fallos en la subida de datos, enviar alertas de revisión de equipos defectuosos o incluso el autocalibrado de equipos a través de redes neuronales implementadas a los equipos desarrollados.

Para finalizar, sí bien, el dispositivo desarrollado presenta un amplio campo de mejoras posibles para su implementación, se muestra como un candidato fuerte y confiable para trabajar como base, ya que presenta resultados aceptables para un dispositivo de esta naturaleza y sería una excelente herramienta para entregar información confiable y crear alertas que beneficien la salud de la comunidad.

¹³ Aire Temuco: <http://aire.ceisufro.cl/#/dashboard>

REFERENCIAS

- [1] J.A. Cherni, La globalización de la insalubridad y la contaminación del aire urbano, *EURE*. 27 (2001) 25–41. doi:10.4067/S0250-71612001008100002.
- [2] V.C. González, V.C. González, I.S. Sandoval, Contaminación ambiental del aire en Buenos Aires, Argentina, *Rev. Interam. Ambient. y Tur. - RIAT*. 8 (2012) 34–41. doi:10.4067/riatvol8iss1pp34-41%0718-235X.
- [3] I. International Agency for Research on Cancer, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Outdoor Air Pollution, in: *IARC Monogr.*, 109th ed., 2015: pp. 35–50.
- [4] B.B. del C.N. de Chile, Reportes Estadísticos 2020 de Curicó Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, (2020). . (accessed August 14, 2020).
- [5] N. Generales, *Diario Oficial*, 42,321. 6 (2019) 6.173. <https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2019/04/03/42321/01/1569742.pdf>.
- [6] P. Matus C., M. Oyarzún G., P. Matus C., M. Oyarzún G., Impacto del Material Particulado aéreo (MP2,5) sobre las hospitalizaciones por enfermedades respiratorias en niños: estudio caso-control alterno, *Rev. Chil. Pediatría*. 90 (2019) 166. doi:10.32641/rchped.v90i2.750.
- [7] N.A.B. Mabahwi, O.L.H. Leh, D. Omar, Human Health and Wellbeing: Human Health Effect of Air Pollution, *Procedia - Soc. Behav. Sci*. 153 (2014) 221–229. doi:10.1016/j.sbspro.2014.10.056.
- [8] S.L. Zeger, F. Dominici, A. McDermott, J.M. Samet, Mortality in the Medicare Population and Chronic Exposure to Fine Particulate Air Pollution in Urban Centers (2000–2005), *Environ. Health Perspect*. 116 (2008) 1614–1619. doi:10.1289/ehp.11449.
- [9] R.D. Brook, B. Franklin, W. Cascio, Y. Hong, G. Howard, M. Lipsett, R. Luepker, M. Mittleman, J. Samet, S.C. Smith, I. Tager, Air Pollution and Cardiovascular Disease, *Circulation*. 109 (2004) 2655–2671. doi:10.1161/01.CIR.0000128587.30041.C8.
- [10] B.Z. Simkhovich, M.T. Kleinman, R.A. Kloner, Air Pollution and Cardiovascular Injury, *J. Am. Coll. Cardiol*. 52 (2008) 719–726. doi:10.1016/j.jacc.2008.05.029.
- [11] S. Tóxicas, R. De Enfermedades, Resumen de Salud Pública Benceno, *Atsdr*. (2007) 8. http://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs3.pdf.

- [12] F.J. Pacheco, D. Rodríguez, Exposición a benceno y manifestaciones clínicas en trabajadores de talleres de latonería y pintura automotriz, Venezuela 2019, *Rev. Cuba. Salud Y Trab.* 21 (2020) 8–12. <http://www.revsaludtrabajo.sld.cu/index.php/revsyt/article/view/122/178>.
- [13] M. Hulin, M. Simoni, G. Viegi, I. Annesi-Maesano, Respiratory health and indoor air pollutants based on quantitative exposure assessments, *Eur. Respir. J.* 40 (2012) 1033–1045. doi:10.1183/09031936.00159011.
- [14] Y.M. Cao, W.M. Gao, J. Liu, [Study on the health effects of occupational exposure to low concentrations of benzene]., *Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi.* 36 (2018) 435–438. doi:10.3760/cma.j.issn.1001-9391.2018.06.010.
- [15] M. Schmitz, R., Muñoz, R. y Falvey, “ Uso de Modelos de Calidad del Aire en la Evaluación Ambiental de Proyectos - Elaboración de un Documento Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA”, (2011) 7–31. https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/guias/Informe_tecnico_consultoria_UNTEC.pdf.
- [16] Ministerio del Medio Ambiente - Gobierno de Chile, Guía de calidad del aire y educación ambiental, *Minist. Del Medio Ambient. Gob. Chile.* 3 (2016) 30–31. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/Guia-para-Docentes-Sobre-Calidad-del-Aire-003.pdf>.
- [17] J.E. Thompson, Crowd-sourced air quality studies: A review of the literature & portable sensors, *Trends Environ. Anal. Chem.* 11 (2016) 23–34. doi:10.1016/j.teac.2016.06.001.
- [18] T. Normativo, C. Nacional, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile - documento generado el 17-Oct-2014, *Bibl. Del Congr. Nac.* (2014) 17–20. https://www.leychile.cl/Navegar/index_html?idNorma=1025202.
- [19] Betty M. Pérez, EFECTOS DE LA URBANIZACIÓN EN LA SALUD DE LA POBLACIÓN, *An. Venez. Nutr.* 16 (2003) 97–104. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-07522003000200006 (accessed July 16, 2020).
- [20] P. Matus C., M. Oyarzún G., P. Matus C., M. Oyarzún G., Impacto del Material Particulado aéreo (MP2,5) sobre las hospitalizaciones por enfermedades respiratorias en

- niños: estudio caso-control alterno, *Rev. Chil. Pediatría*. 90 (2019) 166. doi:10.32641/rchped.v90i2.750.
- [21] R.D. Brook, S. Rajagopalan, C.A. Pope, J.R. Brook, A. Bhatnagar, A. V. Diez-Roux, F. Holguin, Y. Hong, R. V. Luepker, M.A. Mittleman, A. Peters, D. Siscovick, S.C. Smith, L. Whitsel, J.D. Kaufman, Particulate Matter Air Pollution and Cardiovascular Disease, *Circulation*. 121 (2010) 2331–2378. doi:10.1161/CIR.0b013e3181dbee1.
- [22] W.-J. Guan, X.-Y. Zheng, K.F. Chung, N.-S. Zhong, Impact of air pollution on the burden of chronic respiratory diseases in China: time for urgent action, *Lancet*. 388 (2016) 1939–1951. doi:10.1016/S0140-6736(16)31597-5.
- [23] O. US EPA, Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente, (n.d.). <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente> (accessed September 4, 2019).
- [24] A. FERNÁNDEZ MUERZA, Efectos nocivos de los compuestos orgánicos volátiles | Consumer, (2006). <https://www.consumer.es/medio-ambiente/efectos-nocivos-de-los-compuestos-organicos-volatiles.html> (accessed September 4, 2019).
- [25] R. Van Den Heuvel, E. Den Hond, E. Govarts, A. Colles, G. Koppen, J. Staelens, M. Mampaey, N. Janssen, G. Schoeters, Identification of PM10 characteristics involved in cellular responses in human bronchial epithelial cells (Beas-2B), *Environ. Res.* 149 (2016) 48–56. doi:10.1016/j.envres.2016.04.029.
- [26] O.R. Keating, Health Effects of Mercury and Mercury Compounds, in: *Mercur. Study Rep. to Congr.*, 1997: p. ES-3. <http://www.osti.gov/scitech/biblio/575110>.
- [27] Comisión Nacional del Medio Ambiente, Normas Ambientales dictadas bajo la Ley de Bases del Medio Ambiente N° 19.300, 2003. <http://sinca.mma.gob.cl/uploads/documentos/71196ec2a22baa2e7e8444df6a40d8ab.pdf>.
- [28] T. Normativo, C. Nacional, ESTABLECE NORMA PRIMARIA DE CALIDAD AMBIENTAL PARA MATERIAL PARTICULADO FINO RESPIRABLE MP 2,5, 2014. https://www.leychile.cl/Navegar/index_html?idNorma=1025202.
- [29] T. Normativo, C. Nacional, ESTABLECE NORMA DE CALIDAD PRIMARIA PARA MATERIAL PARTICULADO RESPIRABLE MP10, EN ESPECIAL DE LOS VALORES QUE DEFINEN SITUACIONES DE EMERGENCIA, 2014.

- https://www.leychile.cl/Navegar/index_html?idNorma=99434.
- [30] T. Normativo, C. Nacional, ESTABLECE NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DE AIRE PARA DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂), 2018. <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1131641&idParte=>.
- [31] T. Normativo, C. Nacional, ESTABLECE NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DE AIRE PARA DIOXIDO DE NITROGENO (NO₂), 2003. https://www.leychile.cl/Navegar/index_html?idNorma=208185.
- [32] T. Normativo, C. Nacional, ESTABLECE NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DE AIRE PARA MONOXIDO DE CARBONO (CO), 2014. https://www.leychile.cl/Navegar/index_html?idNorma=202437.
- [33] T. Normativo, C. Nacional, ESTABLECE NORMA DE CALIDAD PRIMARIA PARA PLOMO EN EL AIRE, 2000. https://www.leychile.cl/Navegar/index_html?idNorma=179878.
- [34] T. Normativo, C. Nacional, ESTABLECE NORMA PRIMARIA DE CALIDAD DE AIRE PARA OZONO (O₃), 2002. <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=208198>.
- [35] T.M. Way, B. Dipper, L. Particle, S. Basically, Laser-scattering – Basics, (n.d.) 1–7. https://www.fritsch.es/fileadmin/Redakteur/Downloads/Reports_sizing/Introduction_Laser_Scattering/Laser_Scattering_-_introduction.pdf.
- [36] Y. Wang, J. Li, H. Jing, Q. Zhang, J. Jiang, P. Biswas, Laboratory Evaluation and Calibration of Three Low-Cost Particle Sensors for Particulate Matter Measurement, *Aerosol Sci. Technol.* 49 (2015) 1063–1077. doi:10.1080/02786826.2015.1100710.
- [37] E. Oviedo Regino, Lógica de programación orientada a objetos., in: Ecoe Ediciones, 2015: pp. 205–272. https://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=zdo3DgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=programacion+orientada+a+objetos+&ots=cqPZH02PXb&sig=oUUoyOxWs0NhrGKh5LNaN90jYaM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (accessed July 18, 2020).
- [38] MINISTERIO DE SALUD; SUBSECRETARÍA DE SALUD PÚBLICA, Decreto-61, REGLAMENTO DE ESTACIONES DE MEDICIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS, (2009). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=281728> (accessed September 27, 2020).
- [39] A.M.D.M.A.S.D.M. AMBIENTE, Resolución Exenta N° 106, CRITERIOS DE

- EMPLAZAMIENTO PARA CALIFICAR ESTACIONES DE MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO FINO (MP 2,5) COMO DE REPRESENTATIVIDAD POBLACIONAL Y FIJA PLAZO PARA FINES QUE INDICA, (2013). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1048645&idVersion=2013-03-01>.
- [40] United States Environmental Protection Agency, Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI), Environ. Prot. (2013) 28. airnow.gov/sites/default/files/2020-05/aqi-technical-assistance-document-sept2018.pdf.
- [41] Online Browsing Platform, ISO 10580:2010(en), Resilient, textile and laminate floor coverings — Test method for volatile organic compound (VOC) emissions, (2010). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10580:ed-1:v1:en> (accessed November 3, 2020).
- [42] F. Bulian, C. Fragassa, VOC emissions from wood products and furniture: A survey about legislation, standards and measures referred to different materials, FME Trans. 44 (2016) 358–364. doi:10.5937/fmet1604358B.
- [43] E. Systems, ESP32-WROOM-32 Datasheet, (2018) 1–2. https://drive.google.com/file/d/1LHVxJ57_CBenTCYMLYcOoq1PXGIS26cB/view.
- [44] DSM501A Dust sensor module, (2004). https://publiclab.org/system/images/photos/000/003/726/original/tmp_DSM501A_Dust_Sensor630081629.pdf (accessed September 4, 2019).
- [45] S. S&C, Dust Sensor Module, (2014) 6–7.
- [46] AMS, CCS811 Ultra-Low Power Digital Gas Sensor for Monitoring Indoor Air Quality, (2017) 1–35. doi:10.1109/ISEMC.1998.750089.
- [47] Hanwei Electronics, Technical Mq-3 Gas Sensor, Tech. Data. (2015) 3–4. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/MQ-3.pdf>.
- [48] U-blox, NEO-6 u-blox 6 GPS Modules, Www.U-Blox.Com. (2017) 25. [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf).

ANEXO 1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MÓDULO ESP32

Categories	Items	Specifications
Hardware	Module interface	SD card, UART, SPI, SDIO, I2C, LED PWM, Motor PWM, I2S, IR
		GPIO, capacitive touch sensor, ADC, DAC
	On-chip sensor	Hall sensor
	On-board clock	40 MHz crystal
	Operating voltage/Power supply	2.7 ~ 3.6V
	Operating current	Average: 80 mA
	Minimum current delivered by power supply	500 mA
	Recommended operating temperature range	-40°C ~ +85°C
	Package size	(18±0.2) mm x (25.5±0.2) mm x (3.1±0.15) mm
Software	Wi-Fi mode	Station/SoftAP/SoftAP+Station/P2P
	Wi-Fi Security	WPA/WPA2/WPA2-Enterprise/WPS
	Encryption	AES/RSA/ECC/SHA
	Firmware upgrade	UART Download / OTA (download and write firmware via network or host)
	Software development	Supports Cloud Server Development / SDK for custom firmware development
	Network protocols	IPv4, IPv6, SSL, TCP/UDP/HTTP/FTP/MQTT
	User configuration	AT instruction set, cloud server, Android/iOS app
Certification	RF certification	FCC/CE/IC/TELEC/KCC/SRRC/NCC
	Wi-Fi certification	Wi-Fi Alliance
	Bluetooth certification	BQB
	Green certification	RoHS/REACH
Wi-Fi	Protocols	802.11 b/g/n (802.11n up to 150 Mbps)
		A-MPDU and A-MSDU aggregation and 0.4 μs guard interval support
	Frequency range	2.4 GHz ~ 2.5 GHz
Bluetooth	Protocols	Bluetooth v4.2 BR/EDR and BLE specification
	Radio	NZIF receiver with -97 dBm sensitivity
		Class-1, class-2 and class-3 transmitter
		AFH
Audio	CVSD and SBC	

Figura 4-2: Especificaciones técnicas de módulo ESP32. Fuente: Espressif Systems [43]

ANEXO 2: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SENSOR DSM501A

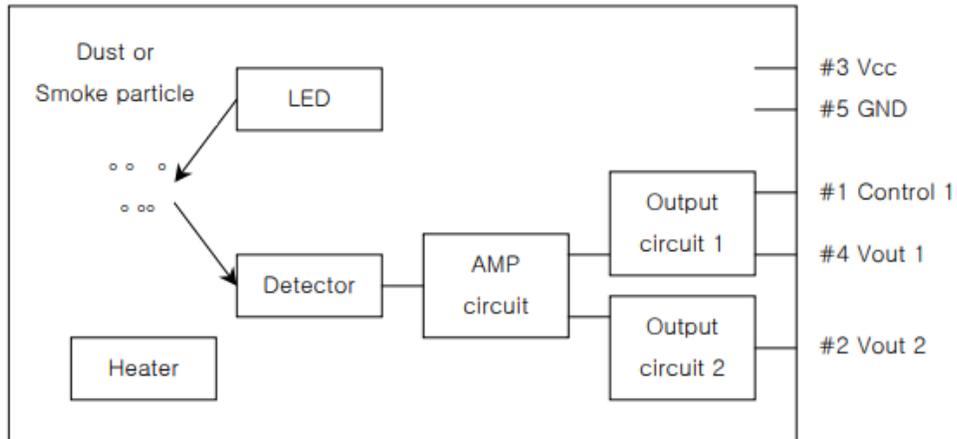


Figura 4-3: Diagrama de funcionamiento y pines del sensor. Fuente: Dust Sensor Module[44]

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Vout 1, 2 at high ^{*1}	Voh	No particle	4.0	4.3		V
Vout 1, 2 at low ^{*2}	Vol	Particle		0.7	1.0	V
Supply current	Icc		-	-	90	mA
Time for stabilization ^{*3}			1	-	-	minute

Figura 4-4: características eléctricas para interpretación de valores. Fuente: Dust Sensor Module[44]

Resistor value	Description
open	Preset sensitivity (over 2.5 micrometer)
100K	Half sensitivity
27K	Equal sensitivity of Vout 2 (over 1 micrometer)

Figura 4-5: Resistencias para determinación de diámetro aéreo de partículas. Fuente: Dust Sensor Module[44]

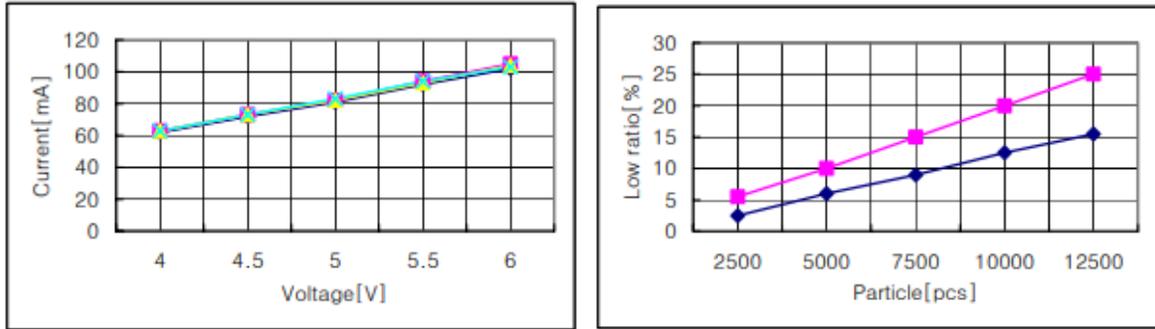


Figura 4-6: Gráfico para determinar e interpretar señales. Fuente: Dust Sensor Module[44]

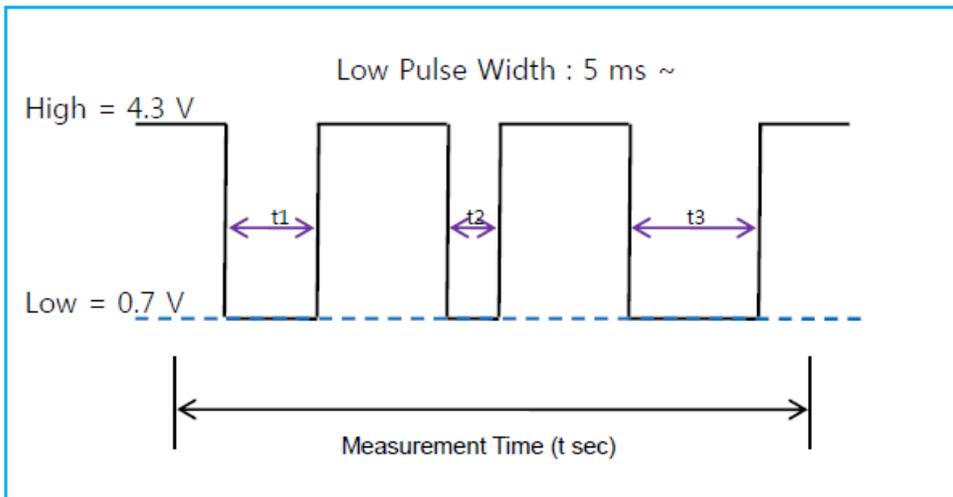


Fig.5 Dust sensor Low Ratio

Low Ratio (%) = $(t1 + t2 + t3) / t \times 100$
 (Measurement Time is calculated by a percentage of sum of Low signals occurred within t(5~30) seconds)

Figura 4-7: Principio físico para la medición de concentraciones. Fuente: Samyongsnc S&C

[45]

ANEXO 3: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SENSOR CJMCU-811

Parameters	Conditions	Min	Typ ⁽⁶⁾	Max	Units
Supply Voltage (V_{DD}) ^{(1), (2)}		1.8		3.3	V
Supply Current (I_{DD}) ⁽³⁾	During measuring at 1.8V		26		mA
	Average over pulse cycle ⁽³⁾ at 1.8V		0.7		mA
	Sleep Mode at 1.8V		19		μ A
Power Consumption	Idle Mode 0 at $V_{DD}=1.8V$		0.034		mW
	Mode 1 & 4 at $V_{DD}=1.8V$		46		mW
	Mode 2 at $V_{DD}=1.8V$		7		mW
	Mode 3 at $V_{DD}=1.8V$		1.2		mW
Logic High Input ⁽⁵⁾	nRESET, nWAKE, ADDR	$V_{DD} - 0.6$		V_{DD}	V
Logic Low Input ⁽⁵⁾	nRESET, nWAKE, ADDR	0		0.6	V
Logic High Output	nINT	$V_{DD} - 0.7$			V
Logic Low Output	nINT			0.6	V
Analogue Input	AUX	0		V_{DD}	V

Figura 4-8: Especificaciones eléctricas del sensor CJMCU-811. Fuente: AMS Datasheet [46]

Benefits	Features
<ul style="list-style-type: none"> Manages the sensor drive modes and measurements while detecting VOCs 	<ul style="list-style-type: none"> Integrated MCU
<ul style="list-style-type: none"> Provides eCO₂ level or TVOC indication with no host intervention 	<ul style="list-style-type: none"> On-board processing
<ul style="list-style-type: none"> Simplifies the hardware and software integration 	<ul style="list-style-type: none"> Standard I²C digital interface
<ul style="list-style-type: none"> Extend battery life in portable applications 	<ul style="list-style-type: none"> Optimised low-power modes
<ul style="list-style-type: none"> Suitable for small form-factor designs 	<ul style="list-style-type: none"> 2.7mm x 4.0mm x 1.1mm LGA package
<ul style="list-style-type: none"> Saves up to 60% in PCB footprint 	<ul style="list-style-type: none"> Low component count
<ul style="list-style-type: none"> Designed for high volume and reliability (>5years lifetime) 	<ul style="list-style-type: none"> Proven technology platform

Figura 4-9: Especificaciones generales de operación. Fuente: AMS Datasheet [46]

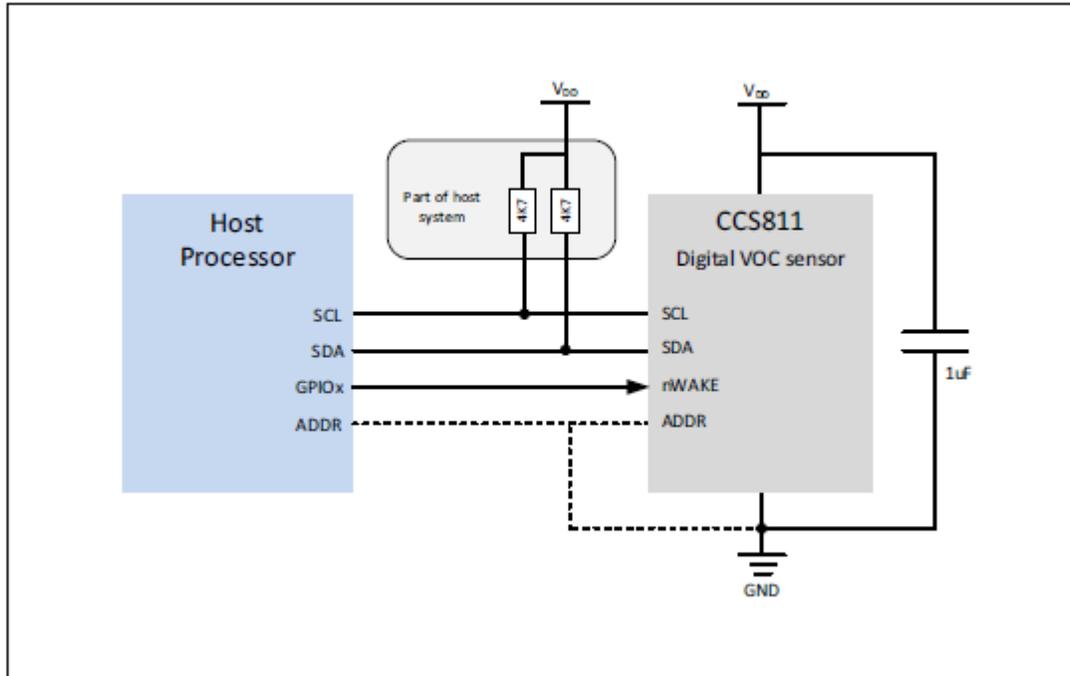


Figura 4-10: Recomendaciones para la conexión del sensor al host. Fuente: AMS Datasheet

[46]

ANEXO 4: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SENSOR MQ-3

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V_c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V_H	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
R_L	Load resistance	200K Ω	
R_H	Heater resistance	33 Ω ±5%	Room Tem
P_H	Heating consumption	less than 750mw	

B. Environment condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T_{ao}	Using Tem	-10°C-50°C	
T_{as}	Storage Tem	-20°C-70°C	
R_H	Related humidity	less than 95%Rh	
O_2	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remarks
R_s	Sensing Resistance	1M Ω - 8 M Ω (0.4mg/L alcohol)	Detecting concentration scope: 0.05mg/L—10mg/L Alcohol
α (0.4/1 mg/L)	Concentration slope rate	≤ 0.6	
Standard detecting condition	Temp: 20°C ±2°C Humidity: 65%±5%	V_c :5V±0.1 V_h : 5V±0.1	
Preheat time	Over 24 hour		

Figura 4-11: Especificaciones generales del sensor MQ 3. Fuente: Hanwei Electronics [47]

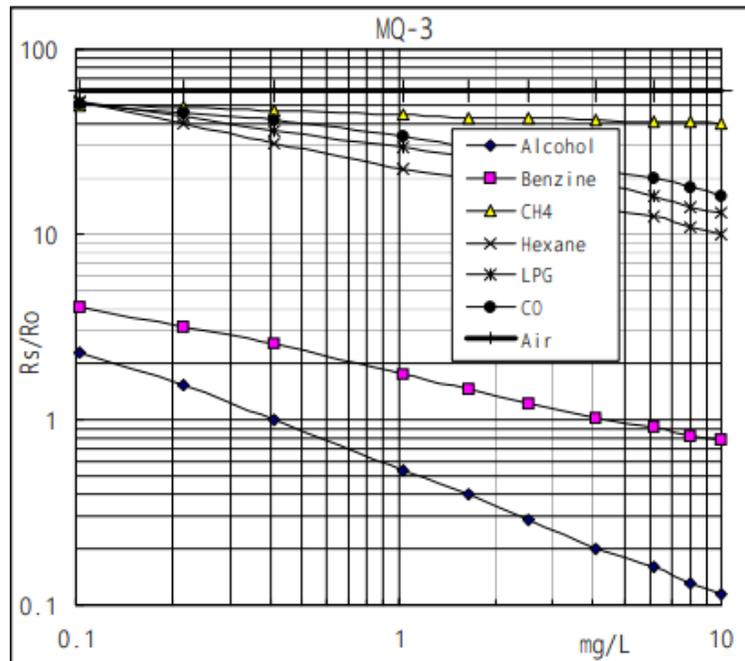


Figura 4-12: Diagrama de sensibilidad características para diversos gases a 20°C con 65% de humedad relativa. Fuente: Hanwei Electronics [47]

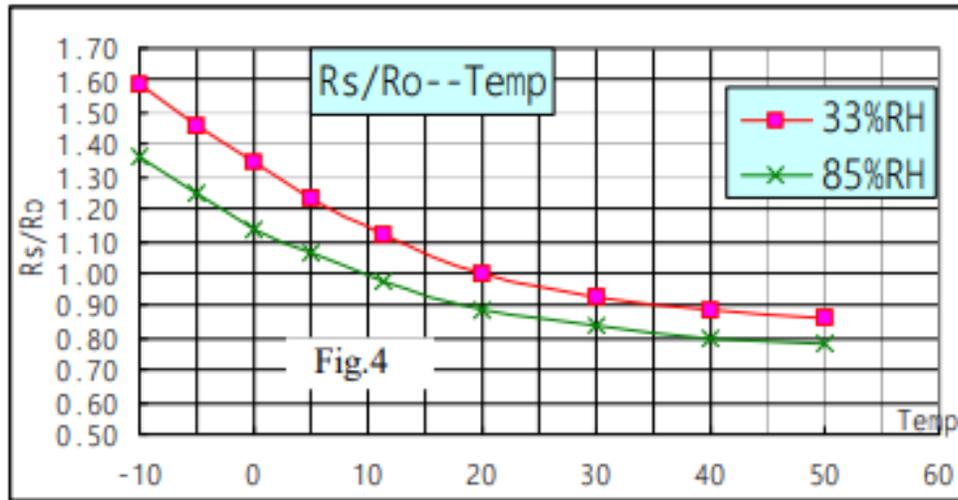


Figura 4-13: Dependencia típica del sensor a la temperatura y humedad relativa. Fuente: Hanwei Electronics [47]

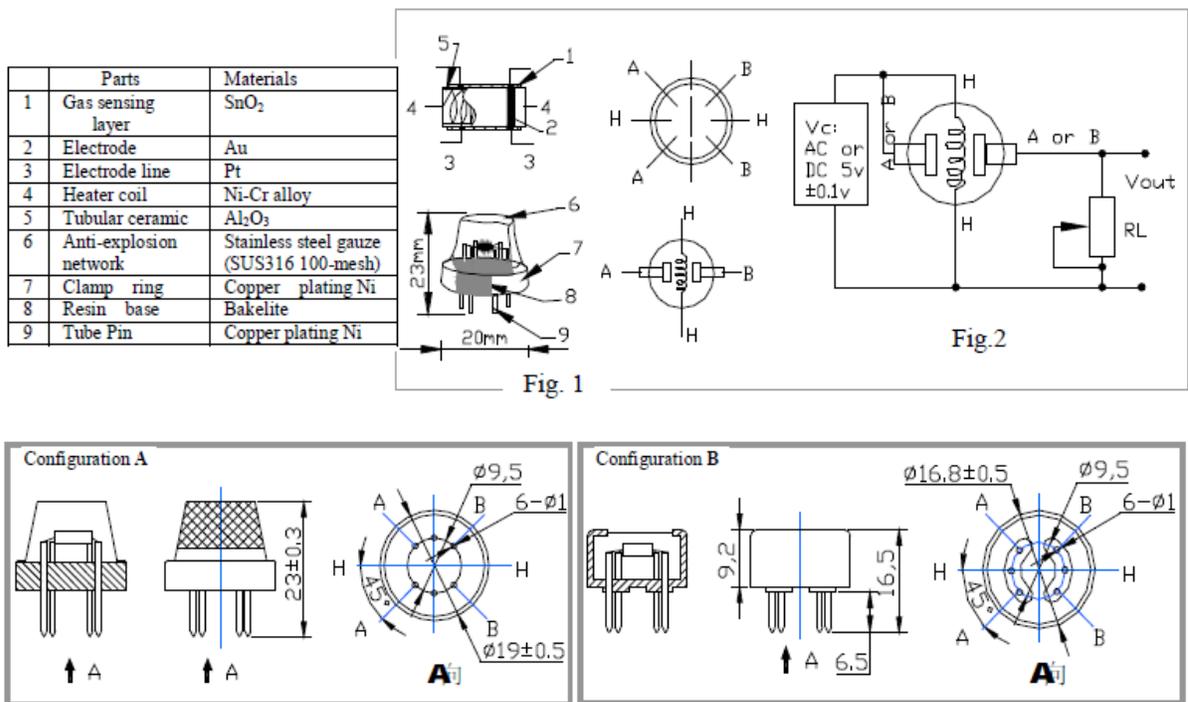


Figura 4-14: Estructura del módulo MQ-3. Fuente: Hanwei Electronics [47]

ANEXO 5: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MÓDULO GPS Neo-6

Parameter	Specification			
Receiver type	50 Channels GPS L1 frequency, C/A Code SBAS: WAAS, EGNOS, MSAS			
Time-To-First-Fix ¹		NEO-6G/Q/T	NEO-6M/V	NEO-6P
	Cold Start ²	26 s	27 s	32 s
	Warm Start ²	26 s	27 s	32 s
	Hot Start ²	1 s	1 s	1 s
	Aided Starts ³	1 s	<3 s	<3 s
Sensitivity ⁴		NEO-6G/Q/T	NEO-6M/V	NEO-6P
	Tracking & Navigation	-162 dBm	-161 dBm	-160 dBm
	Reacquisition ⁵	-160 dBm	-160 dBm	-160 dBm
	Cold Start (without aiding)	-148 dBm	-147 dBm	-146 dBm
	Hot Start	-157 dBm	-156 dBm	-155 dBm
Maximum Navigation update rate		NEO-6G/Q/MT	NEO-6P/V	
		5Hz	1 Hz	
Horizontal position accuracy ⁶	GPS	2.5 m		
	SBAS	2.0 m		
	SBAS + PPP ⁷	< 1 m (2D, R50) ⁸		
	SBAS + PPP ⁷	< 2 m (3D, R50) ⁸		
Configurable Timepulse frequency range		NEO-6G/Q/MP/V	NEO-6T	
		0.25 Hz to 1 kHz	0.25 Hz to 10 MHz	
Accuracy for Timepulse signal	RMS	30 ns		
	99%	<60 ns		
	Granularity	21 ns		
	Compensated ⁹	15 ns		
Velocity accuracy ⁶		0.1m/s		
Heading accuracy ⁶		0.5 degrees		
Operational Limits	Dynamics	≤ 4 g		
	Altitude ¹⁰	50,000 m		
	Velocity ¹⁰	500 m/s		

Figura 4-15: Especificaciones generales para el módulo GPS Neo6. Fuente: U-blox [48]

Parameter	Symbol	Module	Min	Max	Units	Condition
Power supply voltage	VCC	NEO-6G	-0.5	2.0	V	
		NEO-6Q, 6M, 6P, 6V, 6T	-0.5	3.6	V	
Backup battery voltage	V_BCKP	All	-0.5	3.6	V	
USB supply voltage	VDDUSB	All	-0.5	3.6	V	
Input pin voltage	Vin	All	-0.5	3.6	V	
	Vin_usb	All	-0.5	VDDU SB	V	
DC current trough any digital I/O pin (except supplies)	Ipin			10	mA	
VCC_RF output current	ICC_RF	All		100	mA	
Input power at RF_IN	Prfin	NEO-6Q, 6M, 6G, 6V, 6T		15	dBm	source impedance = 50Ω, continuous wave
		NEO-6P		-5	dBm	
Storage temperature	Tstg	All	-40	85	°C	

Figura 4-16: Especificaciones eléctricas del módulo GPS Neo6. Fuente: U-blox [48]

ANEXO 6: COTIZACIÓN DE COMPONENTE EMPRESA AFEL

Afel Ingeniería Spa

76.570.743-9

2 275 95 862

cotizaciones@afel.cl

Obispo Donoso 6, Of. 302, Providencia

martes, 10 de noviembre del 2020

N° COT_958PYF

RUT CLIENTE	19.006.908-7
RAZON SOCIAL	
DIRECCIÓN	PASAJE SANTA ANGELA 958, , CURICO
TELÉFONO	+56948442209
CONTACTO	Francisco Henríquez Briones
FECHA DE CADUCIDAD	miércoles, 11 de noviembre del 2020

CÓDIGO	PRODUCTO / SERVICIO	CANTIDAD	VALOR UN	SUBTOTAL
1123	GPS Ublox NEO-6M v2 con memoria EEPROM	1	\$ 6,714.29	\$ 6,714.29
1821	Pack 20 Cables de Conexión Macho Hembra	1	\$ 1,680.67	\$ 1,680.67
1045	Mini Cargador micro USB Bateria Li-ión Lipo Tp4056	2	\$ 840.34	\$ 1,680.67
1669	Sensor Dsm501A Partículas De Polvo PM2.5	1	\$ 6,302.52	\$ 6,302.52
1296	Sensor de Gas y Alcohol MQ3	1	\$ 2,941.18	\$ 2,941.18
1661	Sensor Monóxido de Carbono CO C.JMCU-811	1	\$ 10,915.97	\$ 10,915.97
1220	Placa DOIT WROOM ESP32 Bluetooth + WiFi	1	\$ 7,563.03	\$ 7,563.03
1473	Filamento PLA+ Negro eSun 1.75mm 1kg.	1	\$ 20,159.66	\$ 20,159.66
1450	Interruptor MTS-102 3 pines	1	\$ 336.13	\$ 336.13
CARGO ENVÍO				\$ 5,472.27
SUBTOTAL				\$ 63,766.39
MONTO NETO				\$ 63,766.39
I.V.A TOTAL				\$ 12,115.61
TOTAL				\$ 75,882

OBSERVACIONES

Regleta macho hembra fuera de stock

ANEXO 7: COTIZACIÓN DE COMPONENTE EMPRESA MECHATRONICSTORE



MECHATRONICSTORE SPA
 R.U.T: 76.954.614-6
 IMPORTADORA DE ARTICULOS ELECTRONICOS Y DE INGENIERIA
 Dirección: LOS MANZANOS 819, Curico
 Email: ventas@mechatronicstore.cl
 Teléfono(s): +56 9 76415188

COTIZACIÓN

N° 325

Fecha emisión: 12 de noviembre de 2020

Señor(es):	Universidad de Talca	RUT:	70.885.500-6
Dirección:	Calle 2 Norte # 685	Comuna:	Talca
Giro:	Enseñanza Superior en Universidades públicas.	Ciudad:	Talca
Contacto:	francisco javier henriquez briones	Validez:	17 de noviembre de 2020
Plazo entrega:	5 días hábiles	Forma pago:	Crédito
Vendedor:	Simon Donoso Bravo	Moneda:	Pesos

Código	Descripción	Cant.	Precio	Dcto.(%)	Recargo	Af/Ex	Valor
315	Sensor de alcohol MQ-3	1	1.932,773			AFECTO	1.933
177	Plataforma de desarrollo ESP32 wifi+bluetooth 4.2	1	7.134,45			AFECTO	7.134
8648	Sensor de Polvo Dsm501A PM2.5 para Partículas De Polvo	1	6.294,117			AFECTO	6.294
1872	Convertidor lógico bidireccional de 5V a 3.3V 4 canales	1	1.504,202			AFECTO	1.504
AJ008	Cables macho macho 30cm	1	2.260,5			AFECTO	2.261
183	Módulo GPS Ublox NEO-6M	1	9.159,664			AFECTO	9.160
197	Controlador TP4056 para bat. litio 5V 1A micro USB	2	1.680,672			AFECTO	3.361
43	Fila de 40 pines macho hembra 5mm	1	588,235			AFECTO	588
N-D-717497	Despacho	1	4.949			AFECTO	4.949

Nº líneas: 9 / Cant: 10

Observaciones generales:

Considerando despacho a domicilio: Región del Maule, comuna de Curicó, ciudad de Curicó, pasaje santa angela #958; Rut de la persona que recibe 19006908-7; Nombre: Francisco Henriquez Briones; CEL: +56948442209 .

Subtotal: \$	37.184
Descto. global %: \$	0
Monto neto: \$	37.184
Monto exento: \$	0
IVA (19%): \$	7.065
Total: \$	44.249