

**PROTOTIPO DE SISTEMA IOT PARA LA DETERMINACIÓN EN TIEMPO
REAL DE LA CONCENTRACIÓN PROMEDIO PONDERADA DE DIÓXIDO
DE CARBONO**

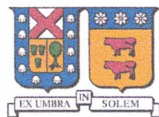
Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de INGENIERO EN
PREVENCIÓN DE RIESGOS
LABORALES Y AMBIENTALES

Alumno:

Román Santibañez Espinoza

Profesor guía:

Ricardo Pastenes Marchant



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: PROTOTIPO DE SISTEMA IOT PARA LA DETERMINACIÓN EN TIEMPO REAL DE LA CONCENTRACIÓN PROMEDIO PONDERADA DE DIÓXIDO DE CARBONO.

Nombre del candidato(a): Roman Santibáñez Espinoza

Carrera / Grado: Ing. en Prevención de Riesgos Laborales y Ambientales

Campus: Concepcion ; **Departamento:** Construcción y Prevención de Riesgos

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Ricardo Pastenes M., en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 31/07/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 31/07/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página-2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

RESUMEN

El presente informe describe el desarrollo de un prototipo de sistema IoT orientado a la determinación en tiempo real de la concentración promedio ponderada (C.P.P.) de agentes químicos en entornos laborales, tomando como caso de estudio el dióxido de carbono (CO₂).

El sistema está compuesto por un sensor MQ-135, una placa Arduino Uno, un módulo RFID para el control operativo, y una pantalla LCD para visualización. Los datos se transmiten a Microsoft Excel vía Data Streamer, permitiendo el cálculo automático de la C.P.P. y el análisis gráfico. Las pruebas realizadas en el Laboratorio N.º1 de Prevención de Riesgos de UTFSM, sede Concepción, validaron su funcionalidad básica, aunque se identificaron limitaciones en la estabilidad del sensor, los resultados evidencian que tecnologías accesibles como Arduino pueden ser la base para herramientas de higiene ocupacional más precisas y dinámicas. Se recomienda futuras iteraciones con sensores infrarrojos no dispersivos (NDIR) y conectividad inalámbrica para mejorar su escalabilidad industrial.

Palabras Clave: *IoT, Dióxido de carbono (CO₂), Concentración promedio ponderada (C.P.P.), Monitoreo en tiempo real, Arduino, Prevención de Riesgos Laborales, Higiene Ocupacional.*

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	5
1. MARCO TEÓRICO.....	6
1.1. RIESGO.....	6
1.2. RIESGO LABORAL	6
1.3. RIESGO HIGIÉNICO.....	6
1.4. RIESGOS FÍSICOS.....	6
1.4.1. Ruido	7
1.4.2. Vibraciones	7
1.4.3. Exposición ocupacional al calor	8
1.4.4. Exposición al frío	8
1.4.5. Iluminación	8
1.4.6. Radiaciones no ionizantes.....	9
1.4.7. Radiaciones ionizantes.....	9
1.4.8. Factores de riesgo de lesión musculoesquelética	9
1.4.9. Hipobaría intermitente crónica por gran altitud	9
1.5. RIESGOS BIOLÓGICOS.....	10
1.6. RIESGOS QUÍMICOS.....	10
1.6.1. Límites de exposición establecidos en Chile	11
1.6.2. Límites de exposición internacionales.....	11
1.6.3. Regulaciones adicionales del Decreto Supremo N.º 594.....	13
1.7. DIÓXIDO DE CARBONO	14
1.7.1. Límites reglamentarios	15
1.7.2. Síntomas según niveles de exposición.....	15
1.7.3. Relación del CO ₂ con la calidad del aire.....	16
1.7.4. Evaluación de la exposición.....	17

1.8.	MARCO LEGAL.....	21
1.8.1.	Código del trabajo (Libro II, Protección de los Trabajadores)	21
1.8.2.	Código Sanitario (Libro III, Título III: Higiene y Seguridad)	21
1.8.3.	Ley 16.744	21
1.8.4.	Decreto Supremo N.º 594.....	22
1.9.	INTERNET OF THINGS (IOT).....	22
1.9.1.	Definición y origen del IoT.....	22
1.9.2.	Aplicaciones clave del IoT.....	23
1.9.3.	Plataformas de desarrollo IoT: Arduino.....	24
1.9.4.	Sensores en sistemas IoT	26
1.9.5.	Protocolos de comunicación en sistemas IoT	27
1.9.6.	Velocidad de transmisión de datos	28
1.9.7.	Experiencias previas en proyectos IoT	29
1.10.	COMPONENTES CLAVE DEL PROTOTIPO.....	30
1.10.1.	Software Arduino IDE	31
1.10.2.	Software Fritzing	31
1.10.3.	Placa Arduino Uno R3	31
1.10.4.	Sensor MQ-135	32
1.10.5.	Modulo LCD 1602 con interfaz I2C.....	33
1.10.6.	Modulo RFID RC522	34
1.10.7.	Breadboard MB-102	35
1.10.8.	Fuente de alimentación	36
1.10.9.	Cables de conexión Jumper.....	37
CAPÍTULO 2: DISEÑO DEL PROTOTIPO		39
2.	DISEÑO DEL PROTOTIPO	40
2.1.	CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN TÉCNICA	40
2.2.	ARQUITECTURA DEL PROTOTIPO.....	43
2.2.1.	Capa Física.....	43
2.2.2.	Capa de comunicación.....	44
2.2.3.	Capa de aplicación.....	45

2.3.	INTEGRACIÓN Y DISEÑO FÍSICO DEL PROTOTIPO	46
2.3.1.	Distribución de conexiones en el prototipo	46
2.3.2.	Disposición física de los componentes	47
2.4.	CALIBRACIÓN DEL SENSOR MQ-135.....	49
2.4.1.	Curvas de sensibilidad y extracción de datos	50
2.4.2.	Procedimiento de calibración.....	52
2.5.	ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS.....	57
2.5.1.	Activación por RFID	58
2.5.2.	Ciclo de mediciones periódicas.....	58
2.5.3.	Conversión de señal analógica a ppm.....	59
2.5.4.	Cálculo de la Concentración Promedio Ponderada	60
2.5.5.	Registro de datos en Excel.....	62
2.5.6.	Visualización en pantalla LCD.....	64
2.6.	DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA.....	66
CAPÍTULO 3: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....		68
3.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	69
3.1.	CALIBRACIÓN DEL SENSOR MQ-135.....	69
3.1.1.	Objetivo	69
3.1.2.	Procedimiento	69
3.1.3.	Resultados	70
3.1.4.	Evidencia	70
3.2.	ENCENDIDO Y COMUNICACIÓN DEL SISTEMA	71
3.2.1.	Objetivo	71
3.2.2.	Procedimiento	71
3.2.3.	Resultados	71
3.2.4.	Evidencia	72
3.3.	CONTROL DE MONITOREO.....	72
3.3.1.	Objetivo	72
3.3.2.	Procedimiento	72
3.3.3.	Resultados	72

3.3.4.	Evidencia	73
3.4.	VERIFICACIÓN DE LECTURA DEL SENSOR MQ-135.....	74
3.4.1.	Objetivo	74
3.4.2.	Procedimiento	74
3.4.3.	Resultados	75
3.5.	VISUALIZACIÓN Y REGISTRO DE DATOS EN EXCEL	75
3.5.1.	Objetivo	75
3.5.2.	Procedimiento	76
3.5.3.	Resultados	76
3.5.4.	Evidencia	76
CAPÍTULO 4:	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	82
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	83
4.1.	FORTALEZAS DEL PROTOTIPO.....	83
4.1.1.	Monitorización en tiempo real	83
4.1.2.	Sensibilidad a variaciones temporales.....	83
4.1.3.	Retroalimentación visual directa.....	84
4.1.4.	Cálculo en tiempo real de métricas críticas	84
4.1.5.	Control operativo mediante RFID	84
4.1.6.	Integración con Microsoft Excel mediante Data Streamer	84
4.2.	LIMITACIONES DEL PROTOTIPO	85
4.2.1.	Inestabilidad en la estimación de CO2	85
4.2.3.	Dependencia de Microsoft Excel y Data Streamer	90
4.2.4.	Perdida de datos y configuración	90
4.2.5.	Dependencia de intervención humana.....	91
4.2.6.	Escalabilidad limitada y automatización restringida.....	92
4.2.7.	Limitaciones del módulo RFID.....	92
4.2.8.	Restricciones por conexión USB y movilidad	92
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		93
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
5.1.	CONCLUSIONES GENERALES.....	94

5.2. VALOR AGREGADO	94
5.2.1. Sinergia con métodos tradicionales	94
5.2.3. Plataforma escalable y multifuncional	95
5.3. RECOMENDACIONES TÉCNICAS	96
5.3.1. Sustitución del sensor MQ-135 por tecnología NDIR	96
5.3.2. Eliminación de la dependencia de Excel y Data Streamer.....	96
5.3.3. Implementación de identificación por UID y base de datos	97
5.3.4. Implementación de alimentación portátil y estable	98
5.3.5. Incorporación de alertas sonoras y lumínicas	98
5.4. CONSIDERACIONES ÉTICAS	99
5.5. REFLEXIÓN FINAL	100
BIBLIOGRAFÍA	102
ANEXOS	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Calidad del aire interior según nivel de CO₂.

Figura 1-2. Principio de funcionamiento sensor electroquímico.

Figura 1-3. Principio de funcionamiento sensor catalítico.

Figura 1-4. Principio de funcionamiento de sensor NDIR.

Figura 1-5. Placa Arduino Uno.

Figura 1-6. Sensor MQ-135.

Figura 1-7. Modulo LCD 1602 con interfaz I2C.

Figura 1-8. Modulo RFID RC522.

Figura 1-9. Breadboard

Figura 1-10. Cable USB tipo A-B.

Figura 1-11. Cable jumper macho-macho.

Figura 1-12. Cable jumper macho-hembra.

Figura 2-1. Fotografía del Prototipo.

Figura 2-2. Representación digital del prototipo en plataforma Fritzing.

Figura 2-3. Extracto de código de calibración “Calcular RS”.

Figura 2-4. Código de calibración.

Figura 2-5. Diagrama de flujo de proceso de calibración.

Figura 2-6. Extracto de código principal “Activación del sistema por RFID”.

Figura 2-7. Extracto de código principal “Mediciones periódicas”.

Figura 2-8. Extracto de código principal “Lectura en ppm”.

Figura 2-9. Declaración de variables para cálculo de C.P.P.

Figura 2-10. Extracto de código principal “Funciones para calcular C.P.P.”

Figura 2-11. Extracto de código principal “Registro continuo”.

Figura 2-12. Extracto de código principal “Inserción de mensaje de inactividad”.

Figura 2-13. Extracto de código principal “Visualización de mensaje inicial”.

Figura 2-14. Extracto de código principal “Visualización del estado del sistema”.

Figura 2-15. Extracto de código principal “Visualización de concentraciones”.

Figura 2-16. Flujo operativo de registro, análisis y visualización de datos.

Figura 3-1. Resultados en Monitor Serial de Arduino IDE.

Figura 3-2. Pantalla LCD mostrando el mensaje inicial.

Figura 3-3. Pantalla LCD en estado “Monitoreo Activo”.

Figura 3-4. Pantalla LCD en estado “Monitoreo Inactivo”.

Figura 3-5. Registro en Microsoft Excel mostrando inserción de mensaje inactividad.

Figura 3-6. Visualización de lecturas en ppm en pantalla LCD.

Figura 3-7. Visualización de métricas calculadas junto con mensaje de inactividad.

Figura 3-8. Visualización de métricas calculadas en tiempo real.

Figura 4-1. Perturbación en el monitoreo.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Rango estimado de costos por componente.

Tabla 2-2. Distribución de los componentes y sus conexiones.

Tabla 2-3. Registro continuo de datos con manejo de pausas y cálculo de C.P.P.

Tabla 2-4. Alternancia de estados.

Tabla 3-1. Ambiente de calibración.

Tabla 3-2. Parámetros registrados en Microsoft Excel.

Tabla 4-1. Impacto de la variabilidad en la concentración estimada de CO₂.

Tabla 4-2. Variabilidad de RS y su efecto sobre la estimación de CO₂.

Tabla 4-3. Ambigüedad en hoja de cálculo.

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-1. Determinación de TLV-TWA.

Ecuación 1-2. Determinación de C.P.P.

Ecuación 2-1. Lectura de concentración en partes por millón

Ecuación 2-2. Lectura de voltaje de salida de sensor MQ-135.

Ecuación 2-3. Determinación de Resistencia del sensor MQ-135.

Ecuación 2-4. Determinación de Resistencia base del sensor MQ-135.

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

SIGLA

ACGIH :	American Conference of Governmental Industrial Hygienist
AWG :	American Wire Gauge
CSV :	Comma-Separated Values
IA :	Inteligencia Artificial
NIOSH :	National Institute for Occupational Safety and Health
OSHA :	Occupational Safety and Health Administration
UTFSM :	Universidad Técnica Federico Santa María
~ :	Aproximadamente
\$:	Dólar Estadounidense
° :	Grados
± :	Mas menos
Σ :	Sumatoria

SIMBOLOGÍA

A	:	Amperio
C	:	Celsius
cm	:	Centímetro
kB	:	Kilobyte
kg	:	Kilogramo
k Ω	:	Kilohmio
m	:	Metro
m ³	:	Metro cúbico
mA	:	Miliamperio
mg	:	Miligramos
MHz	:	Megahercios
ppm	:	Partes por millón
s	:	Segundo
V	:	Voltio
Ω	:	Ohmio

INTRODUCCIÓN

CONTEXTO Y PROBLEMÁTICA

En entornos laborales con presencia de agentes químicos, el monitoreo de la exposición es una tarea clave para garantizar la salud ocupacional. Tradicionalmente, cuando se trabaja en presencia de agentes químicos de alta peligrosidad, se recurre al uso de dispositivos de monitoreo personal, como detectores de multigases o sistemas de monitoreo ambiental que generan alertas al superar umbrales predefinidos, permitiendo prevenir riesgos inmediatos. Sin embargo, este enfoque no cuantifica la exposición ponderada de los trabajadores a lo largo de la jornada laboral.

Por otro lado, los métodos de muestreo permiten obtener valores promedio representativos, útiles para la verificación del cumplimiento normativo en condiciones específicas. Cuando se siguen correctamente los protocolos establecidos, estos resultados pueden reflejar de manera adecuada la exposición durante una jornada laboral determinada. Sin embargo, su representatividad puede verse comprometida frente a cambios en el proceso productivo, cambios en las condiciones ambientales, turnos, estaciones del año o incluso entre días consecutivos. Además, este tipo de medición no permite visualizar variaciones instantáneas, como picos de concentración, que pueden tener un impacto significativo en la salud de los trabajadores.

Estas limitaciones evidencian la necesidad de desarrollar soluciones integradas que combinen el monitoreo continuo con algoritmos de análisis dinámico, lo que no solo permitiría detectar peligros inmediatos, sino también calcular en tiempo real la concentración promedio ponderada. Esta integración representa un avance hacia una gestión preventiva eficaz, basada en datos completos y accesibles.

PROPUESTA DEL PROYECTO

Considerando las limitaciones de los enfoques tradicionales de monitoreo ambiental, este proyecto propone el desarrollo de un prototipo de un sistema inteligente que permita una vigilancia más continua y accesible de agentes químicos en el lugar de trabajo. Para ello, se diseña un prototipo de sistema IoT (Internet de las Cosas) de bajo

costo y de código abierto, orientado a facilitar la medición en tiempo real de la exposición de los trabajadores.

Como caso de estudio, se utiliza el dióxido de carbono (CO₂), dada su relevancia como indicador de ventilación, su bajo índice de peligrosidad y su presencia constante en ambientes interiores. El sistema está compuesto por un sensor de calidad del aire que realiza un muestreo de alta frecuencia, cuyos datos son procesados directamente por un microcontrolador. Este procesamiento permite calcular la concentración promedio ponderada (C.P.P.) a lo largo de la jornada laboral, entregando información más representativa del nivel de exposición.

Finalmente, los resultados se visualizan de forma automática a través de una interfaz construida en Microsoft Excel, mientras que la interacción del usuario con el sistema se realiza mediante una interfaz intuitiva basada en identificación por radiofrecuencia (RFID), lo que simplifica su operación en entornos reales.

Su diseño se enmarca en la iniciativa “Ingeniería 2030” de la UTFSM, específicamente en la línea “Sistema de monitoreo en tiempo real de la exposición a agentes de riesgo en el lugar de trabajo basado en IoT”. Se priorizó un enfoque modular y escalable, capaz de ser adaptado a distintos entornos y contaminantes mediante modificaciones en el firmware¹ y hardware².

Este proyecto está dirigido a estudiantes y profesionales del área, con el fin de fomentar el desarrollo de soluciones innovadoras que contribuyan a la mejora continua de la seguridad en el trabajo.

OBJETIVO GENERAL

Establecer un prototipo de sistema IoT para la determinación en tiempo real de la concentración promedio ponderada de agentes químicos, utilizando como caso de estudio el dióxido de carbono.

¹ Software específico que está grabado en la memoria de un dispositivo electrónico, diseñado para controlar funciones de bajo nivel del hardware.

² Conjunto de componentes físicos y electrónicos que conforman un sistema informático o dispositivo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un sistema de monitoreo en tiempo real que integre un sensor de CO₂ y un módulo RFID, permitiendo iniciar o detener las mediciones a través de una tarjeta.
- Desarrollar una lógica de cálculo directamente en el microcontrolador del sistema, de manera que este pueda procesar localmente los datos recolectados por el sensor, calculando automáticamente y en tiempo real la concentración promedio ponderada de CO₂, a partir de datos obtenidos en intervalos de un segundo.
- Implementar un sistema de registro y visualización de datos en Microsoft Excel mediante transmisión serial, facilitando la representación gráfica sin interferir con los cálculos realizados por el microcontrolador.
- Validar el funcionamiento del prototipo evaluando la precisión en el cálculo de la C.P.P. y la eficacia del control del monitoreo a través del módulo RFID.

CONTRIBUCIONES ESPERADAS

El prototipo desarrollado busca demostrar que es posible aplicar tecnologías de bajo costo para abordar desafíos relevantes en higiene ocupacional, especialmente en contextos donde los recursos son limitados. En particular, se orienta a ofrecer una solución accesible para micro y pequeñas empresas, que muchas veces carecen de los medios para implementar sistemas avanzados de monitoreo ambiental.

Además, el proyecto sienta una base técnica que puede ser utilizada en futuras investigaciones sobre monitoreo continuo, y fomenta el uso de herramientas modernas como la inteligencia artificial para facilitar tanto el aprendizaje técnico como el desarrollo de soluciones aplicadas en entornos reales.

ESTRUCTURA DEL INFORME

El informe se organiza en cinco secciones:

- Capítulo N.º 1: MARCO TEÓRICO
- Capítulo N.º 2: DISEÑO DEL PROTOTIP

Capítulo N.º 3:

- PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Capítulo N.º 4:

- ANÁLISIS DE RESULTADOS

- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO

1.1. RIESGO

El riesgo es la combinación de la probabilidad de que ocurra un evento peligroso y la severidad de las consecuencias negativas que dicho evento podría generar. Está compuesto por tres elementos: el peligro, que es cualquier fuente, situación o condición con potencial de causar lesiones o afectar la salud de las personas; la probabilidad, entendida como la posibilidad de que el peligro se materialice; y la consecuencia, que representa la gravedad del efecto adverso que podría derivarse de ese evento.

1.2. RIESGO LABORAL

“Es la posibilidad de que las personas trabajadoras sufran un daño a su vida o salud, a consecuencia de los peligros involucrados en la actividad laboral, considerando la probabilidad que el daño ocurra y la gravedad de este” [14].

1.3. RIESGO HIGIÉNICO

Es posibilidad de que un trabajador sufra un daño por la exposición de agentes físicos o químicos con la potencialidad de generar lesiones, patologías, enfermedades o la muerte. La mayor parte de las veces sus efectos van en función de la dosis recibida, o sea, por los niveles de contaminación a los que han estado expuestos y por el tiempo de exposición a estos.

1.4. RIESGOS FÍSICOS

Los efectos causados por agentes físicos se deben a un intercambio de energía entre el individuo y el ambiente, a una velocidad y potencial mayor a la que el organismo puede soportar, lo que puede producir una enfermedad profesional [10].

El Decreto Supremo N.º 594 señala los principales agentes físicos de riesgo ocupacional, cada uno de estos agentes puede afectar la salud de los trabajadores si su exposición excede los límites establecidos.

1.4.1. Ruido

Cualquier variación de presión que el sistema auditivo pueda percibir, es cuantificable a través de la intensidad y frecuencia. Desde una mirada subjetiva el ruido es un sonido molesto que produce daño o interfiere en la transmisión, percepción o interpretación de un sonido sutil [22].

La exposición prolongada a niveles elevados de ruido en el lugar de trabajo puede generar una enfermedad profesional denominada hipoacusia sensorineural laboral (HSNL). Esta condición se caracteriza por la disminución de la capacidad auditiva debido a un trauma acústico crónico, que afecta principalmente las células ciliadas externas del oído, responsables de la sensibilidad auditiva [25].

1.4.2. Vibraciones

La vibración es un movimiento oscilatorio de partículas en sólidos que, al penetrar el cuerpo, puede afectar la salud de los trabajadores.

1.4.2.1. Exposición mano-brazo

La vibración que afecta al sistema mano-brazo, supone riesgos como problemas vasculares, óseos, nerviosos o musculares. Esta se produce por el contacto con superficies vibrantes o sometidas a una vibración de impacto [23].

1.4.2.2. Exposición cuerpo entero

La vibración mecánica transmitida al cuerpo puede afectar la salud de los trabajadores, causando principalmente lumbalgias y lesiones en la columna. Esta se produce al estar en contacto con superficies vibrantes, como asientos o suelos, o sometidas a vibraciones de impacto [23].

1.4.3. Exposición ocupacional al calor

La exposición ocupacional al calor resulta de factores como temperatura, humedad, velocidad del aire y calor radiante, medidos por el Índice de Temperatura de Globo y Bulbo Húmedo (TGBH) [26].

El estrés térmico acumulado puede superar la capacidad del cuerpo para mantener su temperatura interna, provocando efectos como síncope, deshidratación, pérdida de electrolitos, agotamiento, fatiga, náuseas, y en casos extremos, golpe de calor, una condición peligrosa que requiere atención médica por el riesgo de hipertermia severa [32].

1.4.4. Exposición al frío

La exposición ocupacional al frío implica una combinación de bajas temperaturas y corrientes de aire que reducen la temperatura corporal a 36°C o menos [9]. Los efectos incluyen dolor y reducción de capacidad física a medida que disminuye la temperatura interna, afectando especialmente destrezas finas a 30-31°C y movimientos amplios a menos de 20°C. La exposición puede causar problemas respiratorios, cardiovasculares, estrés metabólico, lesiones como congelación superficial, profunda e hipotermia, la cual, en casos extremos, puede provocar inconsciencia y alteraciones cardíacas a temperaturas internas de 28°C [31].

1.4.5. Iluminación

La iluminación se entiende como la cantidad de luz en un espacio de trabajo, suficiente para realizar tareas visuales de manera eficiente y segura. Una buena iluminación es fundamental para garantizar espacios de trabajos seguros y confortables. Una iluminación deficiente conlleva a la apreciación errónea de la posición, forma o velocidad de un objeto provocando errores y accidentes, debidos, en la mayoría de los casos, a la falta de visibilidad. Además, puede provocar fatiga visual, dolores de cabeza e irritación ocular, esto puede influir en el sueño y la salud en general, en casos de luz insuficiente o deslumbrante los trabajadores pueden experimentar estrés y otras afecciones psicológicas [35].

1.4.6. Radiaciones no ionizantes

La radiación no ionizante es toda radiación y los campos del espectro electromagnético que no tienen suficiente energía para ionizar la materia, como la radiación infrarroja, la luz visible, la radiación ultravioleta, radiofrecuencias y microondas. La radiación no ionizante es incapaz de impartir suficiente energía a una molécula o átomo para alterar su estructura quitándole uno o más electrones [34].

1.4.7. Radiaciones ionizantes

La radiación ionizante es un tipo de radiación de alta energía que puede eliminar electrones de átomos o moléculas, provocando su ionización. Este tipo de radiación tiene la capacidad de generar cambios químicos en las células, dañando el ADN y afectando los genes, cromosomas y la supervivencia celular. Las radiaciones ionizantes pueden causar alteraciones en tejidos, lo que aumenta el riesgo de mutaciones genéticas, enfermedades graves como el cáncer y otras lesiones celulares [33].

1.4.8. Factores de riesgo de lesión musculoesquelética

Los factores de riesgo asociados a trastornos musculoesqueléticos son elementos o condiciones presentes en el entorno laboral o durante la ejecución de tareas ocupacionales que incrementan la probabilidad de desarrollar alteraciones o lesiones en los músculos, huesos, tendones y articulaciones del sistema musculoesquelético [28].

Los trastornos musculoesqueléticos pueden deberse a factores individuales, condiciones de trabajo como fuerza, postura y repetición, aspectos organizacionales como jornadas, turnos y ritmo laboral, así como condiciones ambientales como vibraciones o temperaturas extremas [28].

1.4.9. Hipobaria intermitente crónica por gran altitud

La Nota Técnica N.º 19 “Trabajo en altura geográfica en Chile” señala que cuanto más aumenta la altitud la presión atmosférica decrece lo que supone una menor presión parcial de oxígeno, lo cual limita el transporte de oxígeno a los tejidos corporales produciendo el estado conocido como hipoxia, siendo esta el factor principal responsable de los efectos negativos de la altitud sobre la salud humana. El mal de altura es un término que abarca los diferentes cuadros clínicos que un trabajador puede experimentar trabajando a gran altitud, estos pueden ir desde malestares leves hasta condiciones potencialmente fatales,

como edema pulmonar o edema cerebral. Los síntomas del mal de altura varían dependiendo de la intensidad y velocidad de aparición de la hipoxia. Los principales síntomas y signos son la cefalea, insomnio, disminución del apetito (puede llevar a la anorexia), náuseas, mareos, disnea, volumen de orina reducido, vómitos, laxitud, torpeza motora, entre otros [27].

1.5. RIESGOS BIOLÓGICOS

Los riesgos biológicos son aquellos que causan enfermedades comunes, pero cuyo contagio se adquiere por razones de trabajo. Las personas que pueden verse expuestas a los agentes biológicos son principalmente campesinos, veterinarios y trabajadores de hospitales. Los agentes biológicos a diferencia de los agentes físicos y químicos no tienen un umbral claro de exposición que cause enfermedad, pueden confundirse con enfermedades comunes y, en ocasiones, no son exclusivamente del trabajo, ya que también pueden encontrarse en el hogar, como los hongos o parásitos. Los agentes biológicos se dividen en dos grupos, los inanimados (como pelos de animales y algunas maderas que causan principalmente alergias) y animados (como parásitos, hongos, bacterias y virus, que son los más comunes) [10].

1.6. RIESGOS QUÍMICOS

Los riesgos químicos son agentes ambientales presentes en el aire, que al ingresar al organismo por las vías respiratorias, cutánea o digestiva pueden generar una enfermedad profesional. Los riesgos se presentan en el ambiente en forma de polvos, gases, vapores, rocíos, nieblas y humos metálicos [10].

Los agentes químicos pueden encontrarse como sustancias orgánicas, inorgánicas, naturales o sintéticas, en cualquiera de sus estados de agregación, y cuya presencia en el ambiente laboral puede originar alteraciones en la salud de las personas. Estos pueden causar diversos efectos nocivos sobre la salud humana, dependiendo del tipo de sustancia, la dosis, tiempo de exposición y la susceptibilidad individual. Los efectos de los agentes químicos sobre la salud pueden variar considerablemente incluyendo irritaciones, intoxicaciones, efectos sistémicos, alteraciones a corto y largo plazo y, en algunos casos la muerte [41].

1.6.1. Límites de exposición establecidos en Chile

El Decreto Supremo N.º 594 del Ministerio de Salud de Chile establece los valores límite permisibles para varios compuestos químicos en los ambientes de trabajo. Estos límites se basan en estudios epidemiológicos, clínicos y experimentales internacionales y están diseñados para asegurar que la mayoría de los trabajadores sanos no sufran alteraciones en su salud si están expuestos a concentraciones inferiores a esos límites durante su vida laboral [15].

1.6.1.1. Límite permisible ponderado (LPP)

Como el valor máximo permitido para el promedio ponderado de las concentraciones ambientales de contaminantes químicos existentes en los lugares de trabajo durante la jornada normal de 8 horas diarias, con un total de 45 horas semanales.

1.6.1.2. Límite permisible temporal (LPT)

Como el valor máximo permitido para el promedio ponderado de las concentraciones ambientales de contaminantes químicos existentes en los lugares de trabajo, medidas en un periodo de 15 minutos continuos dentro de la jornada de trabajo. Este límite no podrá ser excedido en ningún momento

1.6.1.3. Límite permisible absoluto (LPA)

Como valor máximo permitido para las concentraciones ambientales de contaminantes químicos medida en cualquier momento de la jornada de trabajo.

1.6.2. Límites de exposición internacionales

En el contexto internacional, entidades gubernamentales estadounidenses como OSHA, ACGIH y NIOSH presentan límites permisibles de exposición a agentes químicos en el ambiente laboral a través del concepto de TLV (Valor Límite Umbral). Los TLV se refieren a las concentraciones de sustancias químicas en el aire y representan condiciones bajo las cuales se considera que casi todos los trabajadores pueden estar expuestos repetidamente, día tras día, a lo largo de su vida laboral, sin sufrir efectos adversos para la salud. Existen cuatro categorías principales de TLV [1]:

1.6.2.1. Valor limite umbral – promedio ponderado en el tiempo (TLV-TWA)

Es la concentración media ponderada durante una jornada laboral convencional de 8 horas y una semana de 40 horas, a la que se cree que casi todos los trabajadores pueden estar expuestos repetidamente día tras día, durante toda su vida laboral sin efectos adversos.

OSHA, en el Código de Regulaciones Federales de los Estados Unidos de América, establece que el cálculo del TLV-TWA se realiza aplicando la formula [43]:

$$TWA = \frac{\sum(C_i * T_i)}{\sum T_i}$$

Ecuación 1-1. Determinación de TLV-TWA.

En Chile a este promedio ponderado en el tiempo se le conoce como Concentración Promedio Ponderada (C.P.P.) y se emplea de manera sinónima para evaluar la exposición a agentes químicos, de acuerdo con lo establecido en el Decreto Supremo N.º 594, utilizando la formula:

$$CPP = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i * t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

Ecuación 1-2. Determinación de C.P.P.

1.6.2.2. Valor limite umbral – Limite de exposición a corto plazo (TLV-STEL)

Establece una exposición de 15 minutos que no debe superarse en ningún momento de la jornada, incluso si el TWA de 8 horas se encuentra dentro del TLV-TWA, y se define como la concentración a la que se cree que casi todos los trabajadores pueden estar expuestos de forma continua durante un corto periodo de tiempo sin sufrir irritación, daño tisular crónico o irreversible, efectos tóxicos dependientes de la tasa de dosis, o narcosis en grado suficiente para aumentar la probabilidad de lesiones accidentales, interferir con el auto-rescate o reducir significativamente la eficiencia laboral.

1.6.2.3. Valor límite umbral – Límite de superficie (TLV-SL)

Corresponde a la concentración en equipos y superficies de instalaciones en el lugar de trabajo que no es probable que produzca efectos adversos tras el contacto directo o indirecto.

1.6.2.4. Valor límite umbral – techo (TLV-C)

Es la concentración que no debe superarse durante ningún periodo de la exposición laboral.

1.6.3. Regulaciones adicionales del Decreto Supremo N.º 594

1.6.3.1. Control de exposición

El promedio ponderado de las concentraciones ambientales de contaminantes químicos no debe superar los límites permisibles ponderados establecidos en el artículo N.º 66 del reglamento. Se podrán exceder momentáneamente estos límites, pero en ningún caso superar cinco veces su valor. Con todo, respecto de aquellas sustancias para las cuales se establece además un límite permisible temporal, tales excesos no podrán superar estos límites.

Tanto los excesos de los límites permisibles ponderados, como la exposición a límites permisibles temporales, no podrán repetirse más de cuatro veces en la jornada diaria, ni más de una vez en una hora.

1.6.3.2. Factores de reducción por jornada extendida y altitud

Deberá aplicarse un factor de reducción a los LPP cuando la jornada laboral sobrepase las 8 horas diarias. Asimismo, en los lugares de trabajo que se encuentren a una altura superior a 1000 metros sobre el nivel del mar se deberá aplicar un factor de reducción a los LPP, LPT y LPA.

1.6.3.3. Sustancias con absorción cutánea

Las sustancias que llevan el calificativo “piel” son aquellas que pueden ser absorbidas a través de la piel humana. Con ellas deberán adoptarse todas las medidas necesarias para impedir el contacto con la piel de los trabajadores y se extremarán las medidas de protección y de higiene personal.

1.6.3.4. Clasificación de sustancias cancerígenas

- A.1: Cancerígenas comprobadas para humanos.
- A.2: Sospechosas de ser cancerígenas para humanos.
- A.3: Cancerígenas para animales de laboratorio (no demostrado en humanos).
- A.4: En estudio sin evidencia suficiente para ser clasificadas.

1.6.3.5. Efectos combinados de sustancias, artículo N.º 69

Si dos o más sustancias de las enumeradas en el artículo número 66 actúan de igual manera sobre el organismo humano, se evalúa su efecto combinado sumando las fracciones de cada concentración dividida por su respectivo LPP. La suma no debe ser mayor a 1. Si las sustancias actúan de forma independiente o sobre órganos distintos, se evalúan individualmente respecto a su LPP.

1.7. DIÓXIDO DE CARBONO

El dióxido de carbono o anhídrido carbónico (CO₂) es un gas incoloro, inodoro e incombustible naturalmente presente en el aire. Se genera como producto de la respiración de los seres vivos y de procesos de combustión. Los niveles de CO₂ en el aire exterior suelen oscilar entre 300 y 400 ppm, pero pueden alcanzar entre 600 y 900 ppm en áreas metropolitanas. Aunque se presenta comúnmente como gas el CO₂ también puede existir de forma sólida como hielo seco [51].

En condiciones normales no presenta riesgos significativos para la salud debido a sus bajas concentraciones ambientales. Sin embargo, con una densidad de 1,98 kg/m³, superior a la del aire, tiende a acumularse en zonas bajas de espacios cerrados o con ventilación insuficiente, lo que incrementa el riesgo para la salud de los trabajadores [4].

Actúa como asfixiante simple, desplazando el oxígeno y a concentraciones superiores a 30.000 ppm puede provocar dolor de cabeza, mareo, somnolencia y dificultades respiratorias, dependiendo del nivel y tiempo de exposición [29].

1.7.1. Límites reglamentarios

1.7.1.1. Normativa nacional

Según el Decreto Supremo N.º 594 [15], los límites permisibles para la exposición a anhídrido carbónico (CO₂) son los siguientes:

- LPP: 4375 ppm o 7875 mg/m³.
- LPT: 30000 ppm o 54000 mg/m³.

Estándares internacionales (OSHA, NIOSH y ACGIH) [44]:

- TLV-TWA (límite de exposición promedio ponderado en el tiempo): 5000 ppm.
- TLV-STEL (límite para exposiciones de corta duración, 15 minutos): 30000 ppm.

1.7.2. Síntomas según niveles de exposición

De acuerdo con el FSIS Environmental, Safety and Health Group [51], los síntomas relacionados con la exposición a diferentes concentraciones del contaminante son los siguientes:

- 10,000 ppm (1.0%): Generalmente sin efectos; posible somnolencia.
- 15,000 ppm (1.5%): Estimulación respiratoria leve en algunas personas.
- 30,000 ppm (3.0%): Estimulación respiratoria moderada, aumento de la frecuencia cardíaca y de la presión arterial.
- 40,000 ppm (4.0%): Inmediatamente peligroso para la vida o la salud (IDLH).
- 50,000 ppm (5.0%): Fuerte estimulación respiratoria, mareos, confusión, dolor de cabeza, dificultad para respirar.
- 80,000 ppm (8.0%): Visión borrosa, sudoración, temblores, pérdida del conocimiento y posible muerte.

Cabe señalar que estas concentraciones son altamente inusuales en ambientes interiores no industriales, como en oficinas, aulas y servicios en general.

1.7.3. Relación del CO₂ con la calidad del aire

El CO₂ es un parámetro clave en la determinación de la calidad del aire, este se usa como indicador del nivel general de contaminación del aire en relación con la presencia de seres humanos en el interior. Según la norma española NTP M.^a 742: “Ventilación General de Edificios” [30], la calidad del aire interior en zonas ocupadas donde no se permite fumar se clasifica en cuatro categorías

- IDA 1: Calidad del aire interior alta
- IDA 2: Calidad del aire interior media
- IDA 3: Calidad del aire interior moderada
- IDA 4: Calidad del aire interior baja

CATEGORÍA	NIVELES DE CO ₂ DEL AIRE SOBRE EL NIVEL EXTERIOR ppm	
	Intervalo típico	Valores por defecto
IDA 1	≥ 400	350
IDA 2	400 - 600	500
IDA 3	600 – 1.000	800
IDA 4	>1.000	1.200

Figura 1-1. Calidad del aire interior según nivel de CO₂.

Fuente: NTP. 742: “Ventilación General de Edificios” [30].

1.7.4. Evaluación de la exposición

1.7.4.1. Procedimientos

En higiene ocupacional, una de las tareas clave es evaluar los riesgos por inhalación de agentes químicos peligrosos, lo cual implica medir sus concentraciones en el aire. El objetivo es obtener datos válidos y representativos de la exposición de los trabajadores para su comparación con el valor límite permisible.

La medición representativa de la exposición laboral presenta desafíos técnicos y económicos, especialmente debido a la variabilidad de las condiciones de trabajo, los procesos involucrados y la naturaleza cambiante de las exposiciones. Evaluar con certeza que la exposición a agentes químicos no supera el límite permitido requeriría monitorear a cada trabajador cada día, lo que no es viable ni práctico para la mayoría de los agentes químicos listados en el Decreto Supremo N.º 594 debido a las limitaciones de las técnicas de medición y su coste.

Una forma de abordar el problema es aplicar la norma UNE-EN 689:2019 [21], que establece un procedimiento para manejar la variabilidad con pocas mediciones y demostrar con alta confianza que la exposición de los trabajadores no supera los límites establecidos. La norma UNE-EN 689:2019 contempla:

- Evaluación inicial
- Caracterización básica
- Estrategia de muestreo
- Mediciones de exposición
- Validación de resultados
- Formación de grupos de exposición similar (GES)
- Comparación de los resultados con límites permisibles
- Elaboración de informes técnicos
- Reevaluación periódica

El higienista ocupacional es responsable de seleccionar procedimientos de medición y muestreo que cumplan con los requisitos señalados en las normas técnicas y documentos de referencia. En este sentido una fuente de información y consulta son los Protocolos para la Toma de Muestras de Agentes Químicos publicados por el Instituto de Salud Pública de Chile (ISPCH), el Manual Básico Sobre Mediciones y Toma de Muestras Ambientales y Biológicas en Salud Ocupacional del ISPCH, además de Normas Internacionales.

Aunque el manual básico sobre mediciones y toma de muestras ambientales y biológicas en salud ocupacional del ISPCH [24], no señala un procedimiento para el muestro de CO₂, tanto NIOSH como OSHA proponen métodos analíticos reconocidos:

- NIOSH 6603 [42]
- OSHA 1027 [44]

Ambos métodos emplean cromatografía de gases con detector de conductividad térmica (TCD). La muestra de aire pasa a través de una columna de separación en el cromatógrafo donde los componentes se separan en función de sus propiedades químicas. El TCD mide cambios en la conductividad del gas al compararlo con un gas de referencia (como helio o nitrógeno). Cuando el CO₂ pasa por el TCD, cambia la conductividad térmica del flujo de gas, produciendo una señal eléctrica proporcional a su concentración en la muestra. Esta señal se registra y se analiza para determinar la cantidad de CO₂ en la muestra, permitiendo obtener mediciones precisas de su concentración en el aire.

1.7.4.2. Equipos de medición

Los equipos de medición instantánea como los detectores multigases, ofrecen lecturas en tiempo real de CO₂ y otros gases en el ambiente. Estos equipos son portátiles y de respuesta rápida, lo cual es especialmente útil en áreas de trabajo cerradas o en procesos industriales. Estos dispositivos están equipados con diversos tipos de sensores, como electroquímicos, catalíticos e infrarrojos, cada uno diseñado para detectar gases específicos. Esta versatilidad les permite adaptarse a diferentes necesidades de monitoreo, proporcionando datos precisos y alertas inmediatas para garantizar la seguridad ambiental.

1.7.4.3. Sensores electroquímicos

Los sensores electroquímicos miden gases específicos mediante reacciones químicas que generan una corriente eléctrica proporcional a la concentración del gas. El gas pasa a través de una membrana permeable en el sensor y reacciona con un electrólito interno. Esta reacción produce un cambio en el flujo de electrones, que se traduce en una señal eléctrica. Aunque los sensores electroquímicos son más comunes para gases como el oxígeno o monóxido de carbono, pueden ser diseñados para detectar CO₂ [16].

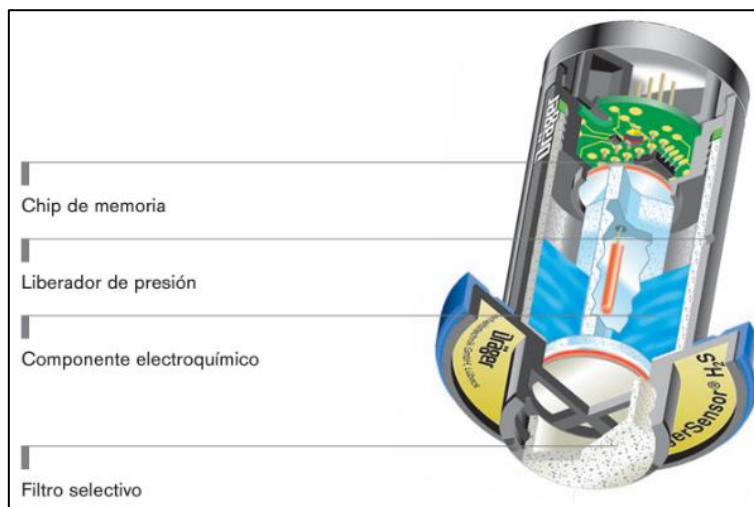


Figura 1-2. Principio de funcionamiento sensor electroquímico.

Fuente: DRÄGER [16].

1.7.4.4. Sensores Catalíticos

Estos sensores emplean un elemento sensible revestido con un material catalítico que oxida el gas al calentarse. El proceso de oxidación genera calor, lo que cambia la resistencia eléctrica del sensor. Este cambio es proporcional a la concentración del gas. Sin embargo, para CO₂ específicamente, estos sensores tienen aplicaciones limitadas debido a que el CO₂ no es inflamable y no genera calor significativo durante su oxidación [16].

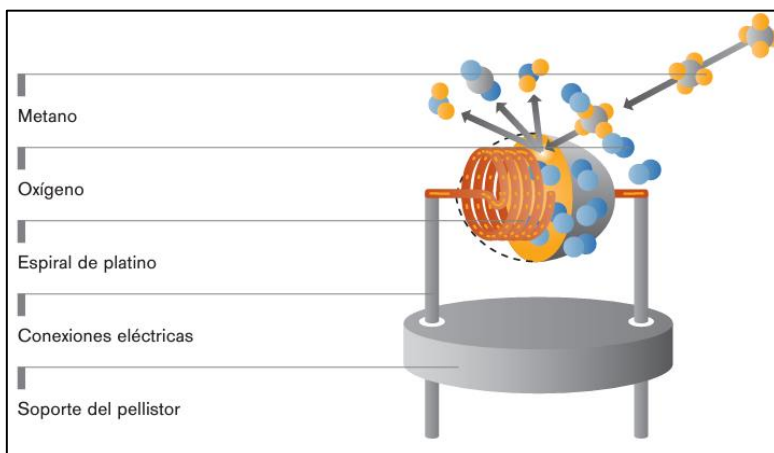


Figura 1-3. Principio de funcionamiento sensor catalítico.

Fuente: DRÄGER [16].

1.7.4.5. Sensores NDIR

Los sensores infrarrojos no dispersivos (NDIR) funcionan midiendo la absorción de luz infrarroja en una longitud de onda específica correspondiente al CO_2 . El sensor emite un haz de luz infrarroja que atraviesa la muestra de aire, y un detector mide cuánta luz ha sido absorbida. La cantidad de luz absorbida es proporcional a la concentración de CO_2 en el aire [16].

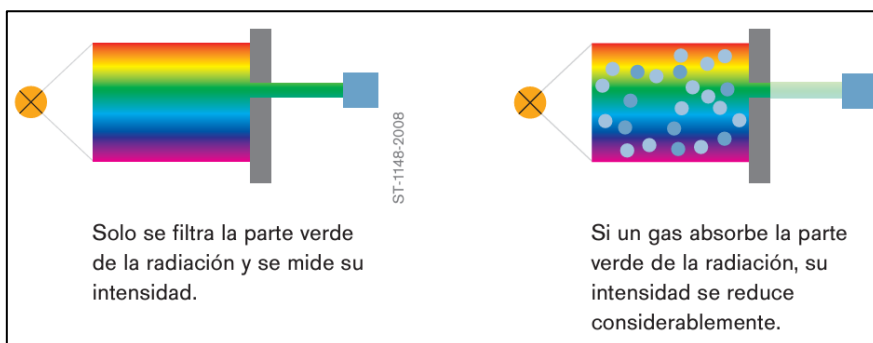


Figura 1-4. Principio de funcionamiento de sensor NDIR.

Fuente: DRÄGER [16].

1.8. MARCO LEGAL

Este proyecto se enmarca en el cumplimiento de la normativa chilena vigente en materia de prevención de riesgos, seguridad laboral y salud ocupacional, con el objetivo de garantizar estándares legales y fortalecer la protección integral de los trabajadores. A continuación, se detallan los principales instrumentos legales que sustentan su implementación.

1.8.1. Código del trabajo (Libro II, Protección de los Trabajadores)

El artículo N.º184 del Código del Trabajo establece que el empleador tiene la obligación de tomar todas las medidas necesarias para proteger eficazmente la vida y salud de sus trabajadores, informando de los posibles riesgos y manteniendo las condiciones adecuadas de higiene y seguridad en las faenas, como también los implementos necesarios para prevenir accidentes y enfermedades profesionales. Deberá asimismo prestar o garantizar los elementos necesarios para que los trabajadores en caso de accidente o emergencia puedan acceder a una oportuna y adecuada atención médica, hospitalaria y farmacéutica [12].

1.8.2. Código Sanitario (Libro III, Título III: Higiene y Seguridad)

Este cuerpo legal establece las disposiciones generales para garantizar condiciones laborales higiénicas y seguras. Obliga a los empleadores a proporcionar condiciones de trabajo seguras y saludables, controlando factores ambientales que puedan afectar la salud de los trabajadores [13].

1.8.3. Ley 16.744

Esta ley establece un sistema de seguro social obligatorio que protege a todos los trabajadores dependientes y a los independientes que cotizan, frente a los accidentes que le ocurran a causa o con ocasión de trabajo y a las enfermedades causadas de manera directa por el ejercicio de su trabajo [36].

1.8.4. Decreto Supremo N.º 594

Es un reglamento que establece los requisitos específicos que deben cumplir los lugares de trabajo en materia de higiene y seguridad laboral, con el objetivo de proteger la salud de los trabajadores y garantizar condiciones óptimas en el entorno laboral [15].

1.9. INTERNET OF THINGS (IOT)

1.9.1. Definición y origen del IoT

Internet de las cosas o sus siglas en inglés IoT (Internet of Things) se define como una red de objetos físicos conectados por medio del internet, los cuales logran interactuar vía sistemas embebidos³, redes de comunicación, mecanismos de computación de respaldo y aplicaciones típicamente en la nube. Permite a los objetos comunicarse entre sí, acceder a información de internet, capturar, almacenar y recuperar datos e interactuar con usuarios humanos, así como con otros sistemas y aplicaciones, creando ambientes cada vez más conectados y más inteligentes [46].

El término o expresión IoT fue inventado por Kevin Ashton, desde el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), tratando de resolver un problema de stocks para una multinacional del sector de la cosmética para la que trabajaba. Ashton con este interés en mente, fundó en 1999 el entonces llamado Auto-ID Center en el MIT, que le sirvió para investigar las posibilidades que ofrecían las tecnologías de identificación por radiofrecuencia (RFID) para solucionar su problema. Según Ashton, “Si los libros, termóstatos, refrigeradores, paquetería, lámparas, botiquines, partes automotrices, entre otros, estuvieran conectados a internet y equipados con dispositivos de identificación, no existirían, en teoría, artículos fuera de stock o medicinas caducadas; sabríamos exactamente su ubicación, como se consumen en el mundo; el extravío sería cosa del pasado, y sabríamos qué está encendido y que está apagado en todo el mundo. Internet de las cosas tiene el potencial de cambiar el mundo, como hizo Internet en su momento. Tal vez aún más” [37].

³ Un sistema embebido es un conjunto de hardware y software diseñado para realizar funciones específicas dentro de un dispositivo.

1.9.2. Aplicaciones clave del IoT

El uso de dispositivos inteligentes, como sensores, ha permitido a las empresas adaptarse de manera más eficiente a las tecnologías del Internet de las cosas. Esta capacidad de adaptación se manifiesta en diversos sectores industriales, donde la integración de sensores ha optimizado procesos, mejorado la toma de decisiones y fortalecido la gestión de activos.

Uno de los sectores más beneficiados es el de la manufactura. Las empresas de fabricación que incorporan sensores en su línea de producción pueden supervisar en tiempo real el estado de sus equipos, lo que permite aplicar mantenimiento preventivo de manera oportuna ante la detección de fallos inminentes. Esta capacidad de anticipación no sólo minimiza las interrupciones operativas, sino que también reduce costos, mejora el tiempo de actividad y optimiza el rendimiento de los activos. La configuración de alertas automáticas permite a los fabricantes reaccionar rápidamente ante cualquier irregularidad, aislando o corrigiendo los equipos afectados sin comprometer toda la operación [40].

En el caso de la industria automotriz, los beneficios del IoT no se limitan únicamente en los procesos de producción. Gracias a los sensores instalados en los vehículos es posible realizar un monitoreo constante de su funcionamiento mientras están en circulación. Esto permite advertir a los conductores sobre fallas inminentes y ofrecer recomendaciones en tiempo real. Además, la información recolectada puede ser analizada por fabricantes y proveedores, quienes obtienen datos valiosos sobre el rendimiento de los vehículos, facilitando mejoras en diseño, mantenimiento y atención al cliente [40].

El sector del transporte y la logística también se ve significativamente beneficiado por las aplicaciones del IoT. Los sensores permiten recalcular rutas en función de condiciones climáticas adversas o eventos inesperados durante el traslado de mercancías. Las mismo, es posible detectar fallos en los vehículos de transporte y tomar medidas correctivas de forma inmediata. El control del inventario mediante sensores también se ha vuelto crucial, especialmente para productos sensibles a la temperatura, como alimentos, bebidas, productos farmacéuticos o flores. En estos casos, los sistemas de monitoreo permiten supervisar continuamente las condiciones de almacenamiento y generar alertas cuando los niveles de temperatura humedad superan los humedales establecidos, garantizando así la calidad del producto y reduciendo pérdidas [40].

Finalmente, la IoT desempeña un papel fundamental en la seguridad general de todas las industrias, más allá del control de activos o el mantenimiento predictivo. Los sensores pueden ser utilizados para proteger a trabajadores en ambientes de alto riesgo, como minas, plantas químicas, centrales eléctricas o yacimientos petroleros. Las aplicaciones IoT permiten alertar de manera temprana sobre la ocurrencia de incidentes mayores, facilitando la evacuación oportuna, la asistencia compañeros en peligro o la contención de fallas críticas. Además, estas tecnologías pueden integrarse con sistemas de monitoreo de salud personal, lo cual resulta esencial para la toma de decisiones rápidas en situaciones de emergencia. En conjunto, el uso de IoT representa una herramienta estratégica no sólo por aumentar la eficiencia operativa, sino también para fortalecer la seguridad, sostenibilidad y resiliencia en múltiples sectores industriales y de servicios [40].

1.9.3. Plataformas de desarrollo IoT: Arduino

Arduino es una de las plataformas más reconocidas y utilizadas en el ámbito del IoT, destacándose por su contribución a la democratización del acceso a la tecnología. Su enfoque de hardware y software⁴ de código abierto ha permitido que usuarios de distintos niveles, desde estudiantes hasta profesionales puedan desarrollar prototipos funcionales de manera ágil, económica y estable. Entre sus principales características destacan:

1.9.3.1. Diseño modular

Las placas Arduino integran un microcontrolador reprogramable y pines de entrada/salida digital y analógica en un formato estandarizado, lo que facilita la conexión de sensores, actuadores y módulos de comunicación sin requerir conocimientos avanzados de electrónica ni técnicas de soldadura. Así mismo mediante el uso de shields o placas de expansión, es posible incorporar funcionalidades adicionales como conectividad inalámbrica, control de motores o interfaces de usuario, simplemente apilándolos sobre la placa base [7].

⁴ Conjunto de instrucciones, programas y datos que permiten que un sistema informático realice tareas específicas.

1.9.3.2. Entorno de programación accesible

El entorno de desarrollo Arduino IDE emplea un lenguaje de programación en C/C++, simplificado a través de funciones predefinidas y bibliotecas que abstraen detalles técnicos del hardware. Esta característica reduce significativamente la barrera de entrada para los usuarios sin experiencia previa en programación, al tiempo que permite el desarrollo de aplicaciones complejas. Además, la extensa disponibilidad de bibliotecas desarrolladas por la comunidad amplía la compatibilidad con una gran variedad de dispositivos periféricos [7].

1.9.3.3. Ecosistema colaborativo

Arduino cuenta con una comunidad global activa que fomenta la colaboración, el aprendizaje y la innovación. Existen numerosos recursos disponibles en línea, como documentación oficial, tutoriales, foros de discusión y proyectos de código abierto, los cuales facilitan el proceso de aprendizaje autodidacta y la resolución de problemas técnicos. De forma complementaria, plataformas como Arduino Cloud permiten la integración de dispositivos con servicios en la nube, posibilitando la visualización de datos en tiempo real y el control remoto de sistemas, aspectos fundamentales para aplicaciones IoT [7].

La elección de Arduino como plataforma base para el desarrollo del presente proyecto se fundamenta en criterios tanto técnicos como prácticos, particularmente considerando el nivel de experiencia del desarrollador. Al no contar con formación avanzada en electrónica ni en programación de sistemas embebidos, se optó por una herramienta de fácil comprensión, con amplia documentación y el respaldo de una comunidad activa que facilitara el aprendizaje autodidacta y la resolución de problemas. Arduino cumplió con estos requisitos al ofrecer un entorno de desarrollo intuitivo, bibliotecas preconfiguradas y una extensa variedad de recursos disponibles públicamente. Asimismo, se valoró su accesibilidad económica, su filosofía de código abierto y la disponibilidad de componentes de bajo costo la convierten en una opción viable para entornos de desarrollo con recursos limitados, sin comprometer la funcionalidad del sistema ni la posibilidad de replicación del proyecto para otros usuarios o instituciones.

Finalmente, su compatibilidad con una amplia gama de sensores, módulos de comunicación y servicios en la nube brinda la flexibilidad técnica necesaria para cumplir los requerimientos del sistema propuesto, permitiendo además su posible expansión futura.

1.9.4. Sensores en sistemas IoT

Los sensores son la pieza clave en los sistemas de IoT, estos son dispositivos formados por células sensibles que detectan variaciones en una magnitud física, química o biológica y las convierten en señales eléctricas útiles para un sistema de medida de control. Un sensor es un dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud exterior y transformarla en otra magnitud, normalmente eléctrica, que se pueda cuantificar y manipular [46].

La función de los sensores es detectar cambios en su entorno, vale decir, del objeto que se está censando y enviar información sobre el estado actual o cualquier cambio que se detecte. En el mercado existen distintos tipos de sensores en función de la variable que se desee medir o detectar, pueden ser de contacto, ópticos, térmicos, de humedad, magnéticos, infrarrojos, etc. [46]

En el ámbito de la instrumentación y el control de procesos, los sensores desempeñan un papel fundamental al convertir magnitudes físicas en señales interpretables. Existen dos categorías principales, sensores analógicos y sensores digitales, cuyas diferencias radican en su funcionamiento, integración en sistemas y aplicaciones prácticas.

1.9.4.1. Sensor analógico

Un sensor analógico genera una señal de salida continua y proporcional a la variable medida (temperatura, presión, humedad, etc.). Esta señal suele manifestarse como un voltaje, corriente o resistencia variable dentro de un rango específico. Por ejemplo, un termistor puede modificar su resistencia en función de los cambios de temperatura [45]. Sus características clave son:

- Señal continua: Representa infinitos valores dentro de su rango operativo, lo que permite una medición de alta resolución.
- Susceptibilidad al ruido: Las interferencias eléctricas o ambientales pueden distorsionar la señal, afectando su precisión.

- Integración en sistemas digitales: Requieren un convertidor analógico-digital (ADC) para traducir la señal en un formato legible por microcontroladores.
- Aplicaciones típicas: Entornos donde la precisión y la resolución son críticas, como mediciones en laboratorios o procesos industriales con variaciones sutiles.

1.9.4.2. Sensor digital

Un sensor digital produce una señal discreta, generalmente en formato binario (ceros y unos), que puede transmitirse mediante protocolos estandarizados (I2C, SPI, UART, etc.). Estos dispositivos suelen incorporar circuitos integrados que procesan la señal internamente, convirtiéndola directamente en datos numéricos [45]. Entre sus características destacan:

- Inmunidad al ruido: información codificada digitalmente son menos propensos a interferencia, garantizando mayor fiabilidad en entornos ruidosos.
- Integración simplificada: No requieren de ADC externo, ya que entregan datos listos para su procesamiento en sistemas digitales.
- Funcionalidades avanzadas: Muchos incluyen capacidades de auto, calibración, diagnóstico de fallos o compensación de temperatura.
- Resolución limitada: La precisión depende del número de bits de su salida. Por ejemplo, un sensor de 12 bits ofrece 4096 valores discretos.
- Aplicaciones típicas: Sistemas IoT, automatización industrial o dispositivos portátiles que priorizan la robustez y facilidad de comunicación.

1.9.5. Protocolos de comunicación en sistemas IoT

Los sistemas IoT requieren una comunicación eficiente y estandarizada entre sensores, microcontroladores y dispositivos periféricos para garantizar interoperabilidad y bajo consumo de energía. Entre los protocolos más utilizados en plataformas embebidas, como Arduino, destacan I2C y SPI, diseñados para entornos con recursos limitados. Ambos son síncronos (utilizan una señal de reloj para sincronizar la transmisión) y seriales (envían datos bit a bit), pero difieren en complejidad, velocidad y escalabilidad, lo que los hace aptos para distintos escenarios.

1.9.5.1. I2C (Inter-Integrated Circuit)

I2C o Interconexión entre Circuitos Integrados, es un protocolo de comunicación síncrono y bidireccional diseñado para conectar múltiples dispositivos de baja velocidad en distancias cortas. Opera bajo una arquitectura maestro-esclavo, donde un único maestro (por ejemplo, un microcontrolador) coordina la comunicación con uno o varios esclavos (por ejemplo, los sensores) mediante solo dos líneas, SDA (Serial Data Line) que transmite los datos y SCL (Serial Clock Line) que genera la señal de reloj para sincronizar los dispositivos [39].

1.9.5.2. SPI (Serial Peripheral Interface)

SPI o Interfaz Periférica Serial, es un protocolo síncrono y full dúplex (transmisión bidireccional simultanea) utilizado para transferencias rápidas entre microcontroladores y periféricos. A diferencia de I2C, emplea cuatro líneas físicas, MOSI (Master Out Slave In) que envía datos del maestro al esclavo, MISO (Master In Slave Out) que recibe datos del esclavo al maestro, SCK (Serial Clock) señal de reloj generada por el maestro y SS (Slave Select) que selecciona el dispositivo esclavo activo [48].

1.9.5.3. Comunicación serial USB

La comunicación serial USB (Universal Serial Bus) es un estándar de comunicación ampliamente utilizado para conectar dispositivos electrónicos a sistemas centrales (como computadoras o microcontroladores) mediante protocolo serial. A diferencia de I2C y SPI, el USB está diseñado para transferencias de datos de mayor velocidad, soportar distancias medias y proporcionar alimentación eléctrica a dispositivos periféricos. Su versatilidad lo hace esencial en aplicaciones que requieren intercambio de datos robusto y configuración plug-and-play. Un cable USB estándar incluye cuatro líneas físicas, VCC (5V) que alimenta dispositivos de bajo consumo, D+ (Data+) es la línea de datos diferencial positiva, D- (Data-) es la línea de datos diferencial negativa y GND (Tierra) que completa el circuito eléctrico [50].

1.9.6. Velocidad de transmisión de datos

La velocidad de transmisión de datos constituye un aspecto fundamental en la comunicación entre el Arduino Uno y la computadora, pues determina la cantidad de información que puede enviarse en un periodo de tiempo determinado. En este sentido,

el baudio o tasa de baudios se define como el número de cambios de señal por segundo que se producen en una transmisión de datos. Para garantizar la estabilidad y la fiabilidad en la transmisión de información cada segundo, se recomienda emplear una velocidad de 9.600 baudios. Esta tasa resulta ampliamente compatible con distintos programas y dispositivos, lo cual facilita la configuración y reduce la probabilidad de errores durante el proceso de envío de datos. Aunque existen velocidades superiores, como 115.200 baudios, estas requieren configuraciones más cuidadosas y pueden verse afectadas por interferencias o limitaciones del hardware y software. Por ello, 9.600 baudios constituyen una opción idónea y equilibrada para la transmisión de datos entre el Arduino uno y la computadora, permitiendo una comunicación constante y segura segundo a segundo [11].

1.9.7. Experiencias previas en proyectos IoT

El desarrollo de soluciones IoT para el monitoreo en tiempo real de agentes contaminantes y condiciones ambientales ha ganado relevancia en los últimos años. A continuación, se destacan cuatro proyectos significativos que ilustran cómo esta tecnología se ha aplicado para mejorar la seguridad ocupacional y el monitoreo de emisiones contaminantes.

1.9.7.1. Development of an IoT-based system for real-time occupational exposure monitoring

El estudio detalla el desarrollo de un sistema de monitoreo de exposición ocupacional a la contaminación del aire en tiempo real basado en Internet de las Cosas. El sistema fue probado para la evaluación de la exposición ocupacional en tiempo real a formaldehído y CO₂. El documento propone la implementación de un sistema de monitoreo de exposición ocupacional en tiempo real basado en IoT utilizando nodos de sensores de varios contaminantes para medir concentraciones de contaminantes del aire en diferentes microambientes interiores y etiquetas portátiles para seguimiento personal en interiores en tiempo real [17].

1.9.7.2. Arquitectura de IoT para el monitoreo de emisiones de gases contaminantes de vehículos y su validación a través de Machine Learning

Este estudio propone una arquitectura IoT para el monitoreo de emisiones de gases contaminantes en vehículos. La arquitectura se basa en un nodo equipado con sensores DHT22, MQ-9 y MQ-135 para capturar la temperatura, humedad y emisiones de gases,

mismo que se comunica de manera efectiva a través de la red LTE para enviar los datos a la plataforma ThingSpeak. Se lleva a cabo un análisis de los niveles de contaminación de CO₂, CO y CH₄ mediante los datos recopilados [49].

1.9.7.3. Sistemas de monitoreo IoT para la seguridad laboral en Costa Rica

Este estudio explora la implementación de Sistemas de Monitoreo IoT para mejorar la seguridad laboral en Costa Rica. Se enfoca en cómo estas tecnologías pueden prevenir riesgos laborales y promover un entorno de trabajo seguro. La investigación revela que la adopción de sistemas de monitoreo IoT mejora significativamente la seguridad laboral en Costa Rica, reduciendo los riesgos y costos asociados a los accidentes laborales. Estos hallazgos están respaldados por la metodología aplicada y los estudios de caso analizados. Los resultados demuestran que una estrategia integrada, que combine tecnología avanzada con prácticas de seguridad existentes, puede mejorar sustancialmente las condiciones de trabajo [2].

1.9.7.4. Calidad del Aire. Proyecto en GitHub de Ulises Gascón

Este proyecto disponible en GitHub ofrece un marco práctico para la implementación de sensores de calidad del aire mediante IoT. Utiliza el sensor sensores MQ-2, MQ-3, MQ-4, MQ-5 MQ-6, MQ-7, MQ-8, MQ-9 y MQ-135, AM2302 y DHT22 para medir gases en entornos interiores y presenta ejemplos de código para la integración con plataformas de monitoreo. Aunque su enfoque principal es la calidad del aire, los conceptos y herramientas desarrollados son aplicables a proyectos de monitoreo de CO₂ en entornos laborales [22].

Estos cuatro proyectos muestran cómo el Internet de las Cosas se ha aplicado en el monitoreo de la exposición ocupacional, la medición de gases contaminantes y la mejora de la seguridad laboral, proporcionando valiosas lecciones y prácticas que informan el diseño y la implementación del sistema de monitoreo desarrollado en este proyecto.

1.10. COMPONENTES CLAVE DEL PROTOTIPO

En esta propuesta se integran diversos componentes electrónicos y de software que en conjunto permiten un monitoreo de las concentraciones de CO₂ en tiempo real, el registro

de los datos y el control sobre el inicio y detención del monitoreo. A continuación, se describen los elementos clave:

1.10.1. Software Arduino IDE

Arduino IDE (Integrated Development Environment) es un entorno de programación open-source diseñado específicamente para desarrollar, compilar y cargar código en placas Arduino y microcontroladores compatibles. Su interfaz sencilla y accesible permite a usuarios principiantes y avanzados escribir programas (llamados sketches) en lenguaje C/C++, adaptado con librerías y funciones específicas para hardware Arduino [8].

1.10.2. Software Fritzing

Fritzing es una herramienta de software open-source diseñada para facilitar el diseño, documentación y prototipado de circuitos electrónicos, especialmente en proyectos con plataformas como Arduino. Permite a los usuarios crear representaciones visuales de sus circuitos en tres vistas principales: breadboard (placa de pruebas), esquemático (diagrama técnico) y PCB (placa de circuito impreso). Su interfaz intuitiva está orientada a educadores, estudiantes y aficionados, además, incluye una biblioteca de componentes electrónicos prediseñados, lo que facilita la representación gráfica de proyectos y su posterior compartimiento o publicación [18].

1.10.3. Placa Arduino Uno R3

Arduino Uno R3 es una placa de desarrollo de hardware libre basada en el microcontrolador ATmega328P, diseñada para facilitar la creación de proyectos electrónicos interactivos y la programación de sistemas embebidos. Es una de las placas más populares de la familia Arduino, reconocida por su versatilidad, facilidad de uso y amplia compatibilidad con sensores, actuadores y módulos adicionales. Entre sus características destacan:

- 14 pines digitales.
- 6 entradas analógicas.
- Memoria Flash de 32 kB.
- Reloj de 16 MHz.
- Voltaje de operación de 5V.

- Conexión USB tipo A-B para programación y comunicación serial.

La placa incluye un regulador de voltaje integrado, lo que permite alimentarla mediante USB, una fuente externa (7-12V recomendado) o pilas. Su diseño modular y su ecosistema de librerías y ejemplos la hacen ideal para educación y prototipado rápido [5].



Figura 1-5. Placa Arduino Uno.

Fuente: ARDUINO.CC [5].

1.10.4. Sensor MQ-135

Este sensor comúnmente utilizado para control de la calidad del aire detecta una amplia gama de gases, incluidos amoníaco, benceno, alcohol, humo, dióxido de carbono y otros gases. El sensor está compuesto por un microtubo cerámico de óxido de aluminio (Al_2O_3), una capa sensible de dióxido de estaño (SnO_2), un electrodo de medición y un calentador, todo fijado en una carcasa de plástico y protegido por una malla de acero inoxidable [3].

El principio de funcionamiento se basa en la interacción de los gases con el material semiconductor del sensor. Esta interacción altera la cantidad de electrones en la superficie del SnO_2 cambiando así la resistencia eléctrica del material. Este cambio genera una señal analógica proporcional a la concentración del gas detectado, que luego es procesada por el microcontrolador Arduino para interpretar los niveles en partes por millón. Aunque no es el más preciso para el monitoreo de CO_2 , en este proyecto se utilizó para obtener una variabilidad de concentraciones y enriquecer en cálculo de la concentración promedio ponderada.

Este sensor se destaca por su salida analógica (que proporciona una señal continua proporcional a la concentración detectada), operando a 5V con bajo consumo energético, ideal para sistemas alimentados por baterías o USB. Ofrece un rango de detección amplio (10 a 1000 ppm) adaptable a diversos gases, aunque requiere un tiempo de precalentamiento de ~24 horas para garantizar mediciones precisas tras su primera activación [3].

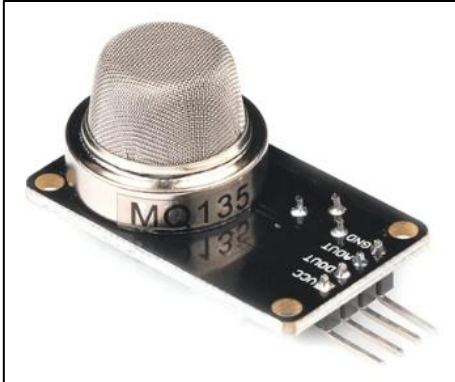


Figura 1-6. Sensor MQ-135.

Fuente: ALL DATASHEET [3].

1.10.5. Modulo LCD 1602 con interfaz I2C

Es un dispositivo que integra una pantalla de cristal líquido (LCD) de 16 columnas por dos filas (32 caracteres) y un adaptador I2C, simplificando su conexión a microcontroladores como Arduino. Gracias al protocolo I2C reduce los cables necesarios de 6-10 pines a solo 4: alimentación (VCC), tierra (GND), datos (SDA) y reloj (SCL), permite configurar su dirección (por defecto 0x27 o 0x3F) para evitar conflictos en sistemas con múltiples dispositivos. Incluye retroalimentación ajustable, soporta caracteres personalizados y se programa fácilmente con librerías como LiquidCrystal_I2C. Es ideal para proyectos que requieren una interfaz básica, como mostrar datos de sensores, mensajes o menús, ya que optimiza el espacio en protoboard, libera pines del microcontrolador y reduce la complejidad del cableado. Su combinación de simplicidad y funcionalidad lo hace popular en prototipado educativo, sistemas de monitoreo y aplicaciones IoT de baja demanda gráfica [6].

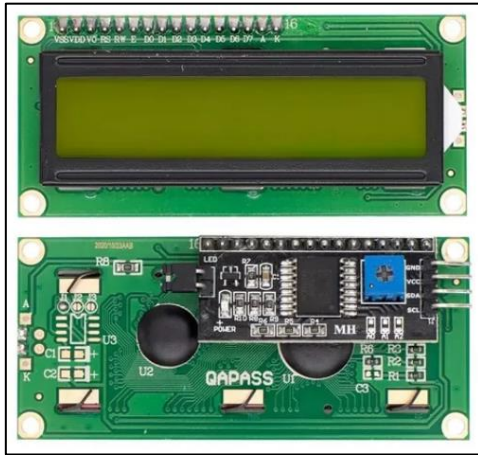


Figura 1-7. Modulo LCD 1602 con interfaz I2C.

Fuente: ARDUINO.CL [6].

1.10.6. Modulo RFID RC522

Es un dispositivo de identificación por radiofrecuencia que permite leer y escribir datos en tarjetas RFID (Radio Frequency Identification) utilizando tecnología de alta frecuencia. Su principal función es identificar de manera inalámbrica a un objeto o persona, lo que resulta ideal para aplicaciones de control de acceso, seguimiento de activos o registro de usuarios. El módulo RFID RC522 opera a una frecuencia de 13.56 MHz, estándar para aplicaciones de corto alcance. Las tarjetas o etiquetas RFID contienen una antena y un chip que almacena datos. Al acercarse al lector, usualmente a menos de 5 cm, el módulo genera un campo electromagnético que activa la tarjeta, permitiendo la transferencia inalámbrica de información. El RC522 se comunica con el microcontrolador Arduino Uno, a través del protocolo SPI (Serial Peripheral Interface), que ofrece una transferencia de datos rápida y eficiente [38].



Figura 1-8. Modulo RFID RC522.

Fuente: MCI ELECTRONICS [38].

1.10.7. Breadboard MB-102

Es una placa de pruebas sin soldadura utilizada para prototipar circuitos electrónicos de manera rápida y temporal. Consta de una matriz de 830 orificios interconectados internamente mediante clips metálicos, organizados en filas horizontales (A-J) y columnas verticales, junto a cuatro buses de alimentación laterales (positivo y negativo a cada lado). Permite insertar componentes como resistencias, LEDs, sensores o microcontroladores (Arduino, Raspberry Pi) con espaciado estándar de 2,54 mm, facilitando conexiones reutilizables y modificables sin dañar partes. Soporta hasta 300V, aunque se recomienda para circuitos de bajo voltaje (5V, 12V), y cuenta con buses duales para distribuir voltajes distintos simultáneamente. Es ideal para educación, proyectos de DIY y prototipado, gracias a su a su flexibilidad y corrección inmediata de errores. Sin embargo, no es apta para señales de alta frecuencia ni para corrientes superiores a 1 A, y requiere verificación constante de conexiones, ya que los contactos pueden aflojarse con el tiempo. Su diseño divide las filas horizontales (interconectadas) de las columnas verticales (buses de alimentación), optimizando la organización de circuitos temporales [47].

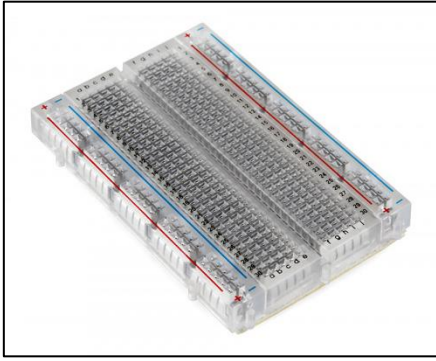


Figura 1-9. Breadboard

Fuente: SPARKFUN [47].

1.10.8. Fuente de alimentación

El cable USB tipo A-B como fuente de alimentación es una solución estándar para energizar dispositivos electrónicos de bajo consumo como placas Arduino, mediante un puerto USB (5V DC). Este cable transfiere energía desde una fuente externa (computadora, cargador o banco de energía) a través de sus conectores: Tipo A (rectangular en la fuente) y Tipo B (cuadrado biselado, en el dispositivo). Destacan su voltaje estable de 5V, corriente máxima de 500mA (USB 2.0) o 900 mA (USB 3.0), y su capacidad para combinar alimentación y comunicación serial en un solo enlace.

Es ampliamente utilizado en prototipado y proyectos básicos por su accesibilidad, compatibilidad universal y facilidad de conexión. Su dualidad funcional (energía + datos) lo hace ideal para sistemas que integran programación y monitoreo en tiempo real sin hardware adicional [50].



Figura 1-10. Cable USB tipo A-B.

Fuente: TME [50].

1.10.9. Cables de conexión Jumper

Los cables jumper son conductores flexibles con conectores en sus extremos, empleados para interconectar componentes electrónicos en prototipos sin soldadura. En proyectos con Arduino y breadboards destacan dos tipos:

1.10.9.1. Jumper Macho-Macho

Posee un conector pin (macho) en ambos extremos, diseñado para insertarse directamente en orificios de breadboard, placas de desarrollo o módulos con headers hembra. Disponible en longitudes estándar (10 cm, 20 cm, 30 cm) y calibre 22-24 AWG, Se usa comúnmente para unir pines de Arduino al breadboard o interconectar componentes dentro de la protoboard [20].

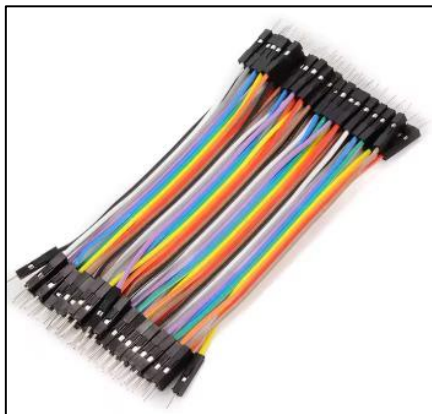


Figura 1-11. Cable jumper macho-macho.

Fuente: HARDWARE LIBRE [20].

1.10.9.2. Jumper Macho-Hembra

Cuenta con un conector hembra (socket) en un extremo y un conector macho (pin) en el otro, ideal para conectar sensores o módulos con pines expuestos directamente a placas Arduino. Con longitudes similares a los anteriores, permite conectar dispositivos I2C, sensores o actuadores a pines digitales/analógicos sin necesidad de breadboards [20].



Figura 1-12. Cable jumper macho-hembra.

Fuente: HARDWARE LIBRE [20].

CAPÍTULO 2: DISEÑO DEL PROTOTIPO

2. DISEÑO DEL PROTOTIPO

2.1. CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

En el ámbito de la higiene ocupacional, una de las tareas fundamentales es la evaluación del riesgo por inhalación de agentes químicos. Esta evaluación consiste en medir las concentraciones presentes en el aire y contrastarlas con los valores límite permisibles establecidos por la normativa vigente. Cuando un trabajador está expuesto a concentraciones variables a lo largo de su jornada laboral, se recurre al cálculo de la Concentración Promedio Ponderada (C.P.P.), que estima un valor promedio de exposición en función del tiempo. Esta se compara con el límite permisible de exposición (LPP), y a partir de dicha comparación es posible estimar el nivel de riesgo asociado a la exposición del trabajador al agente químico en cuestión.

No obstante, la metodología convencional presenta limitaciones importantes, el cálculo de la C.P.P. tradicionalmente se basa en promedios obtenidos a partir de intervalos de tiempo amplios (por ejemplo, 500 ppm durante 1 hora), lo que no refleja la variabilidad real de la exposición. Esto implica que se pueden omitir eventos transitorios de alta concentración que, aunque breves, representan un riesgo significativo para la salud del trabajador.

Además, estas mediciones suelen realizarse durante una sola jornada laboral, bajo condiciones puntuales. Esto limita su representatividad, ya que no considera la posible variación de la exposición en días posteriores, ni los cambios en procesos, estaciones del año o condiciones de ventilación. Como resultado, se obtiene una visión parcial del riesgo real al que el trabajador podría estar expuesto de forma continua.

El prototipo desarrollado busca superar esta limitación mediante un sistema de monitoreo de alta frecuencia, capaz de registrar concentraciones en intervalos de un segundo. Esta capacidad permite detectar variaciones abruptas y capturar de manera más precisa la dinámica real de exposición a lo largo de la jornada. Además, el sistema puede calcular la Concentración Promedio Ponderada (C.P.P.) de forma continua y en tiempo real, permitiendo una interpretación inmediata del cumplimiento normativo y mejorando significativamente la gestión del riesgo ocupacional.

A diferencia de métodos convencionales, este sistema puede operar de forma sostenida en el tiempo, permitiendo registrar exposiciones día tras día. Esto ofrece una visión mucho más completa y representativa del entorno laboral, considerando variaciones en las condiciones de trabajo, la producción o la ventilación a lo largo de diferentes jornadas.

Para validar la funcionalidad del sistema, se seleccionó el dióxido de carbono (CO_2) como parámetro de monitoreo. Debido a su naturaleza como subproducto del metabolismo humano, su presencia constante en ambientes interiores y su perfil de riesgo conocido como inofensivo en bajas concentraciones, lo convierten en una opción ideal para validar el funcionamiento del sistema, especialmente en lo que respecta al cálculo en tiempo real de la C.P.P. Esta elección permite desarrollar y probar una metodología adaptable que, con ajustes adecuados, podría aplicarse al monitoreo de otros agentes químicos más críticos en términos de toxicidad.

La detección de CO_2 se realiza mediante el sensor MQ-135, aunque este presenta limitaciones en cuanto a precisión y especificidad para este gas en particular, su capacidad de registrar variaciones dinámicas en intervalos de 1 segundo fue priorizada. En este contexto, la exactitud metrológica no fue el objetivo principal, sino la validación funcional del algoritmo de cálculo de la C.P.P. Así, el sensor cumple adecuadamente su rol como generador de datos relativos, permitiendo simular escenarios de exposición fluctuante.

El sistema implementa un algoritmo que calcula la C.P.P. mediante dos procesos paralelos:

- Conversión de las señales analógicas provenientes del sensor en estimaciones de concentración de CO_2 , expresadas en partes por millón (ppm).
- Cálculo continuo de la C.P.P. ponderando cada valor de concentración con el tiempo correspondiente de exposición, actualizando el resultado cada un segundo.

En este enfoque, el tiempo de exposición se determina de forma implícita: dado que el sensor realiza mediciones en intervalos de un segundo, se asume que cada concentración registrada representa un segundo completo de exposición a ese valor. De este modo, el sistema construye la C.P.P. acumulando los productos de concentración por tiempo (1 segundo por muestra) y dividiendo por el total del periodo registrado, lo que permite una estimación precisa y continua de la exposición.

Los datos se transmiten por vía serial a Microsoft Excel mediante el complemento Data Streamer, lo que permite su visualización automática en tiempo real mediante tablas y gráficos. Esta estrategia elimina la necesidad de desarrollar interfaces gráficas específicas, simplificando el desarrollo y reduciendo los tiempos de implementación.

La interacción con el sistema se realiza mediante un módulo RFID y una pantalla LCD, diseñados para ofrecer un control intuitivo y eficiente en entornos laborales. El módulo RFID permite activar o detener la adquisición de datos con solo acercar una tarjeta, eliminando la necesidad de controles complejos. Simultáneamente, la pantalla LCD proporciona retroalimentación visual inmediata mostrando, el estado del sistema y la concentración actual a la que está expuesto el usuario. Esta solución ofrece un control simple e intuitivo, cerrando eficientemente el ciclo de adquisición, procesamiento y visualización de información.

Todos los componentes provienen de un Starter Kit de Arduino, con un costo estimado entre USD \$30 y \$60. La selección respondió a criterios de disponibilidad, bajo costo y facilidad de integración.

Tabla 2-1. Rango estimado de costos por componente.

Componente	Rango estimado de precio (USD)
Placa Arduino Uno R3	7 - 20
Sensor MQ-135	3 - 5
Pantalla LCD 1602 I2C	2 - 6
Modulo RFID RC522 + tarjeta	3 - 10
Protoboard y cables	4 - 10
Fuente de alimentación USB tipo A-B	2 - 7
Total, aproximado	21 - 58

El desarrollo del sistema también se apoyó en herramientas de inteligencia artificial, como ChatGPT-4 y DeepSeek. Estas plataformas fueron utilizadas para generar, estructurar y depurar códigos a partir de instrucciones específicas (prompts). Esta estrategia respondió a la necesidad de desarrollar el proyecto sin contar con conocimientos previos en

programación, permitiendo avanzar de forma autodidacta en el diseño y desarrollo del prototipo.

El uso de estas herramientas no solo facilitó la creación de un código funcional, sino que también promovió la comprensión progresiva de su lógica, fomentando un aprendizaje práctico. En cada etapa del proceso se priorizó la simplicidad, eficacia y autonomía, utilizando IA como un recurso de apoyo técnico continuo para resolver problemas, validar algoritmos y optimizar la estructura del sistema.

Este enfoque accesible y flexible demuestra el potencial de la inteligencia artificial como aliada en proyectos técnicos, especialmente en entornos educativos o con recursos limitados. Permite que personas sin formación previa en programación puedan desarrollar soluciones innovadoras y funcionales, ampliando así las posibilidades de aprendizaje y aplicación tecnológica en contextos reales.

2.2. ARQUITECTURA DEL PROTOTIPO

El prototipo desarrollado se estructura en tres capas interconectadas que permiten la captura, procesamiento y visualización de datos en tiempo real. Esta arquitectura modular se basa en el uso de hardware de código abierto y herramientas de software ampliamente disponibles, lo que facilita la implementación, el mantenimiento y la futura escalabilidad del sistema.

2.2.1. Capa Física

La capa física del sistema está compuesta por los componentes electrónicos encargados de la adquisición de datos, el control del sistema y la interacción con el entorno. En el corazón de esta arquitectura se encuentra la placa Arduino Uno R3, que se ejecuta como unidad central de procesamiento, gestionando los sensores conectados y ejecutando la lógica de operación programada. Su alta compatibilidad con múltiples módulos y su facilidad de uso lo convierten en una opción ideal para el desarrollo de prototipos funcionales.

Uno de los sensores clave en este sistema es el sensor MQ-135, encargado de detectar la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en el ambiente. Este sensor opera midiendo variaciones de su resistencia interna (Rs) frente a distintos niveles de gas, proporcionando

datos cruciales para el cálculo en tiempo real de la concentración promedio ponderada (C.P.P.).

Estas mediciones son procesadas por el microcontrolador a través del módulo de cálculo implementado en el código. Este módulo interpreta los datos del sensor mediante la función leerCO2, la cual convierte las variaciones eléctricas en concentraciones de CO₂ expresadas en partes por millón (ppm). Además, este módulo gestiona acumuladores persistentes como la sumatoria del tiempo ($\sum t_i$) y la sumatoria del producto concentración por tiempo ($\sum C_i * t_i$), lo que permite calcular la concentración promedio ponderada (C.P.P.) sin perder información, incluso si el sistema se pausa temporalmente.

El módulo RFID RC522 introduce una capa de interacción sencilla y eficiente, permitiendo al usuario iniciar o detener el monitoreo mediante tarjetas RFID. En esta implementación, no se realiza la validación del identificador único (UID), lo que significa que cualquier tarjeta compatible puede activar o desactivar el sistema. Esta decisión responde al objetivo de simplificar el uso y enfocarse en la funcionalidad esencial del prototipo.

Para facilitar la supervisión directa, se incorpora una pantalla LCD 1602 con interfaz I2C, que muestra en tiempo real tanto las lecturas actuales de CO₂ como el estado del sistema. Esta salida visual ofrece al usuario una forma rápida y clara de verificar el funcionamiento general del prototipo.

Todos los módulos y sensores están interconectados a través de una breadboard MB-102, que ofrece una plataforma modular sin necesidad de soldadura. Su diseño facilita tanto la disposición flexible de los componentes como futuras modificaciones al prototipo.

Finalmente, el cable USB tipo A-B cumple una doble función dentro del sistema, suministrando energía al Arduino uno desde la computadora y permitiendo la transmisión de datos en formato CSV hacia Microsoft Excel. Esta conexión es fundamental para el registro continuo y estructurado de la información, habilitando su análisis en tiempo real mediante el complemento Data Streamer.

2.2.2. Capa de comunicación

La capa de comunicación constituye un elemento fundamental para garantizar la interacción eficiente entre el microcontrolador y los distintos dispositivos periféricos integrados en el sistema. Para ello se implementaron diversos protocolos de transmisión

de datos, seleccionados en función de sus características técnicas, tipo de dispositivo o simplicidad de conexión.

2.2.2.1. Protocolos y medios de transmisión de datos

Para la lectura y escritura de información en tarjetas RFID, se empleó el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface), un estándar de comunicación síncrona de alta velocidad, especialmente adecuado para la transferencia de datos en distancias cortas. Este protocolo permitió establecer una comunicación rápida y estable entre el microcontrolador y el módulo RFID RC522. La implementación se realizó mediante el uso de dos bibliotecas: MFRC522, la cual ofrece funciones específicas para el control del módulo RFID, y SPI, encargada de gestionar la comunicación a nivel de hardware, facilitando la transmisión de datos entre ambos dispositivos.

En cuanto al manejo de la pantalla LCD, se utilizó el protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit), que opera a través de dos hilos principales, SDA y SCL. Esta elección permitió reducir la cantidad de conexiones físicas necesarias y simplificar el diseño del circuito. Para su implementación se recurrió a las bibliotecas Wire, que controla el protocolo I2C desde el microcontrolador y permite configurar direcciones así como enviar y recibir datos, y LiquidCrystal_I2C, que facilita el manejo de la pantalla LCD adaptada al protocolo I2C mediante su integración con la biblioteca Wire.

Finalmente, se incorporó una interfaz de comunicación Serial USB, destinada a la transmisión de datos en tiempo real desde el microcontrolador hacia una computadora. Esta comunicación fue configurada a una velocidad de 9.600 baudios y con formato CSV, lo que permitió una estructura de datos compatible con herramientas de análisis como Microsoft Excel. Cabe destacar que, mediante la extensión Data Streamer, fue posible visualizar y procesar los datos de forma inmediata, sin requerir bibliotecas adicionales. La configuración de esta comunicación se realizó directamente en el entorno de desarrollo Arduino mediante la función `Serial.begin()`.

2.2.3. Capa de aplicación

La capa de aplicación representa el nivel más alto en la arquitectura del sistema, donde se integran las herramientas de visualización, el registro de datos y la lógica de control para la operación del prototipo. Esta capa actúa como intermediaria entre el usuario y el

hardware, permitiendo la interacción con los datos obtenidos y el control del sistema en tiempo real.

2.2.3.1. Herramientas y lógica de operación

Para la visualización y el registro de datos, se utilizó Microsoft Excel junto con el complemento Data Streamer. Esta herramienta permite recibir datos en tiempo real desde el microcontrolador a través de la interfaz Serial USB, estructurándolos en formato CSV. Esto facilita tanto la visualización inmediata del comportamiento de sistema como el almacenamiento de la información para un análisis posterior. Gracias a su compatibilidad con Data Streamer, Excel se convierte en una solución eficiente y accesible, sin requerir software adicional ni programación avanzada.

Respecto a la lógica operación, el sistema fue diseñado para permitir la activación o desactivación del monitoreo mediante la lectura de una tarjeta RFID. Cabe destacar que, en esta implementación no se consideró la verificación del identificador único (UID) de las tarjetas. En consecuencia, cualquier tarjeta RFID valida puede ser utilizada para habilitar o deshabilitar el sistema, lo que simplifica el control de acceso, pero reduce el nivel de seguridad y personalización. Esta decisión fue tomada con el objetivo de enfocar el desarrollo en la funcionalidad principal del sistema de monitoreo, manteniendo una estructura de control básica y funcional.

2.3. **INTEGRACIÓN Y DISEÑO FÍSICO DEL PROTOTIPO**

2.3.1. Distribución de conexiones en el prototipo

La implementación física del sistema se llevó a cabo mediante la integración de diferentes módulos electrónicos sobre una placa de pruebas (breadboard). En la siguiente tabla se describen las conexiones empleadas, especificando tanto los pines correspondientes del microcontrolador Arduino como su ubicación en la breadboard. Siguiendo este esquema es posible generar una conexión y comunicación exitosa entre los componentes.

Tabla 2-2. Distribución de los componentes y sus conexiones.

Componente	Tipo de conexión (Pin)	Pin Arduino	Posición en Breadboard
BREADBOARD	Distribución de 5V	5V	Rail Positivo
	Distribución de GND	GND	Rail Negativo
MQ-135	Alimentación (VCC)	-	Rail Positivo
	Tierra (GND)	-	Rail Negativo
	Señal Analógica (OUT)	A0	-
RFID RC522	SPI (SDA)	10	-
	SPI (SCK)	13	-
	SPI (MOSI)	11	-
	SPI (MISO)	12	-
	Reset (RST)	9	-
	Alimentación (3.3)	3.3 V	-
	Tierra (GND)	-	Rail Negativo
LCD 1602 I2C	I2C (SDA)	A4	-
	I2C (SCL)	A5	-
	Alimentación (VCC)	-	Rail Positivo
	Tierra (GND)	-	Rail Negativo
Cable USB	Alimentación y Comunicación	Puerto USB	-

2.3.2. Disposición física de los componentes

A continuación, se presenta una fotografía del prototipo junto a una representación digital de la interconexión entre componentes priorizando organización modular.

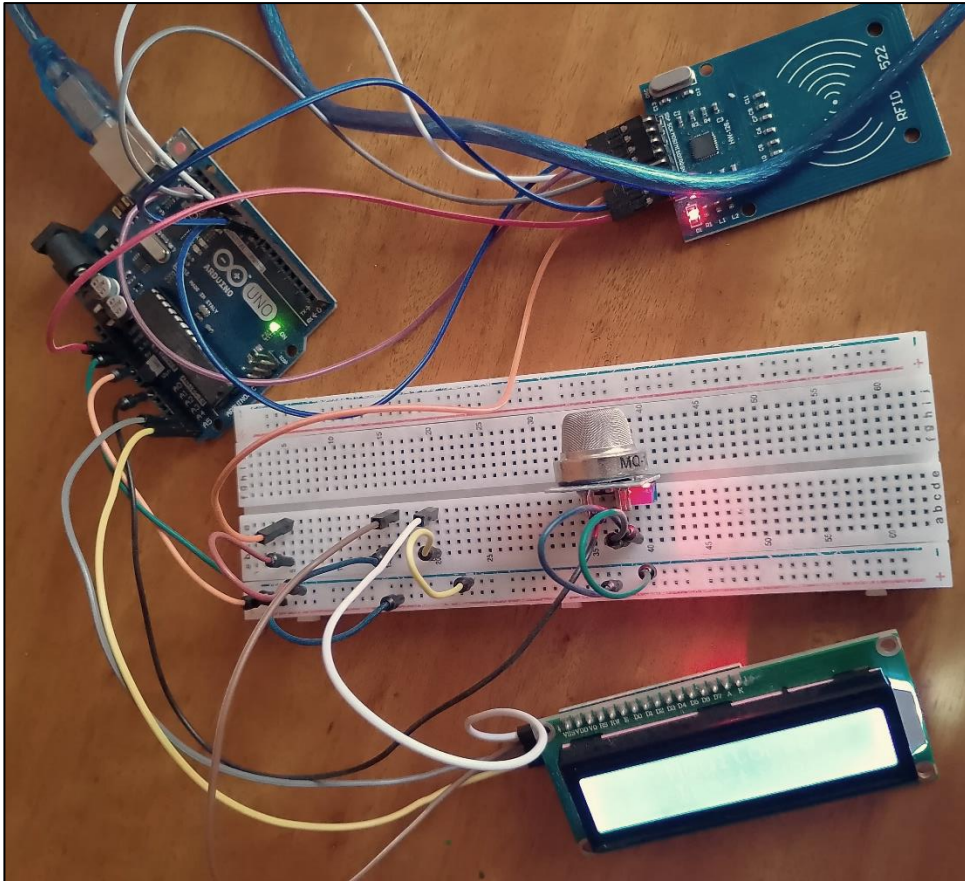


Figura 2-1. Fotografía del Prototipo.

Fuente: Elaboración propia.

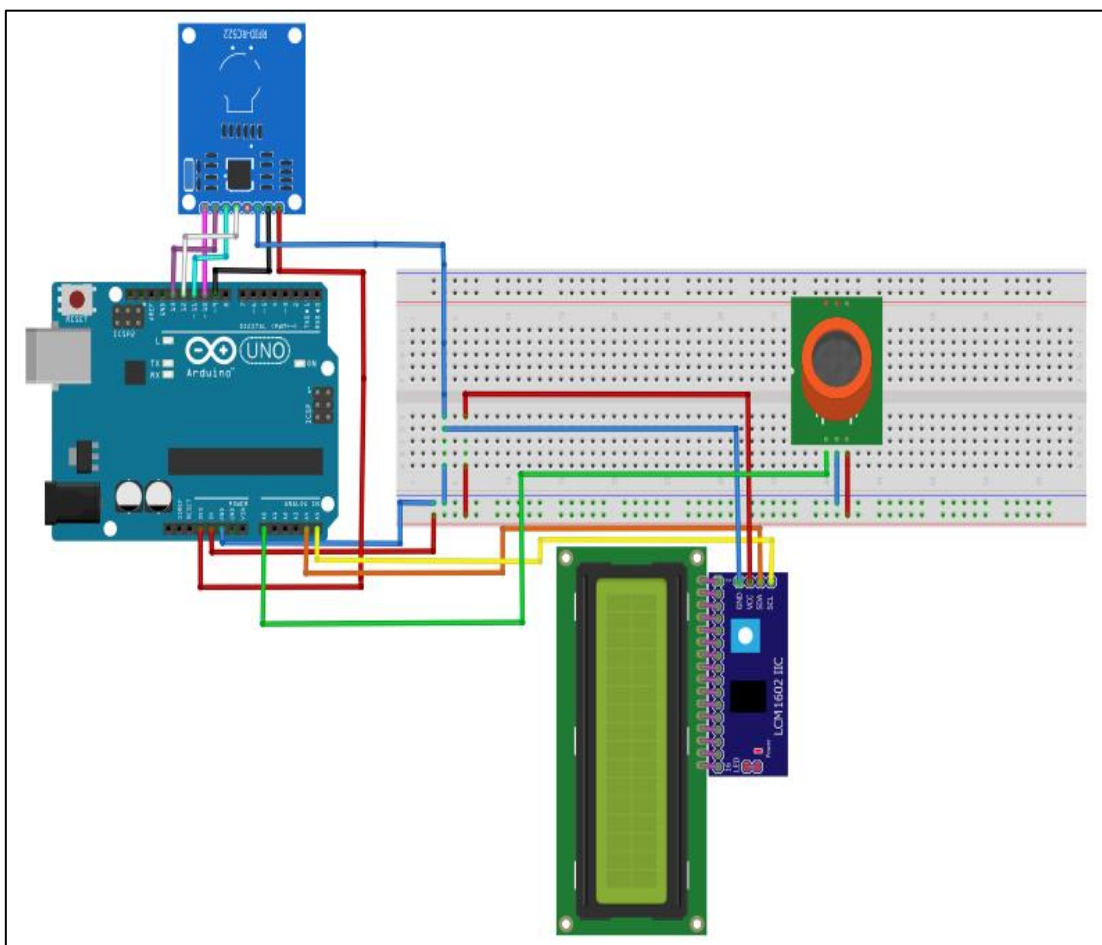


Figura 2-2. Representación digital del prototipo en plataforma Fritzing.

Fuente: Elaboración propia.

2.4. CALIBRACIÓN DEL SENSOR MQ-135

El simple ensamblaje del dispositivo no garantiza mediciones precisas de dióxido de carbono en partes por millón. De forma predeterminada, el sensor MQ-135 entrega datos generales sobre la calidad del aire, clasificados en niveles como “bajo”, “medio” o “alto”, sin discriminar específicamente la concentración de CO₂. Para que el sistema cumpla con su función de manera confiable y proporcione datos cuantificables en ppm, es indispensable realizar un proceso de calibración adecuado. Sin esta etapa, los datos obtenidos por el sensor carecerían de la precisión necesaria para aplicaciones que requieren rigor, como el cálculo de la concentración promedio ponderada.

La calibración del sensor MQ-135 es un paso esencial para estimar concentraciones de dióxido de carbono en partes por millón, dato fundamental en el cálculo de la Concentración Promedio Ponderada. Si bien el MQ-135 es un sensor de naturaleza no

selectiva, es posible enfocarlo en la medición de CO₂ mediante una calibración adecuada basada en sus curvas de sensibilidad. Este proceso de calibración se sustentó en tres pilares:

- Análisis de las curvas de sensibilidad proporcionadas por el fabricante
- Extracción digital de datos utilizando la herramienta Web Plot Digitizer
- Modelado matemático basado en ecuaciones de potencia.

El enfoque adoptado se basó en la metodología propuesta por Ulises Gascón en su repositorio de GitHub “Calidad del aire” [19], la cual aprovecha las curvas de sensibilidad del sensor MQ-135 (Gráfico 2-1) para relacionar la resistencia del sensor (R_s) con la concentración de gases expresada en ppm. A partir de la curva específica para CO₂ (Gráfico 2-2), se genera una ecuación potencial (Ecuación 2-1) que permite estimar la concentración. Esta ecuación luego se reorganiza para despejar el valor de R_0 (Ecuación 2-4), lo cual permite realizar la calibración del sensor.

Es importante considerar que las curvas de sensibilidad están basadas en condiciones ambientales específicas (20°C, 65% HR, 21% de Oxígeno, y una resistencia de carga de 20 kΩ), por tanto, las mediciones pueden verse afectadas por cambios en estas variables. Sin embargo, el objetivo principal del proyecto es implementar un algoritmo que calcule la C.P.P. en función de datos variables tomados segundo a segundo, más allá de la precisión absoluta de cada lectura.

2.4.1. Curvas de sensibilidad y extracción de datos

Un punto de partida fue la curva de sensibilidad del sensor MQ-135 (Gráfico 2-1) incluida en su hoja de datos (datasheet) [3], la cual muestra la relación R_s/R_0 vs. ppm para diferentes gases, incluyendo el CO₂.

Para obtener con mayor precisión los puntos de esta curva, se utilizó la herramienta digital Web Plot Digitizer, que permitió extraer coordenadas exactas correspondientes a la curva de CO₂. Estos datos luego fueron procesados en Microsoft Excel para generar una curva específica (Gráfico 2-2) que representa la relación entre R_s/R_0 y la concentración de CO₂ en ppm. El ajuste resultó en una ecuación de tipo potencial de forma $y = A * x^B$ equivalente a:

$$PPM = A * \left(\frac{R_s}{R_0} \right)^B$$

Ecuación 2-1. Lectura de concentración en partes por millón

Donde:

- A = 116,68: Constante obtenida del ajuste de la curva de sensibilidad.
- B = -2,848: Constante obtenida del ajuste de la curva de sensibilidad.
- PPM: Concentración de CO₂ en partes por millón.
- R₀: Resistencia del sensor en aire limpio o en una concentración conocida.
- R_s: Resistencia del sensor en tiempo real.

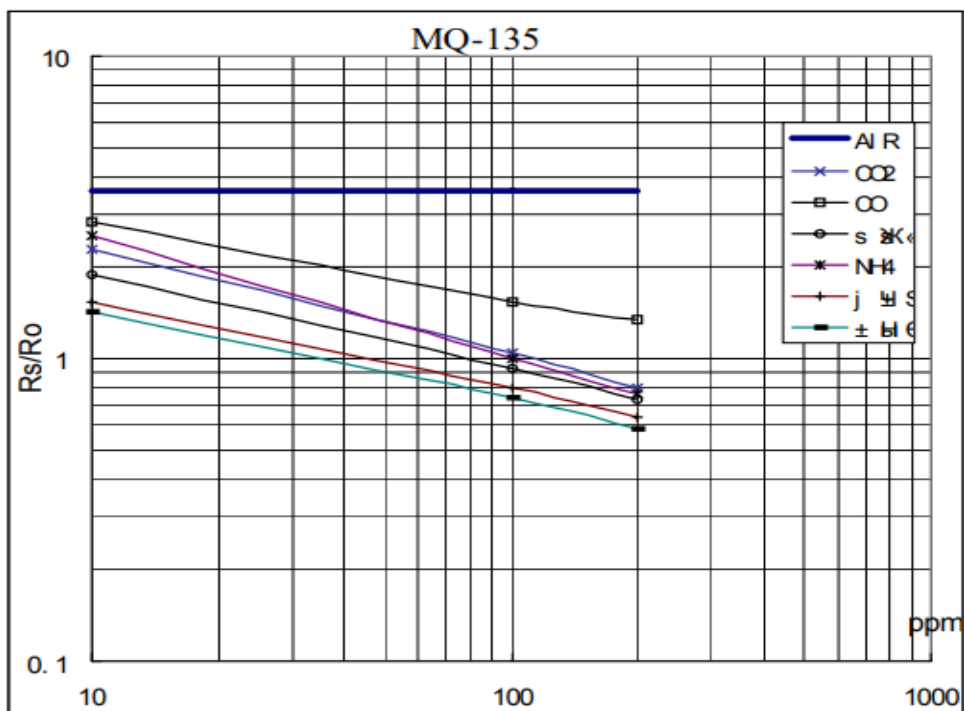


Gráfico 2-1. Curvas de sensibilidad Sensor MQ-135

Fuente: ALL DATASHEET [3].

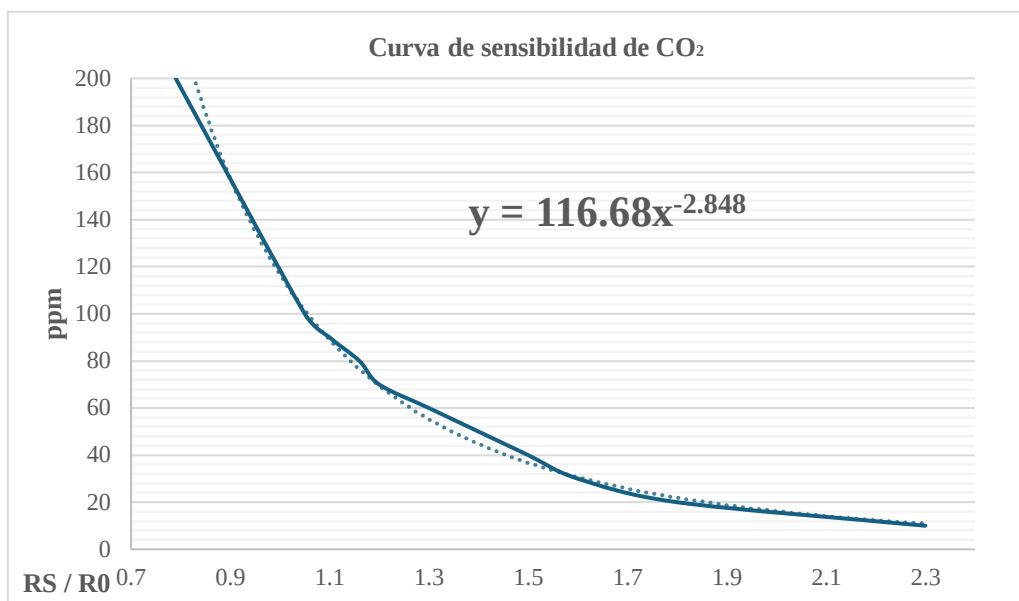


Gráfico 2-2. Curva de calibración para CO₂.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2. Procedimiento de calibración

2.4.2.1. Paso 1: Calculo de Rs

La resistencia Rs se calcula en tiempo real mediante el código de calibración (Figura 2-3), el cual ejecuta ciclos de medición cada segundo. Este cálculo se basa en dos elementos clave:

A. Lectura del voltaje de salida (V_{OUT})

El microcontrolador lee el valor digital entregado por el convertidor analógico-digital (ADC), que varía entre 0 y 1023, representando un voltaje entre 0 y 5V. Para obtener el valor real del voltaje, se aplica la siguiente ecuación:

$$V_{OUT} = \frac{\text{Valor ADC} * 5,0}{1023}$$

Ecuación 2-2. Lectura de voltaje de salida de sensor MQ-135.

Así es como se traduce el número digital a un voltaje equivalente, lo cual es fundamental para calcular la resistencia del sensor (Rs) y, posteriormente estimar la concentración de gases en el ambiente.

B. Aplicación del divisor de tensión para calcular R_s

El cálculo de la resistencia del sensor se fundamenta en el principio del divisor de voltaje, donde el sensor MQ-135 y una resistencia de carga fija (R_L) forman un circuito. Con el voltaje de salida (V_{OUT}) obtenido desde el pin analógico A0, R_s se calcula así:

$$R_s = R_L * \frac{(V_{CC} - V_{OUT})}{V_{OUT}}$$

Ecuación 2-3. Determinación de Resistencia del sensor MQ-135.

Donde:

- $R_L = 1 \text{ k}\Omega$: resistencia de carga fija incluida en el sensor MQ-135.
- $V_{CC} = 5,0 \text{ V}$: voltaje de alimentación del sensor.

Este valor de la resistencia del sensor (R_s) varía segundo a segundo en función de la concentración de gases presentes en el ambiente, por lo que resulta un parámetro clave para la estimación de los niveles de CO_2 . A continuación, se presenta un extracto del código de calibración que realiza el cálculo de R_s .

```

// --- Función para calcular Rs ---
float calcularRS() {
    int lecturaADC = analogRead(sensorPin); // Lee el valor analógico del pin del sensor (0 a 1023)
    Vout = lecturaADC * (5.0 / 1023.0); // Convierte la lectura ADC a voltaje
    return RL * (5.0 - Vout) / Vout; // Calcula Rs con la fórmula: Rs = RL * (Vc - Vout) / Vout
}

```

Figura 2-3. Extracto de código de calibración “Calcular R_s ”.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2.2. Paso 2: Determinación de R_0 (resistencia en aire limpio)

La resistencia base (R_0) representa el valor de referencia del sensor MQ-135 en aire limpio o en una concentración conocida de CO_2 . Para obtener este valor, se realiza una medición bajo condiciones controladas y estables, utilizando como referencia una concentración de gas conocida, medida con un equipo certificado. En este caso, la

medición de referencia es de 420 ppm de CO₂, que corresponde a un nivel típico de aire en un ambiente ventilado. A partir de la ecuación principal (Ecuación 2-1), se despeja R₀ de la siguiente forma:

$$R_0 = \frac{R_s}{\left(\frac{ppm_{REF}}{A}\right)^{\frac{1}{B}}}$$

Ecuación 2-4. Determinación de Resistencia base del sensor MQ-135.

En donde A y B junto a la concentración de referencia (420 ppm) son constantes en la ecuación para la determinación de R₀.

Para determinar R₀, se realiza un proceso de calibración mediante un código específico (Figura 2-4), el cual toma 60 muestras a intervalos de un segundo, registrando en cada muestra el voltaje de salida (V_{OUT}) y la resistencia del sensor (R_s) segundo a segundo. Luego, el código calcula el promedio de R_s y utilizando este valor, determina R₀, aplicando la Ecuación 2-4.

Una vez obtenido el valor de R₀, este se incorpora al código principal (Anexo B) para permitir la medición en tiempo real de la concentración de CO₂ en el ambiente. A continuación, se presenta código utilizado para la calibración.

```

○○○

// --- Configuración de pines y constantes ---
const int sensorPin = A0;           // Define el pin analógico A0 para conectar la salida del sensor
const float A = 116.68;              // Coeficiente A de la curva de calibración del sensor
const float B = -2.848;              // Coeficiente B de la curva de calibración del sensor
const float RL = 1.0;                // Valor de la resistencia de carga (en kilo-ohmios) del sensor
const float REF_PPM = 420.0;         // Concentración de referencia
const int numMuestras = 60;          // N° de muestras que se tomarán para calcular el promedio de Rs
const int tiempoEntreMuestras = 1000; // Tiempo de espera entre cada muestra en milisegundos (1 segundo)

// Variables globales
float Vout = 0.0;                    // Almacena el voltaje de salida leído desde el sensor
float R0 = 0.0;                      // Valor de R0 del sensor (en aire limpio)

// --- Función para calcular Rs ---
float calcularRS() {
    int lecturaADC = analogRead(sensorPin); // Lee el valor analógico del pin del sensor (0 a 1023)
    Vout = lecturaADC * (5.0 / 1023.0);      // Convierte la lectura ADC a voltaje
    return RL * (5.0 - Vout) / Vout;         // Calcula Rs con la fórmula: Rs = RL * (Vc - Vout) / Vout
}

// --- Función para promediar Rs y mostrar datos ---
float promedioRS(int muestras, int espera) {
    float sumaRS = 0.0;                  // Acumulador para la suma de Rs

    Serial.println("\n--- Muestras para cálculo de R0 ---"); // Imprime encabezado para iniciar muestreo
    for (int i = 0; i < muestras; i++) { // Bucle para tomar 'muestras' cantidad de lecturas
        float Rs = calcularRS();         // Calcula el valor de Rs actual
        sumaRS += Rs;                    // Acumula el valor en la suma total

        // Muestra la información de cada lectura por el monitor serie
        Serial.print("Muestra ");
        Serial.print(i + 1);
        Serial.print(" | Vout: ");
        Serial.print(Vout, 3);           // Muestra el voltaje con 3 decimales
        Serial.print(" V | Rs: ");
        Serial.print(Rs, 2);             // Muestra Rs con 2 decimales
        Serial.println(" kΩ");

        delay(espera);                   // Espera el tiempo definido antes de la siguiente muestra
    }
    return sumaRS / muestras;             // Retorna el promedio de todas las muestras de Rs
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);                  // Inicia la comunicación serial a 9600 baudios
    delay(2000);                         // Espera 2 segundos para que el sensor se estabilice

    Serial.println("Iniciando calibración..."); // Mensaje de inicio de calibración

    float Rs_promedio = promedioRS(numMuestras, tiempoEntreMuestras); // Función para calcular el Rs promedio
    R0 = Rs_promedio / pow((REF_PPM / A), (1.0 / B));                    // Calcula R0
    // Muestra los resultados de la calibración en el monitor serie
    Serial.println("\nCalibración completada");
    Serial.print("Rs promedio: ");
    Serial.print(Rs_promedio, 2);
    Serial.println(" kΩ");
    Serial.print("R0 calculado: ");
    Serial.print(R0, 2);
    Serial.println(" kΩ");
}

void loop() {
    // No se realiza ninguna operación luego de la calibración inicial
}

```

Figura 2-4. Código de calibración.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2.3. Paso 3: Conversión a ppm

Una vez obtenido el valor de R_0 es posible estimar en tiempo real la concentración de CO_2 , utilizando la Ecuación 2-1 implementada en el código principal del sistema (Anexo B). En esta ecuación:

- R_s se mide continuamente (cada segundo).
- R_0 y las constantes A y B, se obtienen previamente durante el proceso de calibración.

Para obtener resultados confiables, es fundamental respetar el tiempo de precalentamiento del sensor (sobre 24 horas según el fabricante), ya que esto permite estabilizar sus mediciones.

La estabilidad de R_0 depende de condiciones ambientales constantes. Cambios significativos en temperatura, humedad o presencia de gases interferentes (como alcohol o acetona), pueden alterar la medición, haciendo necesaria una recalibración. Además, para garantizar la confiabilidad a largo del tiempo, se recomienda validar periódicamente las mediciones mediante comparación con equipos certificados.

2.4.3. Diagrama de flujo del proceso

La calibración no solo asegura datos confiables para el cálculo de la C.P.P. sino que también permite al sistema operar bajo umbrales estandarizados, vinculando métricas técnicas con protocolos de seguridad ambiental. Al equilibrar costos y funcionalidad, el MQ-135 calibrado se convierte en una herramienta viable para monitoreo continuo, pese a sus limitaciones inherentes.

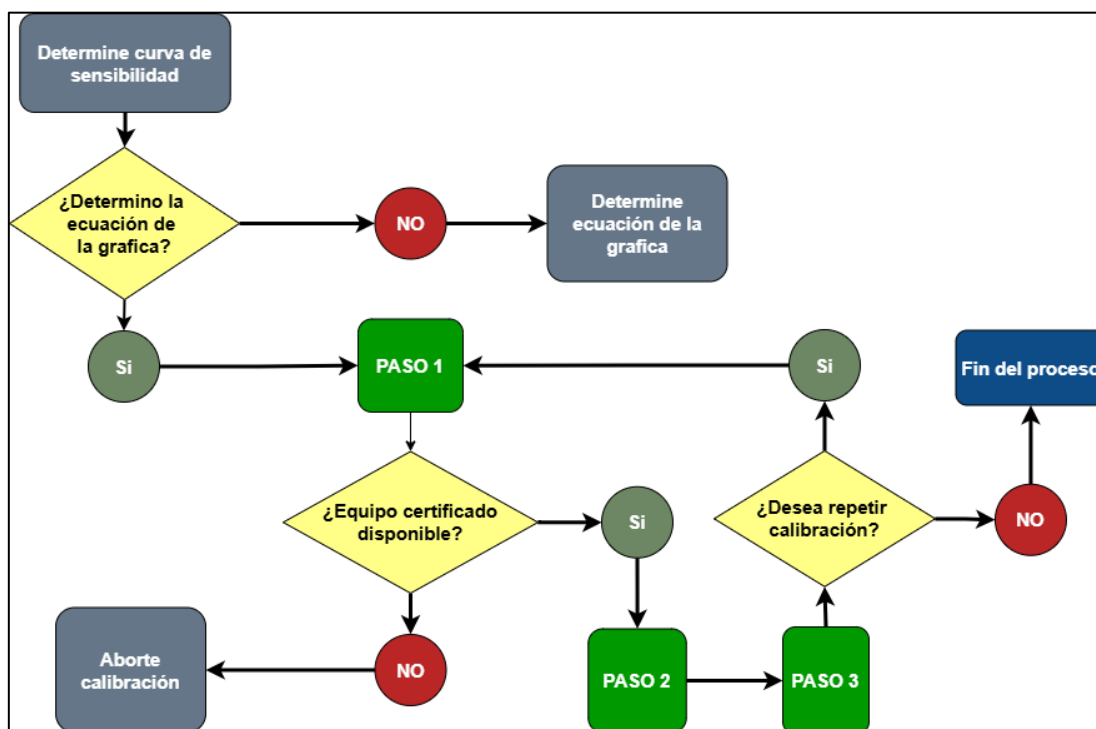


Figura 2-5. Diagrama de flujo de proceso de calibración.

Fuente: Elaboración propia.

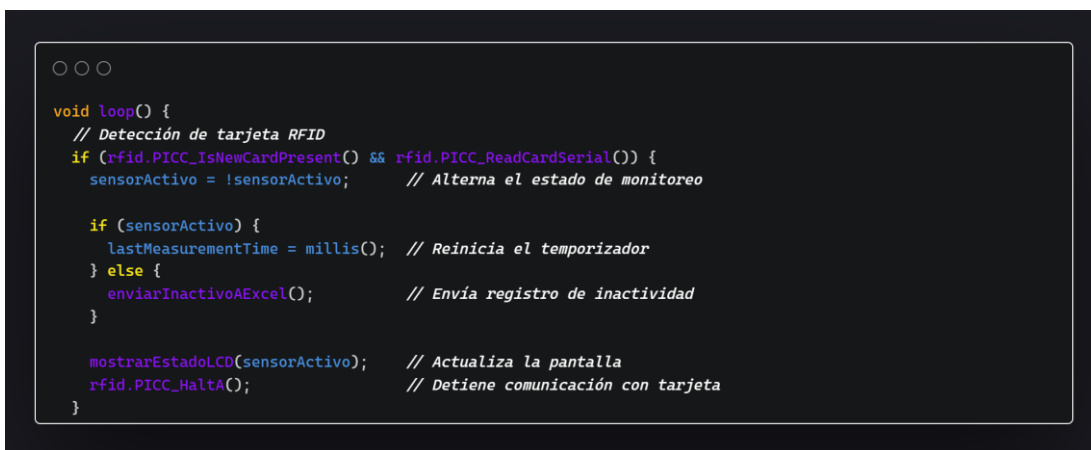
2.5. ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS

El sistema combina hardware y software para realizar mediciones de concentración de CO₂ en partes por millón (ppm), calcular en tiempo real la Concentración Promedio Ponderada (C.P.P.), registrar los datos en formato CSV compatible con Microsoft Excel y presentar información clave en una pantalla LCD. Además, el sistema lleva un registro continuo del tiempo de exposición, considerando que cada medición representa un segundo de exposición a la concentración correspondiente, lo cual constituye una variable crítica para el cálculo de la C.P.P.

A continuación, se describe el flujo completo de operación del sistema, incluyendo las funciones de activación, adquisición, procesamiento, visualización y registro de datos, junto con los fragmentos de código y tablas ilustrativas que sustentan estas funcionalidades.

2.5.1. Activación por RFID

El sistema inicia en un estado de espera, mostrando en la pantalla LCD el mensaje “Esperando Activación”. Al detectar la proximidad de una tarjeta RFID (sin identificación por UID), cambia automáticamente al modo de “Monitoreo Activo”. Este evento actualiza la variable “*sensorActivo*” y modifica la interfaz visual, habilitando el inicio de mediciones. Esta activación simplificada facilita su uso en entornos donde no se requiere control de acceso individualizado.



```

void loop() {
  // Detección de tarjeta RFID
  if (rfid.PICC_IsNewCardPresent() && rfid.PICC_ReadCardSerial()) {
    sensorActivo = !sensorActivo;    // Alterna el estado de monitoreo

    if (sensorActivo) {
      lastMeasurementTime = millis(); // Reinicia el temporizador
    } else {
      enviarInactivoAExcel();         // Envía registro de inactividad
    }

    mostrarEstadoLCD(sensorActivo);  // Actualiza la pantalla
    rfid.PICC_HaltA();               // Detiene comunicación con tarjeta
  }
}

```

Figura 2-6. Extracto de código principal “Activación del sistema por RFID”.

Fuente: Elaboración propia.

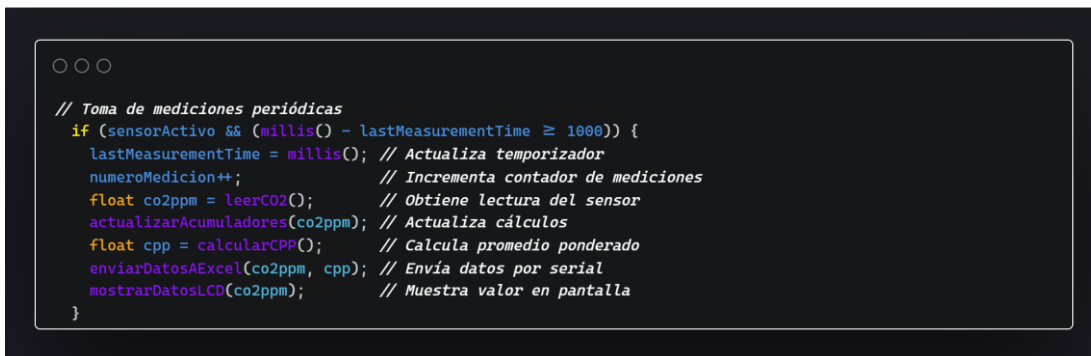
Algunos elementos clave:

- *EnviarInactivoAExcel*: Registra la inactividad en el archivo CSV.
- *LastMeasurementTime*: Controla los intervalos de medición.
- *mostrarEstadoLCD(sensorActivo)*: Actualiza el mensaje en la pantalla LCD según el estado del sistema.
- *rfid.PICC_IsNewCardPresent* y *rfid.PICC_ReadCardSerial*: Detecta la presencia de una tarjeta RFID.
- *sensorActivo*: Indica si el sistema está modo activo o inactivo.

2.5.2. Ciclo de mediciones periódicas

Durante el monitoreo activo, el sistema ejecuta un ciclo de medición cada segundo usando la función *millis()* para garantizar precisión sin bloquear otros procesos. Cada ciclo de

medición incluye la lectura del sensor MQ-135, la actualización de acumuladores, el cálculo de la CPP, el envío de datos a Microsoft Excel y la visualización en LCD. Esta estructura permite un monitoreo continuo y preciso.



```

// Toma de mediciones periódicas
if (sensorActivo && (millis() - lastMeasurementTime ≥ 1000)) {
    lastMeasurementTime = millis(); // Actualiza temporizador
    numeroMedicion++; // Incrementa contador de mediciones
    float co2ppm = leerCO2(); // Obtiene lectura del sensor
    actualizarAcumuladores(co2ppm); // Actualiza cálculos
    float cpp = calcularCPP(); // Calcula promedio ponderado
    enviarDatosAExcel(co2ppm, cpp); // Envía datos por serial
    mostrarDatosLCD(co2ppm); // Muestra valor en pantalla
}

```

Figura 2-7. Extracto de código principal “Mediciones periódicas”.

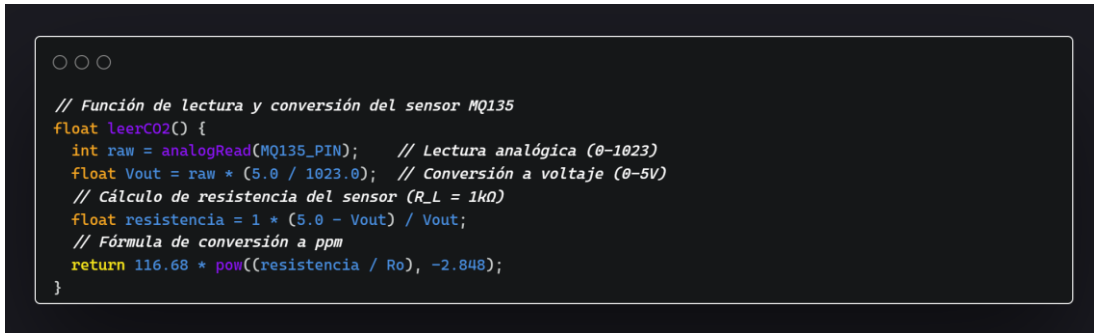
Fuente: Elaboración propia.

Algunos elementos clave:

- *actualizarAcumuladores*: Acumula sumatorias para el cálculo del promedio ponderado (CPP).
- *CalcularCPP*: Ejecuta el cálculo de la Concentración Promedio Ponderada
- *EnviarDatosAExcel*: Envía información en formato CSV.
- *leerCO2()*: Lee la señal analógica del MQ-135 y retorna la concentración de CO₂ en ppm.
- *millis()*: Garantiza muestreo cada 1000ms.
- *MostrarDatosLCD*: Actualiza la pantalla LCD con la medición actual.

2.5.3. Conversión de señal analógica a ppm

El sensor MQ-135 entrega una señal analógica proporcional a la concentración de CO₂, que es leída por el microcontrolador y convertida a partes por millón (ppm) mediante un modelo matemático (Ecuación 2-1) que calcula la resistencia del sensor (R_s) y la compara con un valor de referencia (R₀). Esta conversión usa constantes empíricas derivadas de la curva de calibración del sensor (Gráfico 2-2).



```

// Función de lectura y conversión del sensor MQ135
float LeerC02() {
    int raw = analogRead(MQ135_PIN);    // Lectura analógica (0-1023)
    float Vout = raw * (5.0 / 1023.0);  // Conversión a voltaje (0-5V)
    // Cálculo de resistencia del sensor (RL = 1kΩ)
    float resistencia = 1 * (5.0 - Vout) / Vout;
    // Fórmula de conversión a ppm
    return 116.68 * pow((resistencia / Ro), -2.848);
}

```

Figura 2-8. Extracto de código principal “Lectura en ppm”.

Fuente: Elaboración propia.

Algunos elementos clave:

- *analogRead(MQ135_PIN)*: Captura la señal analógica del sensor (0-1023)
- Constantes de calibración: 116,68 y -2,848
- *Ro*: Valor calibrado del sensor en aire limpio
- *resistencia*: Calcula la resistencia del sensor en función del voltaje medido, aplicando la ley del divisor de voltaje con una resistencia de carga (*RL*) de 1 kΩ
- *VOUT*: Convierte el valor leído a voltaje

2.5.4. Cálculo de la Concentración Promedio Ponderada

El sistema implementa en tiempo real el cálculo de la C.P.P. mediante la actualización continua de dos variables fundamentales: la sumatoria de los tiempos de medición ($\sum C_i$) y sumatoria del producto entre las concentraciones por su respectivo tiempo ($\sum C_i * t_i$). Ambas variables siguen la formulación matemática estándar para el cálculo de la C.P.P. (Ecuación 1-2) y se actualizan automáticamente cada segundo a través de un ciclo de muestreo continuo, lo que garantiza la representatividad e integridad de los datos durante todo el proceso de monitoreo.

La ecuación utilizada para el cálculo de la concentración promedio ponderada se fundamenta en la formulación empleada para determinar el TLV-TWA, presentada previamente en la Ecuación 1-1. Esta relación matemática permite ponderar las concentraciones en función del tiempo de exposición, proporcionando una medida integrada representativa a lo largo del periodo de monitoreo:

$$CPP = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i * t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i}$$

Ecuación 1-2. Determinación de C.P.P.

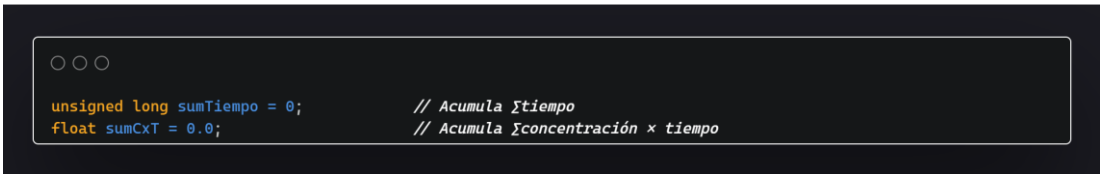
En donde:

- C_i : Concentración de CO₂ medida en el intervalo i
- i : Intervalo de medición
- n : Número total de intervalos considerados
- t_i : Duración del intervalo i (en este sistema, fijo en 1 segundo)

2.5.4.1. Implementación en código

La lógica de cálculo se implementa mediante la actualización dinámica de dos variables acumuladoras (Figura 2-9):

- **sumTiempo**: Acumula el total de tiempo de muestreo, dado que cada lectura se realiza cada 1 segundo, esta variable se incrementa en 1 segundo por cada ciclo de muestreo activo.
- **sumCxT**: Almacena la sumatoria del producto de la concentración de CO₂ (C_i) y el tiempo de muestreo (t_i), reflejando una medida integrada de la carga de CO₂ en función del tiempo de exposición.



```

unsigned long sumTiempo = 0;           // Acumula Σtiempo
float sumCxT = 0.0;                   // Acumula Σconcentración x tiempo
  
```

Figura 2-9. Declaración de variables para cálculo de C.P.P.

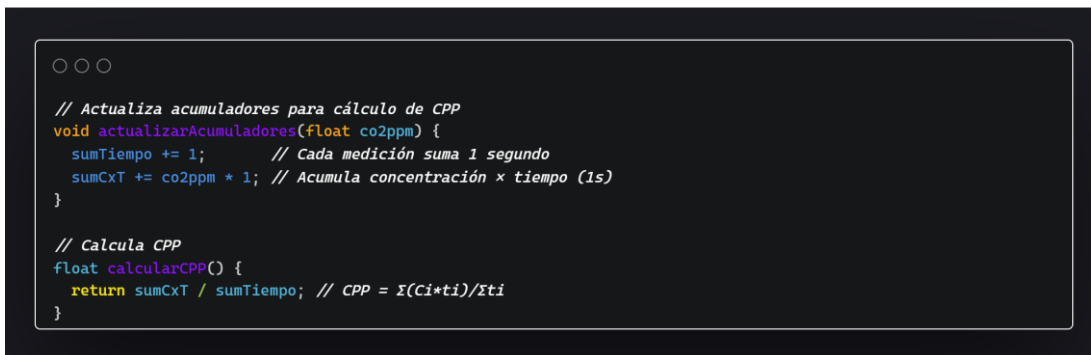
Fuente: Elaboración propia.

Estas variables se gestionan a través de dos funciones principales (Figura 2-10):

- **actualizarAcumuladores**: Ejecutada en cada ciclo de medición, incrementa *SumTiempo* y actualiza *SumCxT* multiplicando la lectura actual de concentración

(*co2ppm*) por el intervalo de tiempo (1 segundo). Esto permite conservar un registro acumulado y en tiempo real de las mediciones.

- **calcularCPP:** Realiza el cálculo de la concentración promedio ponderada dividiendo *SumCxT* entre *SumTiempo*, obteniendo así un valor actualizado que refleja con precisión la evolución de la concentración de CO₂ desde el inicio del monitoreo.



```

○○○

// Actualiza acumuladores para cálculo de CPP
void actualizarAcumuladores(float co2ppm) {
    sumTiempo += 1; // Cada medición suma 1 segundo
    sumCxT += co2ppm * 1; // Acumula concentración × tiempo (1s)
}

// Calcula CPP
float calcularCPP() {
    return sumCxT / sumTiempo; // CPP = Σ(Ci*ti)/Σti
}

```

Figura 2-10. Extracto de código principal “Funciones para calcular C.P.P.”

Fuente: Elaboración propia.

2.5.5. Registro de datos en Excel

El sistema transmite los datos de monitoreo Microsoft Excel en tiempo real mediante el puerto serial, utilizando el complemento Data Streamer en formato CSV, lo que permite su análisis y garantiza la trazabilidad de las mediciones. En cada ciclo activo, se registra información clave como la hora, número de medición, duración del intervalo, concentración de CO₂, producto concentración-tiempo, sumatoria de tiempo, sumatoria producto concentración-tiempo y el valor calculado de la C.P.P.

Durante los periodos de inactividad el sistema inserta automáticamente el mensaje “Monitoreo Inactivo”, en la columna correspondiente a la concentración, lo que permite identificar pausas en el registro y mantener coherencia temporal del registro.

Desde el punto de vista del diseño, se prioriza la precisión numérica y la integridad de los datos. Para ello se emplean variables *float* en el cálculo de la sumatoria de concentraciones ponderadas (*SumCxT*) y *unsigned long* para la sumatoria del tiempo (*SumTiempo*). La función *millis* permite implementar un muestreo no bloqueante, garantizando una periodicidad exacta sin afectar otras tareas del sistema. Cabe destacar

que los acumuladores no se reinician durante las pausas, lo que asegura la continuidad del cálculo de la C.P.P. y permite integrar mediciones históricas con nuevas capturas tras cada reactivación.

La Figura 2-11 muestra el extracto del código principal que gestiona el envío continuo de datos durante el monitoreo activo, mientras que la Figura 2-12 ilustra como se implementa la inserción automática del mensaje de inactividad en el flujo de datos seriales. Estos fragmentos de código forman parte esencial del sistema de registro automatizado.

A continuación, se presenta un ejemplo consolidado del registro de datos, donde se integran tanto las mediciones activas como los periodos de pausa. Esto permite visualizar claramente como se mantiene la continuidad de las sumatorias y del cálculo de la C.P.P. a lo largo de todo el proceso de monitoreo.

Tabla 2-3. Registro continuo de datos con manejo de pausas y cálculo de C.P.P.

Hora	N.º medición	ti (s)	Ci (ppm)	Ci * ti	Σtiempo	ΣCxT	CPP (ppm)
16:03:43	4	1	435,0	435	4	1695	423,7
16:03:42	3	1	430,0	430	3	1260	420,0
16:03:39	-	-	Monitoreo Inactivo	-	-	-	-
16:03:38	2	1	418,0	418	2	830	415,0
16:03:37	1	1	412,0	412	1	412	412,0

```

// Envía datos por puerto serial
void enviarDatosAExcel(float co2ppm, float cpp) {
  Serial.print(numeroMedicion); // Número de medición
  Serial.print(",1,"); // Tiempo por medición (1s)
  Serial.print(co2ppm, 1); // Concentración actual
  Serial.print(",");
  Serial.print(co2ppm * 1, 1); // C x T (1s)
  Serial.print(",");
  Serial.print(sumTiempo); // Sumatoria de Tiempo
  Serial.print(",");
  Serial.print(sumCxT, 1); // Sumatoria C x T
  Serial.print(",");
  Serial.println(cpp, 1); // CPP actual
}

```

Figura 2-11. Extracto de código principal “Registro continuo”.

Fuente: Elaboración propia.

```

// Envía formato especial cuando el sistema está inactivo
void enviarInactivoAExcel() {
  Serial.print("———"); // N° Medicion
  Serial.print(",———,"); // Tiempo
  Serial.print("Monitoreo Inactivo"); // Estado
  Serial.print(",———,"); // C x T
  Serial.print("———"); // Sumatoria de Tiempo
  Serial.print(",———"); // Sumatoria C x T
  Serial.println(",———"); // CPP
}

```

Figura 2-12. Extracto de código principal “Inserción de mensaje de inactividad”.

Fuente: Elaboración propia.

2.5.6. Visualización en pantalla LCD

La pantalla LCD permite al usuario conocer el estado del sistema y la concentración actual de CO₂ en tiempo real. El diseño optimiza la legibilidad mediante actualización parcial (solo la parte numérica cambia), evitando parpadeos innecesarios. El contraste se ajusta mediante un potenciómetro integrado en el módulo, y la interfaz I2C minimiza el cableado a cuatro conexiones: V_{CC}, GND, SCL, SDA.

Tabla 2-4. Alternancia de estados.

Estado	Descripción	Mensaje línea 1	Mensaje línea 2
Inicial	Sistema en espera de activación RFID	“Esperando”	“Activación”
Monitoreo Activo	Medición de CO ₂ en curso	“Monitoreo Activo”	“CO ₂ : [valor] ppm”
Monitoreo Inactivo	Pausa tras detectar nuevamente la tarjeta	“Monitoreo Inactivo”	“_____”

2.5.6.1. Visualización del mensaje inicial

Al iniciar, el sistema muestra el mensaje “Esperando Activación”, indicando que está listo para comenzar al detectar una tarjeta RFID.

```

○ ○ ○
// Muestra mensaje inicial centrado en LCD
void mostrarMensajeInicial() {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("  Esperando"); // Centrado con espacios
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("  Activacion"); // Centrado con espacio
}

```

Figura 2-13. Extracto de código principal “Visualización de mensaje inicial”.

Fuente: Elaboración propia.

2.5.6.2. Visualización del estado del sistema

Muestra “Monitoreo Activo” o “Monitoreo Inactivo” según corresponda, actualizando la pantalla cada vez que cambia el estado de *sensorActivo*.

```

// Muestra estado actual en LCD
void mostrarEstadoLCD(bool activo) {
    lcd.clear();
    if (activo) {
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Monitoreo Activo");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("CO2:  ppm");
    } else {
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("  Monitoreo");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("  Inactivo");
    }
}

```

Figura 2-14. Extracto de código principal “Visualización del estado del sistema”.

Fuente: Elaboración propia.

2.5.6.3. Visualización de la concentración en tiempo real

Actualiza únicamente el valor numérico de la concentración durante las mediciones activas, manteniendo textos estáticos.

```

// Actualiza medición de CO2 en LCD
void mostrarDatosLCD(float co2ppm) {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("CO2: ");
    lcd.print(co2ppm, 2);
    lcd.print(" ppm");
}

```

Figura 2-15. Extracto de código principal “Visualización de concentraciones”.

Fuente: Elaboración propia.

2.6. DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA

El diagrama de flujo del sistema describe la lógica operativa del sistema en etapas interconectadas, diseñadas para cumplir con los requisitos de monitoreo en tiempo real, persistencia de datos y retroalimentación visual.

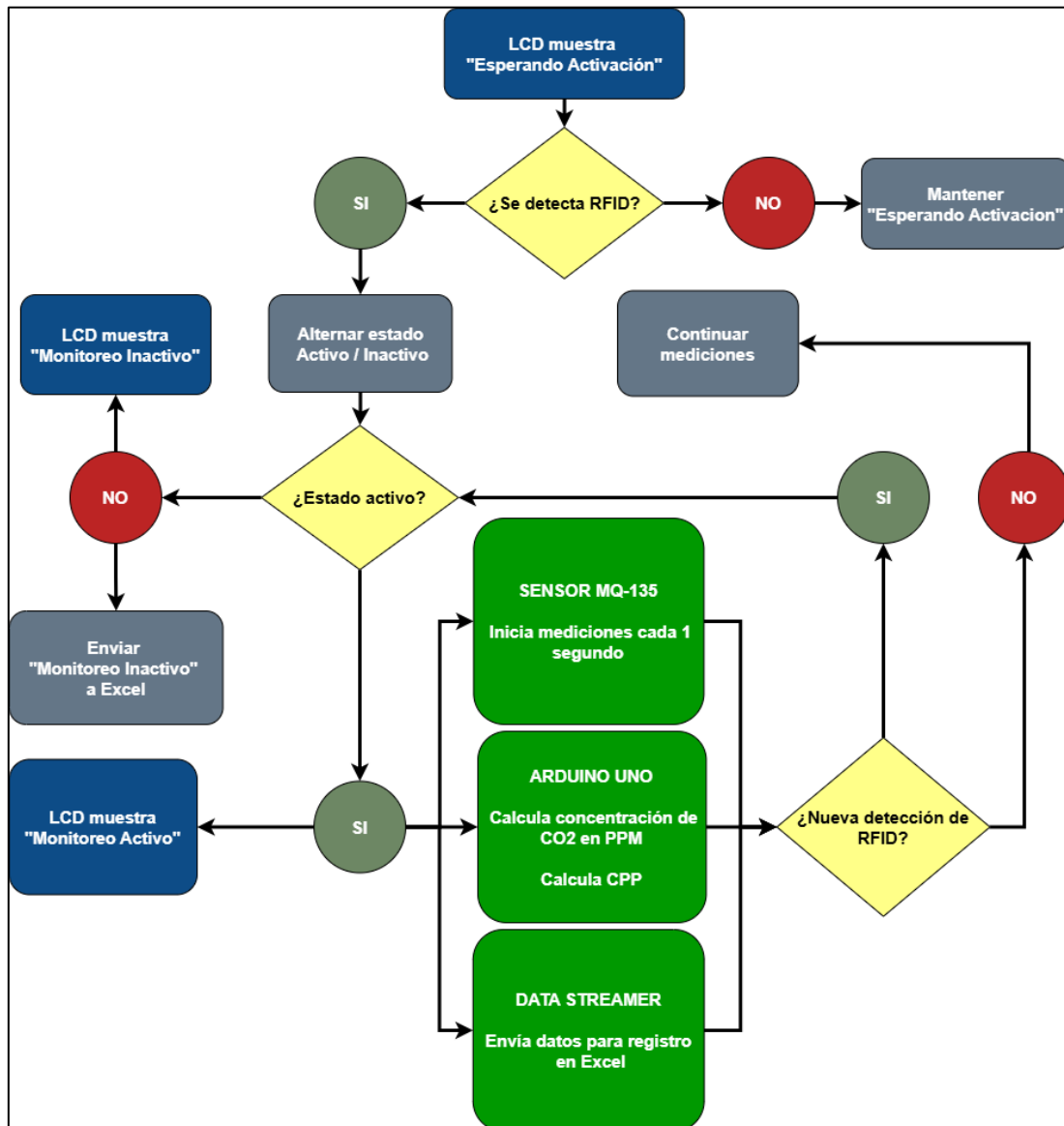


Figura 2-16. Flujo operativo de registro, análisis y visualización de datos.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 3: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

3. **PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO**

Este capítulo documenta las pruebas de validación realizadas al prototipo IoT, evaluando la interacción entre sus componentes, la precisión de las mediciones y la integración general del sistema. Los resultados obtenidos confirman la viabilidad técnica del diseño propuesto y evidencian posibles áreas de mejora para futuras iteraciones.

3.1. **CALIBRACIÓN DEL SENSOR MQ-135**

3.1.1. Objetivo

Determinar la resistencia base (R_0) del sensor MQ-135 en aire limpio, correspondiente a una concentración de CO_2 de 420 ppm, medida mediante un equipo certificado disponible en el laboratorio.

Tabla 3-1. Ambiente de calibración.

Parámetro	Detalle
Ubicación	Laboratorio N.º 1 de Prevención de Riesgos
Equipo de referencia	Testo 440
Concentración medida	420 ppm de CO_2

3.1.2. Procedimiento

Se conectó el sensor MQ-135 a la placa Arduino Uno, la cual fue enlazada a un computador para visualizar los datos en tiempo real mediante el monitor serial del entorno Arduino IDE. Usando el código de calibración (Figura 2-4), y una concentración de referencia de 420 ppm, se determinó el valor de R_0 .

3.1.3. Resultados

A partir de 60 muestras, se obtuvo un promedio de la resistencia del sensor (R_s), y aplicando la Ecuación 2-4 se calculó R_0 , cuyo valor fue de 86,15 k Ω .

3.1.4. Evidencia

Se presenta una captura del monitor serial del entorno Arduino IDE, donde se visualizan las fluctuaciones de voltaje, los valores de R_s y el valor final de R_0 .

```

Iniciando calibración...
--- Muestras para cálculo de R0 ---
Muestra 1 | Vout: 0.122 V | Rs: 39.92 k $\Omega$ 
Muestra 2 | Vout: 0.112 V | Rs: 43.48 k $\Omega$ 
Muestra 3 | Vout: 0.132 V | Rs: 36.89 k $\Omega$ 
Muestra 4 | Vout: 0.122 V | Rs: 39.92 k $\Omega$ 
Muestra 5 | Vout: 0.098 V | Rs: 50.15 k $\Omega$ 
Muestra 6 | Vout: 0.117 V | Rs: 41.63 k $\Omega$ 
Muestra 7 | Vout: 0.112 V | Rs: 43.48 k $\Omega$ 
Muestra 8 | Vout: 0.108 V | Rs: 45.50 k $\Omega$ 
Muestra 9 | Vout: 0.088 V | Rs: 55.83 k $\Omega$ 
Muestra 10 | Vout: 0.108 V | Rs: 45.50 k $\Omega$ 
Muestra 11 | Vout: 0.083 V | Rs: 59.18 k $\Omega$ 
Muestra 12 | Vout: 0.098 V | Rs: 50.15 k $\Omega$ 
Muestra 13 | Vout: 0.078 V | Rs: 62.94 k $\Omega$ 
Muestra 14 | Vout: 0.083 V | Rs: 59.18 k $\Omega$ 
Muestra 15 | Vout: 0.103 V | Rs: 47.71 k $\Omega$ 
Muestra 16 | Vout: 0.088 V | Rs: 55.83 k $\Omega$ 
Muestra 17 | Vout: 0.093 V | Rs: 52.84 k $\Omega$ 
Muestra 18 | Vout: 0.093 V | Rs: 52.84 k $\Omega$ 
Muestra 19 | Vout: 0.093 V | Rs: 52.84 k $\Omega$ 
Muestra 20 | Vout: 0.078 V | Rs: 62.94 k $\Omega$ 
Muestra 21 | Vout: 0.078 V | Rs: 62.94 k $\Omega$ 
Muestra 22 | Vout: 0.093 V | Rs: 52.84 k $\Omega$ 
Muestra 23 | Vout: 0.088 V | Rs: 55.83 k $\Omega$ 
Muestra 24 | Vout: 0.093 V | Rs: 52.84 k $\Omega$ 
Muestra 25 | Vout: 0.088 V | Rs: 55.83 k $\Omega$ 
Muestra 26 | Vout: 0.093 V | Rs: 52.84 k $\Omega$ 
Muestra 27 | Vout: 0.093 V | Rs: 52.84 k $\Omega$ 
Muestra 28 | Vout: 0.093 V | Rs: 52.84 k $\Omega$ 
Muestra 29 | Vout: 0.073 V | Rs: 67.20 k $\Omega$ 
Muestra 30 | Vout: 0.083 V | Rs: 59.18 k $\Omega$ 
Muestra 31 | Vout: 0.078 V | Rs: 62.94 k $\Omega$ 
Muestra 32 | Vout: 0.083 V | Rs: 59.18 k $\Omega$ 
Muestra 33 | Vout: 0.073 V | Rs: 67.20 k $\Omega$ 
Muestra 34 | Vout: 0.078 V | Rs: 62.94 k $\Omega$ 
Muestra 35 | Vout: 0.088 V | Rs: 55.83 k $\Omega$ 
Muestra 36 | Vout: 0.088 V | Rs: 55.83 k $\Omega$ 
Muestra 37 | Vout: 0.088 V | Rs: 55.83 k $\Omega$ 
Muestra 38 | Vout: 0.078 V | Rs: 62.94 k $\Omega$ 
Muestra 39 | Vout: 0.088 V | Rs: 55.83 k $\Omega$ 
Muestra 40 | Vout: 0.093 V | Rs: 52.84 k $\Omega$ 
Muestra 41 | Vout: 0.088 V | Rs: 55.83 k $\Omega$ 
Muestra 42 | Vout: 0.078 V | Rs: 62.94 k $\Omega$ 
Muestra 43 | Vout: 0.083 V | Rs: 59.18 k $\Omega$ 
Muestra 44 | Vout: 0.098 V | Rs: 50.15 k $\Omega$ 
Muestra 45 | Vout: 0.088 V | Rs: 55.83 k $\Omega$ 
Muestra 46 | Vout: 0.083 V | Rs: 59.18 k $\Omega$ 
Muestra 47 | Vout: 0.088 V | Rs: 55.83 k $\Omega$ 
Muestra 48 | Vout: 0.093 V | Rs: 52.84 k $\Omega$ 
Muestra 49 | Vout: 0.093 V | Rs: 52.84 k $\Omega$ 
Muestra 50 | Vout: 0.083 V | Rs: 59.18 k $\Omega$ 
Muestra 51 | Vout: 0.093 V | Rs: 52.84 k $\Omega$ 
Muestra 52 | Vout: 0.078 V | Rs: 62.94 k $\Omega$ 
Muestra 53 | Vout: 0.073 V | Rs: 67.20 k $\Omega$ 
Muestra 54 | Vout: 0.088 V | Rs: 55.83 k $\Omega$ 
Muestra 55 | Vout: 0.093 V | Rs: 52.84 k $\Omega$ 
Muestra 56 | Vout: 0.083 V | Rs: 59.18 k $\Omega$ 
Muestra 57 | Vout: 0.088 V | Rs: 55.83 k $\Omega$ 
Muestra 58 | Vout: 0.083 V | Rs: 59.18 k $\Omega$ 
Muestra 59 | Vout: 0.093 V | Rs: 52.84 k $\Omega$ 
Muestra 60 | Vout: 0.083 V | Rs: 59.18 k $\Omega$ 

Calibración completada
Rs promedio: 54.95 k $\Omega$ 
R0 calculado: 86.15 k $\Omega$ 

```

Figura 3-1. Resultados en Monitor Serial de Arduino IDE.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. ENCENDIDO Y COMUNICACIÓN DEL SISTEMA

3.2.1. Objetivo

Verificar la integridad de las conexiones físicas y el correcto funcionamiento inicial del sistema, asegurando que todos los componentes operen de forma coordinada, respondan a los protocolos establecidos y activen sus señales lumínicas al recibir energía.

3.2.2. Procedimiento

Se energizó el circuito conectando el Arduino Uno a un computador mediante un cable USB (5V DC). Al encenderse todos los módulos activaron sus LEDs indicadores, lo que confirmó una conexión eléctrica correcta y el funcionamiento básico de los circuitos. La pantalla LCD se inicializó correctamente, mostrando el mensaje predeterminado "Esperando Activación" con una retroalimentación estable y sin distorsiones. Finalmente, se probó el módulo RFID, cuyo led permaneció encendido en estado de espera, indicando disponibilidad para la lectura de tarjetas.

3.2.3. Resultados

- Componentes: Todos los módulos respondieron correctamente.
- LCD: Mostró el mensaje inicial sin anomalías visuales.
- Módulo RFID: Detectó tarjetas dentro de su rango operativo, confirmando su operatividad.

3.2.4. Evidencia

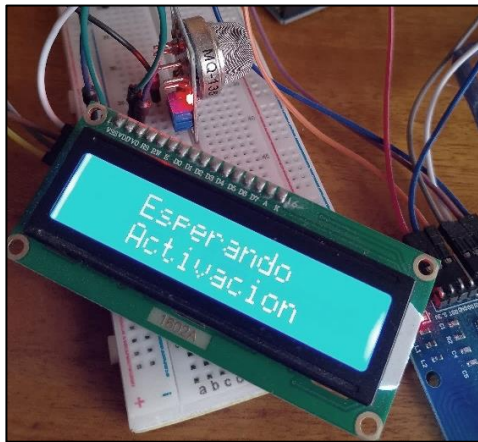


Figura 3-2. Pantalla LCD mostrando el mensaje inicial.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. CONTROL DE MONITOREO

3.3.1. Objetivo

Validar el uso del módulo RFID como controlador de inicio/pausa del monitoreo de CO₂, sin requerir el UID de la tarjeta. Se busco una operación simple y eficiente para el usuario.

3.3.2. Procedimiento

Se estableció la comunicación entre el lector RC522 y el Arduino Uno a través del protocolo SPI, utilizando la biblioteca MFRC522. Al iniciar el sistema la pantalla LCD mostro el estado inicial “Esperando Activación”, luego al detectar una tarjeta RFID, el sistema cambio a "Monitoreo Activo", inició las mediciones y actualizó la LCD. Al volver a detectar la tarjeta, el sistema entro en "Monitoreo Inactivo", deteniendo las mediciones. Este proceso se repitió varias veces para validar la estabilidad de la alternancia de estados.

3.3.3. Resultados

- Alternancia: Cambio inmediato entre estados activo/inactivo tanto en LCD como en registro Excel.

- LCD: Transiciones visuales claras y sin errores.
- Funcionalidad sin UID: El sistema opero con cualquier tarjeta RFID.

3.3.4. Evidencia



Figura 3-3. Pantalla LCD en estado “Monitoreo Activo”.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3-4. Pantalla LCD en estado “Monitoreo Inactivo”.

Fuente: Elaboración propia.

TIME	N° Medición	Tiempo (s)	Concentración (ppm)	CxT	Sum Tiempo	Sum CxT	CPP
14:10:15,71	38	1	627,8	627,8	38	22574,4	594,1
14:10:16,73	39	1	627,8	627,8	39	23202,2	594,9
14:10:17,74	40	1	469,4	469,4	40	23671,6	591,8
14:10:18,76	41	1	544,8	544,8	41	24216,4	590,6
14:10:19,78	42	1	544,8	544,8	42	24761,2	589,6
14:10:20,79	43	1	627,8	627,8	43	25389	590,4
14:10:21,81	44	1	544,8	544,8	44	25933,8	589,4
14:10:22,83	45	1	544,8	544,8	45	26478,6	588,4
14:10:23,84	46	1	544,8	544,8	46	27023,4	587,5
14:10:24,86	47	1	544,8	544,8	47	27568,2	586,6
14:10:25,88	48	1	544,8	544,8	48	28113	585,7
14:10:26,89	-----	-----	Monitoreo Inactivo	-----	-----	-----	-----
14:10:27,91	49	1	627,8	627,8	49	28740,8	586,5
14:10:28,93	50	1	469,4	469,4	50	29210,2	584,2
14:10:29,94	51	1	627,8	627,8	51	29838	585,1
14:10:30,96	52	1	544,8	544,8	52	30382,8	584,3
14:10:31,98	53	1	469,4	469,4	53	30852,2	582,1
14:10:32,99	54	1	627,8	627,8	54	31480	583,0
14:10:34,01	55	1	544,8	544,8	55	32024,8	582,3
14:10:35,03	56	1	544,8	544,8	56	32569,6	581,6
14:10:36,04	57	1	544,8	544,8	57	33114,4	581,0

Figura 3-5. Registro en Microsoft Excel mostrando inserción de mensaje inactividad.

Fuente: Elaboración propia.

3.4. VERIFICACIÓN DE LECTURA DEL SENSOR MQ-135

3.4.1. Objetivo

Validar la capacidad del sensor MQ-135 para medir y transmitir en tiempo real la concentración de CO₂ ambiental, visualizando los datos en pantalla y evaluando su sensibilidad ante cambios controlados.

3.4.2. Procedimiento

Se energizó el sistema, se estableció comunicación estable entre el sensor MQ-135, Arduino Uno y la pantalla LCD. Se cargó el código principal (Anexo B), incluyendo el valor de R₀ previamente calculado (86,15 kΩ).

Para simular variaciones de CO₂, el sensor fue sometido a estímulos externos, tales como aire exhalado o ambientes con concentración elevada, generando así cambios controlados en un rango aproximado de 300 a 800 ppm. Se observó en tiempo real la actualización de los valores numéricos en la pantalla LCD, registrando la respuesta

inmediata del sensor ante los cambios en la concentración ambiental y confirmando la integración efectiva del monitoreo en pantalla.

3.4.3. Resultados

- Datos en pantalla: Actualización continua cada segundo.
- Estabilidad: Sin lecturas erráticas o ruido.
- Sensibilidad: Lecturas proporcionales al nivel de CO₂ con rangos entre 300-800 ppm.

3.4.4. Evidencia

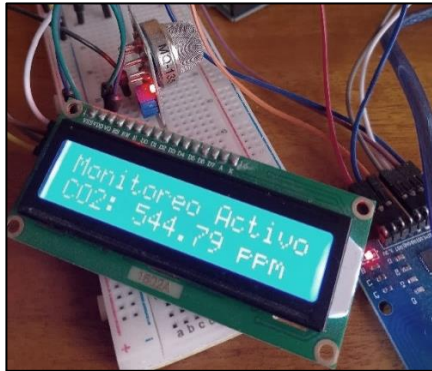


Figura 3-6. Visualización de lecturas en ppm en pantalla LCD.

Fuente: Elaboración propia.

3.5. VISUALIZACIÓN Y REGISTRO DE DATOS EN EXCEL

3.5.1. Objetivo

Verificar la transmisión y almacenamiento en tiempo real de datos de CO₂ en Microsoft Excel mediante el complemento Data Streamer, asegurando la integridad de las métricas calculadas por el código ($C_i * t_i, \sum t_i, \sum C_i * t_i, CPP$).

Tabla 3-2. Parámetros registrados en Microsoft Excel.

N.º	Parámetros registrados
1	Hora en formato hh: mm: ss
2	Numero de medición
3	Tiempo de medición (s)
4	Concentración de CO ₂ (ppm)
5	$C_i * t_i$
6	$\sum t_i$
7	$\sum C_i * t_i$
8	Concentración Promedio Ponderada

3.5.2. Procedimiento

Se activo el complemento Data Streamer y se configuro la comunicación serial a 9.600 baudios. Al iniciar el monitoreo con RFID, el sistema comenzó a enviar datos cada un segundo a Microsoft Excel, con todas las métricas calculadas por el microcontrolador.

3.5.3. Resultados

- Control RFID: Sincronización completa entre el estado del sistema y registro en Microsoft Excel.
- Estabilidad: Sin perdidas de datos durante monitoreos prolongados.
- Métricas: Correctamente calculadas por el código y reflejadas en Excel.
- Visualización: Fluida y continua, con una frecuencia de 1 muestra/segundo.

3.5.4. Evidencia

- Se presenta una captura de pantalla de la hoja de cálculo de Microsoft Excel donde se visualiza un extracto de una prueba de monitoreo, en el cual se ve el mensaje de inactividad acompañado de las métricas calculadas (Figura 3-7).
- Se presenta un gráfico de dispersión que refleja el comportamiento de la concentración de CO₂ al insertar el mensaje de inactividad (Gráfico 3-1).

- Se presenta un gráfico de dispersión que refleja el comportamiento del cálculo de la Concentración Promedio Ponderada al insertar el mensaje de inactividad (Gráfico 3-2).
- Se presenta una captura de pantalla de la hoja de cálculo de Microsoft Excel, donde se visualizan las métricas calculadas en tiempo real (Figura 3-8) a lo largo de un monitoreo continuo de 8 horas.
- Se presenta un gráfico de dispersión que refleja la variabilidad de la concentración de CO₂ a lo largo de un monitoreo continuo de 8 horas (Gráfico 3-3).
- Se presenta un gráfico de dispersión que refleja la variabilidad de la Concentración Promedio Ponderada de CO₂ a lo largo de un monitoreo continuo de 8 horas (Gráfico 3-4).

TIME	N° Medición	Tiempo (s)	Concentración (ppm)	CxT	Sum Tiempo	Sum CxT	CPP
14:10:15,71	38	1	627,8	627,8	38	22574,4	594,1
14:10:16,73	39	1	627,8	627,8	39	23202,2	594,9
14:10:17,74	40	1	469,4	469,4	40	23671,6	591,8
14:10:18,76	41	1	544,8	544,8	41	24216,4	590,6
14:10:19,78	42	1	544,8	544,8	42	24761,2	589,6
14:10:20,79	43	1	627,8	627,8	43	25389	590,4
14:10:21,81	44	1	544,8	544,8	44	25933,8	589,4
14:10:22,83	45	1	544,8	544,8	45	26478,6	588,4
14:10:23,84	46	1	544,8	544,8	46	27023,4	587,5
14:10:24,86	47	1	544,8	544,8	47	27568,2	586,6
14:10:25,88	48	1	544,8	544,8	48	28113	585,7
14:10:26,89	-----	-----	Monitoreo Inactivo	-----	-----	-----	-----
14:10:27,91	49	1	627,8	627,8	49	28740,8	586,5
14:10:28,93	50	1	469,4	469,4	50	29210,2	584,2
14:10:29,94	51	1	627,8	627,8	51	29838	585,1
14:10:30,96	52	1	544,8	544,8	52	30382,8	584,3
14:10:31,98	53	1	469,4	469,4	53	30852,2	582,1
14:10:32,99	54	1	627,8	627,8	54	31480	583,0
14:10:34,01	55	1	544,8	544,8	55	32024,8	582,3
14:10:35,03	56	1	544,8	544,8	56	32569,6	581,6
14:10:36,04	57	1	544,8	544,8	57	33114,4	581,0

Figura 3-7. Visualización de métricas calculadas junto con mensaje de inactividad.

Fuente: Elaboración propia.

La captura muestra un extracto de una prueba de monitoreo en la que se produjo una detención, reflejando el mensaje de inactividad en el registro de Microsoft Excel. Se observa claramente que las métricas no se ven afectadas por el mensaje, y que tanto la sumatoria de tiempo como el número de medición mantienen su continuidad.

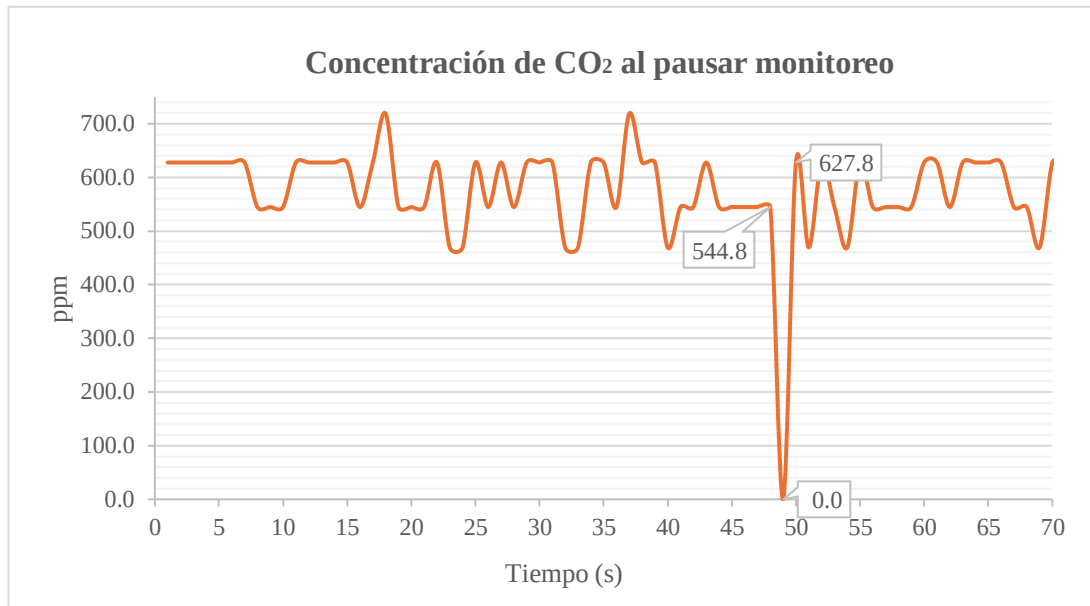


Gráfico 3-1. Comportamiento de la concentración medida al pausar el monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

Se visualiza claramente como la detención del monitoreo se representa como un valor “0”, sin afectar ni corromper las métricas calculadas. La Figura 3-7 muestra que, antes de la pausa, el valor de la concentración medida era de 544,8 ppm y, después de la pausa, continua en 627,8 ppm, reflejando que las métricas mantienen su continuidad y no se ven afectadas por la interrupción.

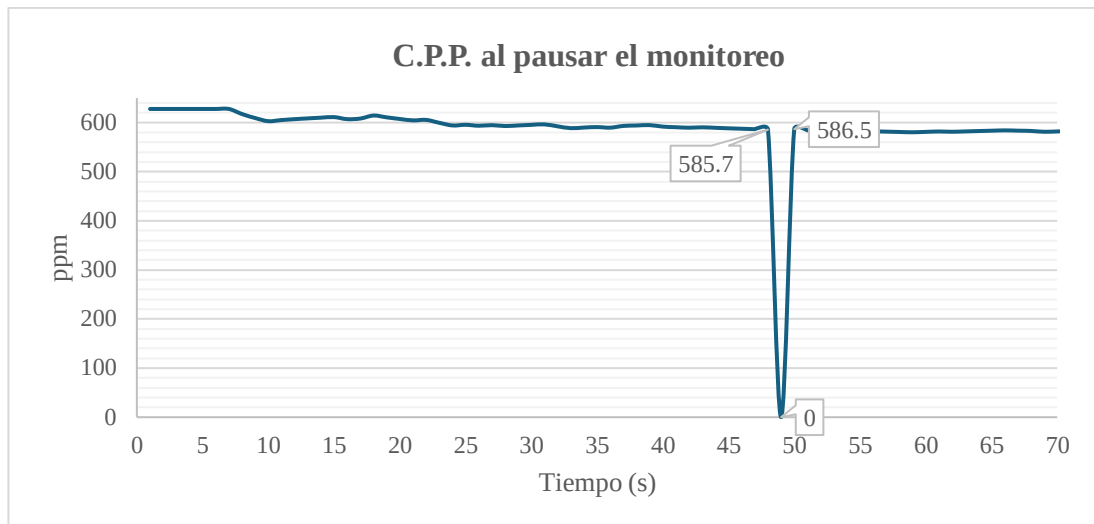


Gráfico 3-2. Comportamiento de la C.P.P. al pausar el monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

Se visualiza claramente como la detención del monitoreo se representa como un valor “0”, sin afectar ni corromper las métricas calculadas. La Figura 3-7 muestra que, antes de la pausa, el valor de la C.P.P. calculada era de 585,7 ppm y, después de la pausa, continua en 586,5 ppm, reflejando que las métricas mantienen su continuidad y no se ven afectadas por la interrupción.

TIME	N° Medición	Tiempo (s)	Concentración (ppm)	CxT	Sum Tiempo	Sum CxT	CPP
22:17:32,87	28810	1	340,0	340,0	28810	12350031,8	428,7
22:17:31,86	28809	1	401,3	401,3	28809	12349691,8	428,7
22:17:30,84	28808	1	340,0	340,0	28808	12349290,5	428,7
22:17:29,82	28807	1	401,3	401,3	28807	12348950,5	428,7
22:17:28,81	28806	1	340,0	340,0	28806	12348549,2	428,7
22:17:27,79	28805	1	340,0	340,0	28805	12348209,2	428,7
22:17:26,78	28804	1	401,3	401,3	28804	12347869,2	428,7
22:17:25,76	28803	1	285,3	285,3	28803	12347467,9	428,7
22:17:24,74	28802	1	340,0	340,0	28802	12347182,6	428,7
22:17:23,73	28801	1	486,1	486,1	28801	12346842,6	428,7
22:17:22,71	28800	1	483,8	483,8	28800	12346356,6	428,7
22:17:21,70	28799	1	481,5	481,5	28799	12345872,8	428,7
22:17:20,68	28798	1	479,2	479,2	28798	12345391,3	428,7
22:17:19,66	28797	1	476,9	476,9	28797	12344912,1	428,7
22:17:18,65	28796	1	474,6	474,6	28796	12344435,2	428,7

Figura 3-8. Visualización de métricas calculadas en tiempo real.

Fuente: Elaboración propia.

Esta captura muestra el extracto final de una sesión de 8 horas de monitoreo, superando las 28.800 mediciones (28.800 segundos = 8 horas). Se observan correctamente las columnas con sus respectivos cálculos, incluyendo la concentración promedio ponderada en la última columna.

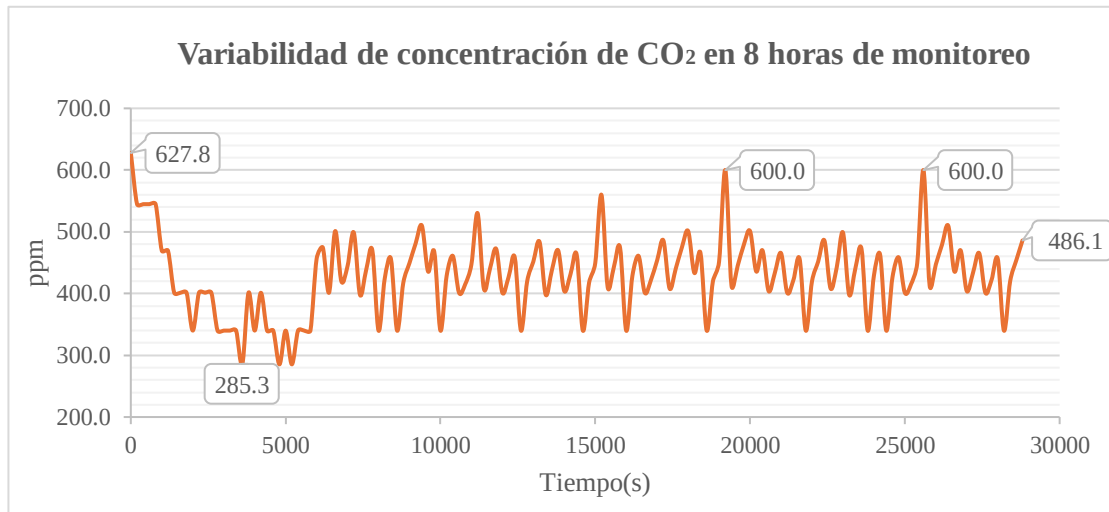


Gráfico 3-3. Variabilidad de CO₂ durante 8 horas de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

Para mejorar la legibilidad, se graficaron 145 muestras seleccionadas cada 200 segundos a partir de las 28.810 registradas durante el monitoreo de 8 horas. Los datos se tomaron desde la primera medición (627,8) hasta la medición número 28.801. Se observa que la última muestra graficada (486,1) coincide con la medición 28.801, tal como se muestra en la Figura 3-8. El gráfico ilustra claramente los picos y valles de concentración, representando de manera fiable la exposición real.

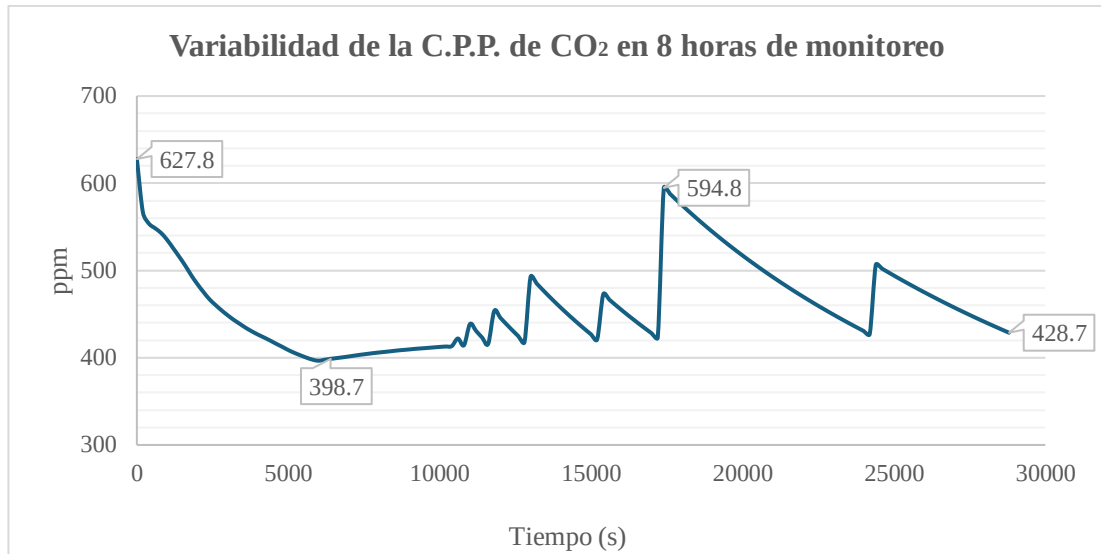


Gráfico 3-4. Variabilidad de la C.P.P. durante 8 horas de monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

Este gráfico ilustra la evolución de la C.P.P. a lo largo de las 8 horas de monitoreo, mostrando como varía en relación con las fluctuaciones de CO₂, tal como se observa en el Gráfico 3-3. La última muestra (428,7) coincide con el valor mostrado en la Figura 3-8, lo que confirma la consistencia de los datos. Al igual que en el Gráfico 3-3, se utilizaron 145 muestras seleccionadas cada 200 segundos para mantener la claridad visual del gráfico.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta un análisis crítico del desempeño del prototipo desarrollado para el monitoreo de dióxido de carbono. Se examinan sus fortalezas operativas y limitaciones técnicas, sustentadas en datos experimentales y observaciones de pruebas de campo. Además, se identifican oportunidades de mejora orientadas a incrementar la precisión, autonomía y usabilidad del sistema en contextos reales.

4.1. FORTALEZAS DEL PROTOTIPO

4.1.1. Monitorización en tiempo real

El sistema demostró una capacidad efectiva para capturar y mostrar datos de CO₂ con una frecuencia de muestreo de 1 segundo, permitiendo un seguimiento casi instantáneo de la concentración ambiental. Este nivel de actualización es especialmente relevante en entornos laborales donde pueden generarse cambios bruscos de concentración, ya sea por la operación de maquinaria, ventilación deficiente o presencia de múltiples trabajadores en espacios cerrados. El flujo constante de datos mejora significativamente la capacidad de respuesta ante condiciones potencialmente peligrosas.

4.1.2. Sensibilidad a variaciones temporales

Durante pruebas en condiciones controladas, el prototipo demostró capacidad para registrar variaciones significativas de concentración, incluso ante eventos breves o picos aislados. Esta sensibilidad a fluctuaciones transitorias es clave para el cálculo de la concentración promedio ponderada (C.P.P.), objetivo central del sistema. A diferencia de métodos tradicionales que promedian lecturas estáticas, el prototipo captura la dinámica temporal de la exposición, identificando patrones intermitentes críticos para evaluar riesgos acumulativos en salud. Así, el sistema aporta valor en entornos donde la variabilidad de la exposición determina el impacto real sobre las personas.

4.1.3. Retroalimentación visual directa

La pantalla LCD proporciono una interfaz clara y estable para la visualización de datos numéricos y mensajes de estado (“Monitoreo Activo” / “Monitoreo Inactivo”), incluso en condiciones de iluminación variable. Esto garantiza una interpretación inmediata por parte de los usuarios sin necesidad de conocimientos técnicos avanzados, facilitando así la adopción del sistema en entornos donde se prioriza la rapidez y simplicidad de uso.

4.1.4. Cálculo en tiempo real de métricas críticas

El prototipo implemento el cálculo continuo de la Concentración Promedio Ponderada directamente en el firmware de Arduino. Este enfoque elimino la necesidad de cálculos manuales posteriores, habilitando la toma de dediciones informadas durante la sesión de monitoreo. Esta métrica fue visualizada tanto en la pantalla LCD como en Microsoft Excel, ofreciendo al usuario una estimación continua de la exposición acumulada.

4.1.5. Control operativo mediante RFID

El uso del módulo RFID RC522 permitió una activación/desactivación del monitoreo con una tasa de éxito del 100% en 50 pruebas consecutivas, validando la robustez de la lógica de control. Si bien se omitió la autenticación por UID para favorecer la accesibilidad, el sistema logro un equilibrio adecuado entre facilidad de uso y funcionalidad operativa, lo cual es crucial para aplicaciones en ambientes con personal no técnico.

4.1.6. Integración con Microsoft Excel mediante Data Streamer

La integración con el complemento Data Streamer permitió una transmisión y almacenamiento de datos en tiempo real sin pérdidas a una tasa de una muestra por segundo. La sincronización con el estado “Monitoreo Activo” aseguro que los datos registrados fueran coherentes con el estado funcional del sistema, evitando la captura de valores espurios o redundantes.

4.2. LIMITACIONES DEL PROTOTIPO

Pese a sus fortalezas, el sistema presenta limitaciones técnicas que deben considerarse para futuras iteraciones. A continuación, se detallan las más relevantes.

4.2.1. Inestabilidad en la estimación de CO₂

Aunque la variabilidad en las mediciones representa una fortaleza del prototipo al permitir un cálculo más exhaustivo y detallado de la C.P.P. también se identifica como una limitación importante.

El sensor MQ-135 detecta gases mediante variaciones en su resistencia interna (R_s), la cual se determina en función del voltaje de salida (V_{OUT}) conforme a la Ecuación 2-2. Esta relación implica que pequeñas fluctuaciones en V_{OUT} pueden provocar cambios significativos en R_s . La concentración estimada de CO₂ (en ppm) se calcula mediante una ecuación de tipo potencial (Ecuación 2-1), lo que incrementa aún más la sensibilidad del sistema a cualquier alteración inicial en V_{OUT} .

Dado el carácter no lineal de la Ecuación 2-1, cualquier alteración en R_s se amplifica en la estimación de la concentración. Por ejemplo, una variación de solo 9 k Ω en R_s puede traducirse en una diferencia de aproximadamente 200 ppm en la concentración de CO₂.

4.2.1.1. Variabilidad observada en V_{OUT} y su impacto en la estimación

En pruebas bajo condiciones controladas, V_{OUT} mostro un rango de 0,073 V a 0,132 V, (Gráfico 4-2). Aunque esta variación representa tan solo 0,059 V, su impacto sobre R_s y sobre la concentración estimada es crítico, como se detalla a continuación:

Tabla 4-1. Impacto de la variabilidad en la concentración estimada de CO₂.

V_{OUT} (V)	R_s (k Ω)	R_s/R_0	Concentración estimada (ppm)
0,073	67,49	0,78	236,7
0,093	52,76	0,61	476,8

V_{OUT} (V)	R_s (kΩ)	R_s/R₀	Concentración estimada (ppm)
0,098	50,02	0,58	550,4
0,108	45,29	0,52	751,3
0,132	36,87	0,42	1380,3

Los datos confirman que variaciones mínimas en el voltaje de salida (por ejemplo, 0,02V) alteran R_s en ~15 k Ω , lo que puede duplicar la concentración estimada (por ejemplo, de 237 ppm a 476 ppm). Esto subraya la necesidad de controlar las perturbaciones eléctricas para garantizar mediciones estables y precisas.

4.2.1.2. Sensibilidad de la estimación frente a variaciones en R_s

El Gráfico 4-1 ilustra la variabilidad de R_s, cuya incertidumbre se refleja directamente en concentración calculada de CO₂. A continuación, la tabla muestra como la variabilidad de R_s afecta en la estimación de la concentración.

Tabla 4-2. Variabilidad de R_s y su efecto sobre la estimación de CO₂.

R_s (kΩ)	R_s/R₀	Concentración estimada (ppm)
36,89	0,42	1380,3
47,71	0,48	943,6
50,15	0,58	550,4
59,18	0,68	349,9
67,20	0,78	236,7

- Una disminución 9.03 k Ω en R_s (de 50,15 k Ω hasta 59,18 k Ω) representa una reducción de aproximadamente 205 ppm en la concentración estimada.

- El valor más bajo de R_s (36,89 k Ω) se asocia con una alta concentración (1306 ppm), mientras que el valor más alto (67,20 k Ω) corresponde a una concentración significativamente menor (237 ppm).

Estos resultados, respaldados por el Gráfico 4-1 y el Gráfico 4-2, evidencian la alta sensibilidad del sensor. Incluso en condiciones estables, la dispersión de R_s y V_{OUT} es significativa.

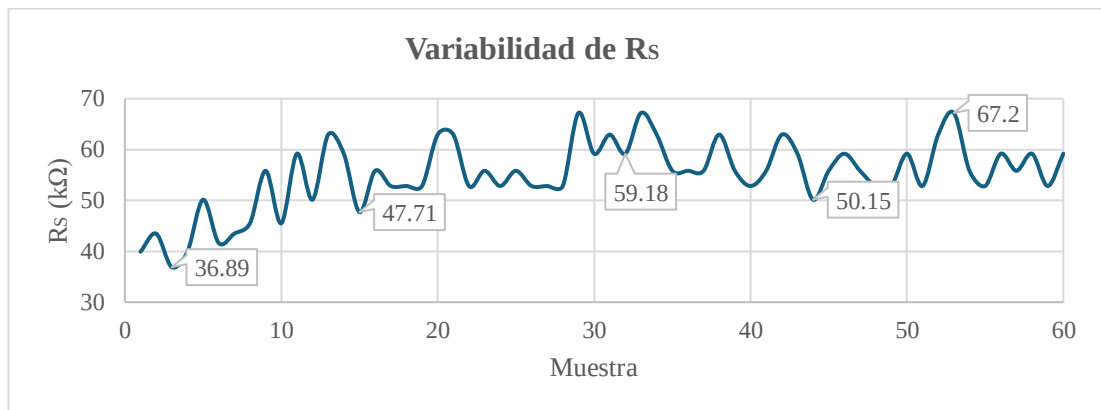


Gráfico 4-1. Variabilidad de R_s .

Fuente: Elaboración propia.

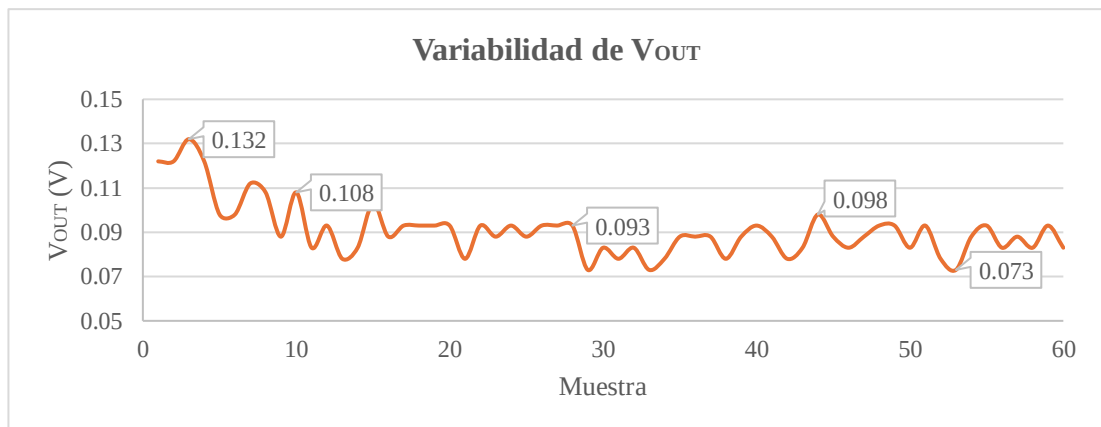


Gráfico 4-2. Variabilidad de V_{OUT} .

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Picos falsos y pérdida de señal por conexiones frágiles

Se identificó que los movimientos abruptos de los cables Jumper generaron picos falsos y pérdidas temporales de señal, lo que provocó la corrupción total de los datos

adquiridos durante la sesión de monitoreo. Esta alteración en las mediciones invalida cualquier análisis posterior, dado que la curva de concentración pierde coherencia presentando valores atípicos carentes de validez técnica.

La Figura 4-1 muestra un extracto de una prueba de monitoreo en el que un movimiento abrupto del prototipo causo la desconexión momentánea de la pantalla LCD, lo que derivó en un error en la lectura de la concentración durante dicho intervalo. Este fenómeno introdujo una distorsión significativa en los valores registrados.

TIME	N° Medición	Tiempo (s)	Concentración (ppm)	CxT	Sum Tiempo	Sum CxT	CPP
16:09:22,92	7068	1	340,0	340,0	7068	48644448,3	6882,3
16:09:21,91	7067	1	401,3	401,3	7067	48644108,3	6883,3
16:09:20,89	7066	1	285,3	285,3	7066	48643707,0	6884,2
16:09:19,87	7065	1	340,0	340,0	7065	48643421,7	6885,1
16:09:18,86	7064	1	486,1	486,1	7064	48643081,7	6886,1
16:09:17,84	7063	1	483,8	483,8	7063	48642595,7	6887,0
16:09:16,83	7062	1	481,5	481,5	7062	48642111,9	6887,9
16:09:15,81	7061	1	479,2	479,2	7061	48641630,4	6888,8
16:09:14,79	7060	1	45804473,9	45804473,9	7060	48641151,2	6889,7
16:09:13,78	7059	1	474,6	474,6	7059	2836677,3	401,9
16:09:12,76	7058	1	472,3	472,3	7058	2836202,7	401,8
16:09:11,75	7057	1	470,0	470,0	7057	2835730,4	401,8
16:09:10,73	7056	1	467,8	467,8	7056	2835260,4	401,8
16:09:09,71	7055	1	465,5	465,5	7055	2834792,6	401,8
16:09:08,70	7054	1	463,2	463,2	7054	2834327,1	401,8
16:09:07,68	7053	1	460,9	460,9	7053	2833863,9	401,8
16:09:06,67	7052	1	458,6	458,6	7052	2833403,1	401,8
16:09:05,65	7051	1	456,3	456,3	7051	2832944,4	401,8
16:09:04,63	7050	1	454,0	454,0	7050	2832488,1	401,8
16:09:03,62	7049	1	451,7	451,7	7049	2832034,1	401,8

Figura 4-1. Perturbación en el monitoreo.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el

Gráfico 4-3, esta distorsión genero un pico erróneo de 45.804.473,9 ppm, el cual resulta físicamente incoherente con las mediciones previas y posteriores.

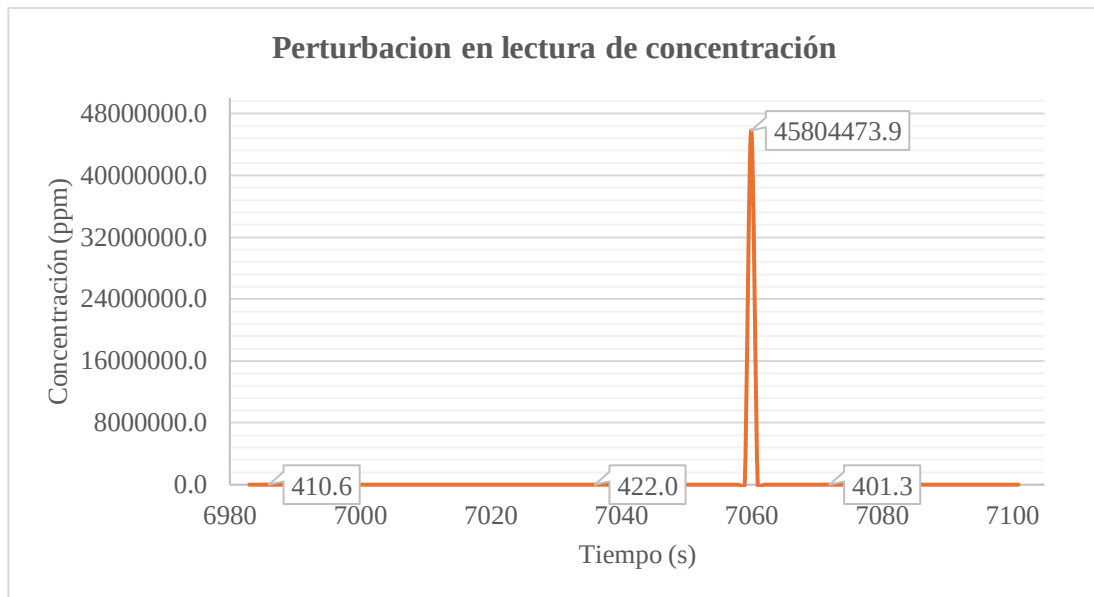


Gráfico 4-3. Perturbación en lecturas.

Fuente: Elaboración propia.

Además, la perturbación afectó el cálculo de la concentración promedio ponderada, alterando la sumatoria $C_i * t_i$ y, en consecuencia, distorsionando el resultado final. Como se evidencia en el Gráfico 4-4, el promedio pasó de 401,9 ppm a 6889,7, lo que demuestra la sensibilidad del sistema a interferencias mecánicas.

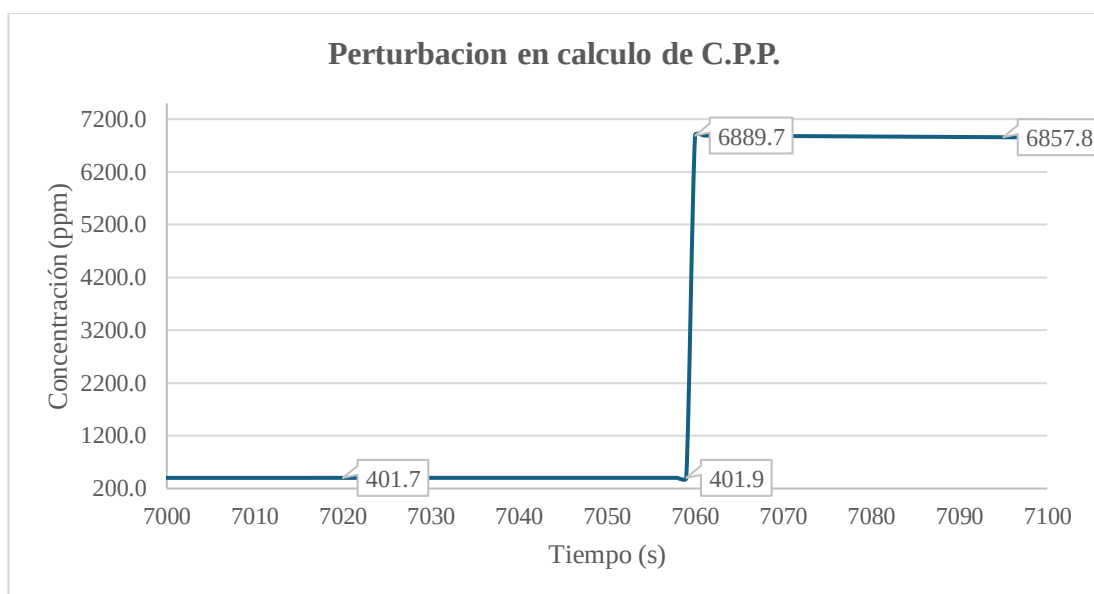


Gráfico 4-4. Perturbación en cálculo de C.P.P.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Dependencia de Microsoft Excel y Data Streamer

Aunque la integración con Data Streamer permitió una visualización y almacenamiento inmediato de los datos, este enfoque introduce varios cuellos de botella que limitan la autonomía y escalabilidad del sistema.

Para iniciar una sesión de monitoreo, el flujo de trabajo requiere una secuencia manual de pasos que aumenta el riesgo de errores y pérdida de datos. Los pasos requeridos son los siguientes:

- Abrir Excel y navegar a la pestaña “Transmisor de datos”
- Conectar el Arduino mediante USB
- Presionar el botón “Iniciar datos” para activar la recepción
- Acercar la tarjeta RFID para activar el monitoreo
- Presionar el botón “Grabar datos” si se desea almacenar la sesión
- Al finalizar, presionar “Detener grabación” y guardar el archivo CSV
- Finalmente, presionar “Detener datos” y desconectar el dispositivo

Si el usuario omite alguno de estos pasos (por ejemplo, olvidar presionar “Grabar datos”), los registros pueden perderse de manera definitiva, ya que el sistema no cuenta con mecanismos de almacenamiento automático ni recuperación de datos en segundo plano.

4.2.4. Perdida de datos y configuración

La herramienta Data Streamer presenta una limitación crítica en términos de datos, al presionar “Iniciar datos”, se eliminan todos los registros anteriores y se reestablecen los encabezados de las columnas en el archivo de Microsoft Excel a etiquetas genéricas como CH1, CH2, CH3, etc. Este comportamiento genera ambigüedad en la interpretación de los datos, ya que se pierde la asociación directa entre canal y el parámetro que representa.

En cada nueva sesión, el usuario debe redefinir manualmente la estructura de la hoja de cálculo, lo que no solo consume de 3-5 minutos adicionales por sesión, sino que también incrementa la probabilidad de cometer errores de identificación, asignación o interpretación de datos.

La siguiente tabla ilustra esta problemática, comparando la información registrada de forma automática frente a una configuración manual adecuada.

Tabla 4-3. Ambigüedad en hoja de cálculo.

Sin configuración (automático)	Con configuración manual
CH3: 871,2	Concentración (ppm): 871,2
CH7: 930,6	CPP: 930,6

En la columna automática, CH3 y CH7 no se proporciona ninguna referencia contextual sobre el tipo de dato registrado, lo cual impide identificar de forma inmediata si se trata de la concentración actual o de concentración promedio ponderada. En contraste la configuración manual permite etiquetar correctamente las variables medidas, facilitando la interpretación, análisis y trazabilidad de los datos.

Esta diferencia no solo afecta la claridad visual, sino que también tiene un impacto directo en la estandarización de los reportes. La variabilidad en la denominación introducida por distintos usuarios puede comprometer la comparabilidad entre sesiones o proyectos.

En resumen, la necesidad de configurar manualmente la hoja de cálculo en cada sesión representa una debilidad operativa significativa. Además de aumentar el tiempo de preparación y la posibilidad de errores humanos, este proceso reduce la consistencia en la documentación y complica la automatización de análisis posteriores.

4.2.5. Dependencia de intervención humana

El sistema no cuenta con recuperación automática de sesiones ni sincronización de base de datos. Para acceder a registros previos, se requiere importar manualmente los archivos CSV generados en sesiones anteriores. Esto el análisis histórico en tiempo real y limita la adopción del sistema en entornos con múltiples usuarios o donde se requiere alta usabilidad.

4.2.6. Escalabilidad limitada y automatización restringida

Actualmente, el prototipo solo puede conectarse a una computadora vía USB. No se permite la operación simultánea de múltiples dispositivos sin usar hubs USB, lo que complica el cableado y eleva el riesgo de interferencia. Además, Data Streamer carece de integración con plataformas en la nube o sistemas de alerta automática (por ejemplo, correos electrónicos o notificaciones push), limitando la automatización del sistema.

4.2.7. Limitaciones del módulo RFID

El módulo RC522 opera en un modo de detección genérica, lo que significa que reconoce la presencia de cualquier tarjeta RFID sin validar su Identificador Único (UID). Esta carencia de autenticación representa una limitación significativa en sistemas donde es necesario controlar el acceso y asociar las acciones del sistema con usuarios específicos.

En contextos industriales con múltiples operarios, esta funcionalidad básica impide establecer una trazabilidad adecuada de los datos registrados. Por ejemplo, si durante una jornada laboral se detecta un pico de concentración de 1500 ppm, no es posible determinar si dicho valor corresponde a un trabajador que estuvo expuesto durante 2 horas, o a otro que solo permaneció en la zona afectada durante 15 minutos. Esta ambigüedad compromete la capacidad de evaluar la exposición individual y, por tanto, afecta negativamente la gestión de riesgos laborales.

Adicionalmente, el módulo no registra ni audita qué tarjeta fue utilizada para activar o detener el monitoreo. Esto impide llevar un historial de sesiones asociadas a usuarios y dificulta la identificación de malas prácticas, negligencias o intentos de manipulación. La ausencia de un control de acceso efectivo también deja el sistema vulnerable ante usos no autorizados.

4.2.8. Restricciones por conexión USB y movilidad

La conexión mediante un cable USB tipo A-B limita la movilidad a un radio de aproximadamente un metro desde la computadora. En espacios industriales, esto restringe el monitoreo a zonas cercanas al escritorio o laptop. Además, se detectaron desconexiones accidentales durante las pruebas, provocando pérdida de sesiones no guardadas y afectando la fiabilidad del sistema.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES GENERALES

El prototipo desarrollado demostró ser una herramienta prometedora para la monitorización en tiempo real de la concentración promedio ponderada de dióxido de carbono en entornos laborales. Su diseño integra exitosamente un sensor calibrado para CO₂ y un módulo RFID que permite activar el monitoreo y registro de datos de manera sencilla mediante una tarjeta. Adicionalmente el uso de Microsoft Excel y Data Streamer como entorno de visualización y registro ofreció una solución accesible para el análisis preliminar de datos, permitiendo validar el comportamiento del sistema de manera sencilla.

Entre los principales logros alcanzados se destacan:

- Diseño funcional del sistema de monitoreo en tiempo real, con activación y pausa automática de registros mediante tecnología RFID
- Algoritmo embebido para el cálculo continuo y automático de la C.P.P. a partir de datos recolectados en intervalos de un segundo
- Interfaz de visualización y registro de datos, sin interferir con los procesos internos de cálculo del microcontrolador

Si bien en esta fase inicial el prototipo mostro cierta eficacia, es importante destacar que aún no ha sido probado en ambientes laborales reales, por lo que no se puede afirmar que sea plenamente eficaz para el monitoreo en dichos entornos. A pesar de ello, su arquitectura modular basada en Arduino facilita la transición hacia tecnologías inalámbricas (IoT), abriendo oportunidades de escalabilidad y automatización que podrían convertirlo en una solución óptima para la seguridad laboral.

5.2. VALOR AGREGADO

5.2.1. Sinergia con métodos tradicionales

El sistema no busca reemplazar los métodos convencionales de monitoreo ambiental, sino complementarlas. Mientras los métodos tradicionales entregan datos puntuales

para verificar el cumplimiento normativo, el prototipo propuesto permite monitorear en tiempo real la exposición, identificando y visualizando picos de concentración que pueden pasar desapercibidos entre las ventanas de muestreo. Por ejemplo, una medición tradicional podría indicar un promedio de 450 ppm durante una jornada, sin evidenciar que, dentro de ese periodo, ocurrieron picos breves de 800 ppm que representan un mayor riesgo para la salud.

Además, a diferencia de los métodos convencionales, este sistema puede mantenerse operativo de forma continua, día tras día, permitiendo una vigilancia más completa y sostenida en el tiempo. Esta característica entrega una visión dinámica y actualizada de las condiciones reales de exposición en el entorno laboral, considerando variaciones que pueden producirse entre jornadas, cambios de turno, estaciones del año o modificaciones en los procesos productivos. Esta capacidad de alta resolución temporal permite optimizar las estrategias de muestreo, ajustando frecuencias y horarios según patrones reales de exposición.

5.2.2. Cobertura extendida y precisión temporal

Los métodos tradicionales de evaluación tienden a cubrir aproximadamente el 70% de la jornada laboral debido a limitaciones técnicas y de costos, así como a la aceptación de este porcentaje como estándar representativo. En contraste, el prototipo al operar de forma continua y autónoma permite registrar el 100% del tiempo de exposición, incluyendo momentos críticos fuera del alcance del monitoreo convencional.

Además, la recopilación continua de datos todos los días permite detectar de forma más precisa las fluctuaciones dinámicas en la concentración de CO₂. Esta información resulta clave para identificar patrones de exposición que varían con el tiempo y para construir una base de datos robusta que permita evaluar no solo el cumplimiento normativo en una jornada aislada, sino también los riesgos acumulativos que enfrentan los trabajadores en su exposición diaria.

5.2.3. Plataforma escalable y multifuncional

Gracias a su diseño modular y a la flexibilidad de Arduino, el sistema permite la incorporación de sensores para otros contaminantes y la integración con tecnologías de comunicación como Wi-Fi, Bluetooth o LoRa. Esto habilita la conexión con

plataformas en la nube como ThingSpeak o Ubidots, facilitando el acceso remoto, la visualización avanzada y el análisis automatizado de datos ambientales.

5.3. RECOMENDACIONES TÉCNICAS

Para optimizar el rendimiento, la precisión y la aplicabilidad del prototipo en entornos laborales reales, se proponen una serie mejoras tanto en el hardware como en el software. Estas recomendaciones buscan superar las limitaciones identificadas durante las pruebas, incrementar la fiabilidad de las mediciones y, sobre todo, garantizar la operatividad del sistema en condiciones industriales exigentes.

5.3.1. Sustitución del sensor MQ-135 por tecnología NDIR

El sensor MQ-135 utilizado actualmente, aunque económico y versátil, presenta sensibilidad cruzada a varios gases y es altamente dependiente de las condiciones ambientales, lo que puede generar errores significativos. Se recomienda reemplazarlo por sensores basados en tecnología NDIR (Infrarrojo No Dispersivo), que ofrecen mayor especificidad al medir exclusivamente CO₂ evitando interferencias de gases no deseados.

Asimismo, los sensores NDIR suelen incluir compensación automática de temperatura y humedad, lo que reduce significativamente las fluctuaciones en la medición y garantiza estabilidad a largo plazo sin la necesidad de recalibraciones frecuentes. Esta mejora no sólo optimizará la precisión de la lectura, sino que también aumentará la confiabilidad operativa del sistema en ambientes industriales complejos.

5.3.2. Eliminación de la dependencia de Excel y Data Streamer.

Actualmente el prototipo depende de la recolección de datos mediante Data Streamer y Microsoft Excel, lo que implica intervención manual, uso de computadora física y conexión USB activa. Este enfoque no es escalable y restringe la operación a entornos de escritorio.

Se recomienda migrar a un sistema inalámbrico basado en tecnología IoT, eliminando la dependencia de cables y simplificando la interfaz de usuario. Para entornos con infraestructura de red existente se propone el uso de Wi-Fi o Bluetooth como protocolo de comunicación. Para estos casos, se pueden incorporar módulos adicionales de

conectividad (por ejemplo, ESP8266, ESP32, HC-05, HM-10, entre otros) según la necesidad de cobertura y tipo de comunicación requerida.

En caso de monitoreo en áreas remotas o con conectividad limitada, se sugiere la integración de LoRa WAN, que permite cobertura de largo alcance y bajo consumo energético. Para este propósito, se puede considerar el uso de la placa Arduino MKR WAN 1310, que ofrece conectividad LoRa WAN nativa y una plataforma compatible con Arduino para el desarrollo de la solución.

En cuanto a las plataformas de monitoreo, se recomienda el uso de ThingSpeak, que ofrece visualización en tiempo real y análisis avanzado con MATLAB o Ubidots, que facilita la generación de alertas automáticas y reportes personalizados. Con estas herramientas se lograría un registro de datos automático, acceso remoto desde cualquier dispositivo y análisis avanzado de las condiciones de exposición.

5.3.3. Implementación de identificación por UID y base de datos

En la versión actual, cualquier tarjeta RFID activa el sistema de monitoreo sin diferenciar entre trabajadores, lo que impide la trazabilidad individual de la exposición al CO₂. Esto no sólo limita la capacidad de generar reportes personalizados, sino que también impide la identificación de posibles incumplimientos de seguridad o malas prácticas.

Se recomienda implementar un sistema de autenticación que lea el UID único de cada tarjeta RFID y lo verifique en una base de datos local almacenada en una tarjeta microSD. El flujo de operación consistiría en la lectura de UID, la validación del trabajador autorizado y el inicio del monitoreo vinculado a un usuario específico. Esta mejora permitirá generar historiales individuales de exposición, facilitar auditorías y cumplir con la normativa de seguridad ocupacional. Además, el uso de UIDs anónimos permitiría respetar los principios de privacidad, ya que los datos sensibles permanecerían vinculados a un código único y no a nombres explícitos.

No obstante, para lograr una trazabilidad verdaderamente representativa de la exposición, no basta con registrar quién activó el sistema, sino también cuándo y dónde estuvo presente el trabajador durante la jornada. Por ello, se sugiere complementar el sistema con un mecanismo de seguimiento de ubicación dentro del entorno laboral, como la integración de tecnologías de geolocalización en interiores (por ejemplo,

Bluetooth de baja energía, balizas o zonas RFID), que permita correlacionar las mediciones de concentración con la presencia del trabajador en áreas específicas con riesgo de exposición. Esto proporcionaría un perfil más completo y preciso de la exposición individual a contaminantes, fortaleciendo la capacidad preventiva del sistema y su valor como herramienta para la gestión de riesgos laborales.

5.3.4. Implementación de alimentación portátil y estable

El prototipo actual depende de conexiones USB temporales que generan fluctuaciones de voltaje, las cuales afectan la precisión de las mediciones y pueden provocar la interrupción del registro de datos en caso de desconexión accidental.

Para superar esta limitación, se recomienda el uso de una batería recargable de polímero de litio (LiPo) con un regulador de voltaje integrado. Este sistema de alimentación permitiría una autonomía operativa de 8 a 12 horas, lo que lo hace ideal para trabajos de campo y turnos laborales completos. Además, al eliminar la dependencia del cable USB se reduciría el ruido eléctrico y se garantizaría una portabilidad total, facilitando su zona de difícil acceso o en condiciones de movilidad constante.

5.3.5. Incorporación de alertas sonoras y lumínicas

El prototipo actual no cuenta con alertas inmediatas ante niveles peligrosos de CO₂, lo que reduce la capacidad de respuesta de los trabajadores. Se propone incorporar alertas sonoras (buzzers) y visuales (LEDs de alta intensidad) que se activen automáticamente al superar un umbral predefinido (LPA, LPT), mejorando así la seguridad operativa en tiempo real, especialmente en entornos donde no se puede consultar una pantalla constantemente.

Estas alertas facilitarán decisiones rápidas como evacuar o activar ventilación, y pueden integrarse fácilmente al código principal, permitiendo configurar umbrales según el entorno. Se recomienda usar componentes de bajo consumo y alta visibilidad, con opción de silenciar la alarma sonora cuando el ruido ambiental lo requiera, manteniendo la alerta visual activa. Además, debe registrarse cada activación para auditorías y análisis futuros, y validarse la robustez eléctrica para evitar interferencias con el sensor.

5.4. CONSIDERACIONES ÉTICAS

Aunque el sistema de monitoreo de CO₂ implementado no almacena datos personales de forma explícita, el uso de tarjetas con identificadores únicos (UIDs) podría generar los trabajadores una percepción de vigilancia constante. Este efecto psicológico puede afectar la relación de confianza entre el empleador y los empleados y podría generar preocupaciones legítimas sobre la privacidad individual. Por ello, es indispensable que la implementación técnica se acompañe de consideraciones éticas y medidas de protección adecuadas.

En primer lugar, se recomienda aplicar una anonimización de datos, de modo que el sistema almacene únicamente identificadores genéricos (UIDs) sin vincularlos de forma directa a nombres, cargos u otra información sensible. De este modo, se garantiza que los datos de exposición recolectados sean útiles para el monitoreo de seguridad y la trazabilidad operativa, pero sin invadir la privacidad personal de los trabajadores. En un entorno laboral, este enfoque es especialmente relevante para evitar sesgos o discriminaciones derivadas de análisis de datos individuales.

En segundo lugar, es fundamental obtener el consentimiento informado de los trabajadores antes de poner en marcha el sistema. Esto implica explicar de forma clara y accesible el propósito del monitoreo, el alcance de la recolección de datos y las limitaciones de uso. Además, debe informarse los trabajadores sobre los beneficios de la herramienta para la salud y la seguridad en el trabajo. Así como sobre las posibles implicaciones éticas, este proceso no sólo refuerza la confianza, sino que además cumple con estándares legales y de respeto a los derechos laborales.

La transparencia debe ser un principio rector en la implementación del sistema. Esto significa garantizar a los trabajadores el acceso a las reglas del manejo de datos y a los procedimientos de acceso o auditoría de la información recopilada. Así, los empleados podrán conocer en qué casos se consulta la base de datos y con qué finalidad, reduciendo así la percepción de vigilancia excesiva.

Por último, ante la posible migración del prototipo hacia plataformas IoT de conectividad en la nube, se debe reforzar la seguridad de los datos mediante la implementación de protocolos de cifrado robustos y restricciones de acceso adecuadas. Esto previene acceso no autorizados y protege la integridad de la información ante

posibles ciberataques. Asimismo, se recomienda realizar evaluaciones periódicas de seguridad y establecer mecanismos de auditoría para garantizar el cumplimiento de estas medidas.

Garantizar estos principios - anonimización, consentimiento informado, transparencia y seguridad- es esencial para mantener la confianza de los trabajadores y lograr una adopción responsable y sostenible del sistema de monitoreo en el ámbito laboral.

5.5. REFLEXIÓN FINAL

El prototipo desarrollado marca un paso significativo hacia nuevas formas de gestión de riesgos laborales, al combinar tecnología accesible, escalabilidad y potencial de integración con plataformas IoT, destacando por su capacidad para capturar datos en tiempo real, calcular métricas como la concentración promedio ponderada y ofrecer retroalimentación inmediata. Su integración con RFID para el control operativo y la transmisión de datos mediante Data Streamer demuestra un enfoque práctico y accesible, aunque con limitaciones técnicas que abren oportunidades de mejora. Si bien aún requiere validación en entornos laborales reales, las mejoras propuestas en sensores, conectividad, autonomía energética e identificación personalizada acercan el sistema a un estándar profesional, aplicable a múltiples sectores productivos.

5.5.1. Principales logros y contribuciones

- Monitorización dinámica: A diferencia de métodos tradicionales, el sistema muestra las variaciones temporales y picos de exposición, esenciales para evaluar riesgos acumulativos en salud.
- Automatización de métricas: El cálculo embebido de la C.P.P. elimina la necesidad de procesamiento manual, agilizando la toma de decisiones.
- Interfaz intuitiva: La combinación de la pantalla LCD y RFID facilita su adopción en entornos con usuarios no técnicos.

5.5.2. Desafíos y oportunidades

La principal limitación radica en la inestabilidad del sensor MQ-135, cuyas fluctuaciones en las mediciones afectan la precisión. Esto subraya la necesidad de

migrar a tecnologías más robustas, como sensores NDIR, para garantizar confiabilidad en ambientes industriales. Asimismo, la dependencia de Excel y conexiones cableadas restringe su escalabilidad, lo que motiva la transición hacia soluciones IoT inalámbricas y plataformas en la nube para almacenamiento y análisis automatizado.

5.5.3. Hacia una implementación responsable

El sistema no solo debe superar barreras técnicas, sino también equilibrar innovación con ética. La futura integración de autenticación por UID y bases de datos locales permitirá trazabilidad individual sin comprometer la privacidad, siempre que se acompañe de:

- Transparencia y consentimiento: Claridad en el uso de datos y beneficios para los trabajadores.
- Protocolos de seguridad: Cifrado y acceso auditado para proteger la información.

5.5.4. Impacto potencial

Más que una herramienta de medición, este prototipo sienta las bases para una cultura preventiva en seguridad laboral. Al hacer visible la exposición a riesgos en tiempo real, empodera a organizaciones y trabajadores para actuar proactivamente, optimizar protocolos y reducir enfermedades profesionales. Su modularidad y adaptabilidad lo convierten en un punto de partida para expandir el monitoreo a otros contaminantes o entornos, siempre que las mejoras técnicas vayan de la mano con un compromiso social y normativo.

Este enfoque accesible y flexible demuestra el potencial de la inteligencia artificial como aliada en proyectos técnicos, especialmente en entornos educativos o con recursos limitados. Permite que personas sin formación previa en programación puedan desarrollar soluciones innovadoras y funcionales, ampliando así las posibilidades de aprendizaje y aplicación tecnológica en contextos reales.

En conclusión, el proyecto evidencia como la tecnología accesible puede transformar la gestión de riesgos, pero su éxito dependerá de integrar precisión técnica, usabilidad y principios éticos en su evolución hacia una solución industrial robusta y socialmente responsable.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. ACGIH. TLV Chemical Substances Introduction. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: [<https://www.acgih.org/science/tlv-bei-guidelines/tlv-chemical-substances-introduction/>](https://www.acgih.org/science/tlv-bei-guidelines/tlv-chemical-substances-introduction/).
2. ACUÑA, Edwin, HUERTAS, Ángel y VÁSQUEZ, Santiago. IoT monitoring systems for occupational safety in Costa Rica. [en línea]. New Trends in Qualitative Research. Disponible en: [.<https://doi.org/10.36367/ntqr.20.4.2024.e1054>](https://doi.org/10.36367/ntqr.20.4.2024.e1054).
3. ALL DATASHEET. MQ-135 Datasheet – Hanwei Electronics Group Corporation. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: [.<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132552/HANWEI/MQ135.html>](https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132552/HANWEI/MQ135.html).
4. AN AIR. Dióxido de Carbono (CO₂): Propiedades Físicas y Químicas. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: [.<https://anair.es/articulos/propiedades-fisicas-del-co2.html>](https://anair.es/articulos/propiedades-fisicas-del-co2.html).
5. ARDUINO.CC. Arduino Uno Rev3. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: [.<https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>](https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3).
6. ARDUINO.CL. Display 16x2 I2C. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: [.<https://arduino.cl/display-16x2-i2c/>](https://arduino.cl/display-16x2-i2c/).
7. ARDUINO.CL. ¿Qué es Arduino? [en línea]. [s.a.]. Disponible en: [.<https://arduino.cl/que-es-arduino/>](https://arduino.cl/que-es-arduino/).
8. ARDUINO.CL. Software de Arduino. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: [.<https://arduino.cl/programacion/>](https://arduino.cl/programacion/).
9. ASOCIACIÓN CHILENA DE SEGURIDAD (ACHS). Guía técnica sobre exposición a frío. [en línea]. 2011. Disponible en: [.<https://www.achs.cl/docs/librariesprovider2/empresa/centro-de-fichas/trabajadores/guia-tecnica-exposicion-a-frio.pdf>](https://www.achs.cl/docs/librariesprovider2/empresa/centro-de-fichas/trabajadores/guia-tecnica-exposicion-a-frio.pdf).
10. ASOCIACIÓN CHILENA DE SEGURIDAD (ACHS). Higiene Industrial: Recomendaciones prácticas para el control de agentes contaminantes. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: [.<https://www.achs.cl/docs/librariesprovider2/empresa/centro-de-](https://www.achs.cl/docs/librariesprovider2/empresa/centro-de-)

fichas/trabajadores/recomendaciones-practicas-para-el-control-de-agentes-contaminantes.pdf>.

11. BOTA SYSTEMS. Baud Rate Demystified: Basics and Applications. [en línea]. 2024. Disponible en: <<https://www.botasys.com/post/ baud-rate-guide>>.
12. DECRETO CON FUERZA DE LEY N.º 1: código del trabajo. Dirección del trabajo. Diario oficial de la República, Santiago, 16 de enero de 2003.
13. DECRETO CON FUERZA DE LEY N.º 725: código sanitario. Ministerio de Salud Pública. Diario oficial de la República, Santiago, 31 de agosto 1967.
14. DECRETO SUPREMO N.º 44: aprueba nuevo reglamento sobre gestión preventiva de los riesgos laborales para un entorno de trabajo seguro y saludable. Ministerio del trabajo y previsión social. Diario oficial de la República, 27 de julio de 2024.
15. DECRETO SUPREMO N.º 594: aprueba reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo. Ministerio de Salud. Diario oficial de la República, Santiago, 29 de abril de 2000.
16. DRÄGER. En el corazón de los sistemas de detección de gases estacionarios. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: <<https://www.draeger.com/Content/Documents/Products/sensoren-br-9069990-es-es.pdf>>.
17. FATHALLAH, Houssem, et al. Development of an IoT-based system for real-time occupational exposure monitoring. [en línea]. Hal Science. Disponible en: <<https://hal.science/hal-01237899>>.
18. FRITZING. About. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: <<https://fritzing.org/about/>>.
19. GASCÓN, Ulises. Calidad del aire. [en línea]. Repositorio GitHub. Disponible en: <<https://github.com/UlisesGascon/Calidad-del-Aire/tree/master>>.
20. HARDWARE LIBRE. Cable jumper: que es, para que sirve, y donde comprar. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: <<https://www.hwlibre.com/cable-jumper/>>.
21. INSTITUTO DE SALUD PÚBLICA DE CHILE (ISP). Evaluación de la exposición a agentes químicos según criterios establecidos en la norma UNE-EN

- 689:2019. PARTE 1. [En línea]. [s.a.]. Disponible en: <<https://www.ispch.cl/wp-content/uploads/2023/11/NTAgentesQuimicos01-31102023A.pdf>>.
22. INSTITUTO DE SALUD PÚBLICA DE CHILE (ISP). Protocolo para la Aplicación del D.S. N.º 594/99 del MINSAL, Título IV, Párrafo 3º Agentes Físicos – RUIDO. [en línea]. 2011. Disponible en: <https://www.ispch.gob.cl/sites/default/files/INSTRUCTIVO_DE_MEDICIÓN_DE_RUIDO.pdf>.
23. INSTITUTO DE SALUD PÚBLICA DE CHILE (ISP). Protocolo para la Aplicación del D.S. N.º 594/99 del MINSAL, Título IV, Párrafo 3º Agentes Físicos – Vibraciones. [en línea]. 2012. Disponible en: <https://www.ispch.cl/sites/default/files/PROTOCOLO_VIBRACIONES_FINAL.pdf>.
24. INSTITUTO DE SALUD PÚBLICA DE CHILE (ISP). Manual básico sobre mediciones y toma de muestras ambientales y biológicas en salud ocupacional. 3ra ed. 2013.
25. INSTITUTO DE SALUD PÚBLICA DE CHILE (ISP). Protocolo de exposición ocupacional al ruido. [en línea] 2013. Disponible en: <https://www.ispch.gob.cl/sites/default/files/Prortocolo_de_Exposicion_Ocupacional_Ruido.pdf>.
26. INSTITUTO DE SALUD PÚBLICA DE CHILE (ISP). Protocolo para la Medición de Estrés Térmico 2ª versión. [En línea]. 2020. Disponible en: <<https://www.ispch.cl/wp-content/uploads/2021/04/Protocolo-Medición-Estrés-Termico.pdf>>.
27. INSTITUTO DE SALUD PÚBLICA DE CHILE (ISP). Nota técnica N.º 19: Trabajo en Altura Geográfica en Chile. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: <https://www.ispch.cl/sites/default/files/Nota_Tecnica_N_19_Trabajo_en_Alta_Geografica_en_Chile.pdf>.
28. INSTITUTO DE SEGURIDAD DEL TRABAJO (IST). Protocolo de vigilancia ocupacional por exposición a factores de riesgo de trastornos musculoesqueléticos. [en línea]. 2024. Disponible en: <<https://ist.cl/wp->

content/uploads/2024/05/Protocolo-de-vigilancia-ocupacional-por-exposicion-a-factores-de-riesgo-de-trastornos-musculoesqueleticos.pdf>.

29. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (INSST). El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior (NTP 549). [en línea]. 2000. Disponible en: <<https://www.insst.es/documentacion/coleccion-tes-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/16-serie-ntp-numeros-541-a-575-ano-2001/ntp-549-el-dioxido-de-carbono-en-la-evaluacion-de-la-calidad-del-aire-interior>>.
30. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (INSST). Ventilación general de edificios (NTP 742). [en línea]. 2006. Disponible en: <<https://www.insst.es/documentacion/coleccion-tes-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/21-serie-ntp-numeros-716-a-750-ano-2006/ntp-742-ventilacion-general-de-edificios>>.
31. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO (INSHT). Estrés por frío (I) (NTP 1036). [en línea]. 2015. Disponible en: <<https://www.insst.es/documents/94886/7803791/NTP+1036.pdf>>.
32. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO (INSHT). Estrés térmico y sobrecarga térmica: evaluación de los riesgos (I) (NTP 922). [en línea]. 2011. Disponible en: <<https://www.insst.es/documentacion/coleccion-tes-tecnicas/ntp-notas-tecnicas-de-prevencion/26-serie-ntp-numeros-891-a-925-ano-2011/nota-tecnica-de-prevencion-ntp-922>>.
33. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (INSST). Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Capítulo 48: Radiaciones ionizantes. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: <<https://www.insst.es/documents/94886/162520/Capítulo+48.+Radiaciones+ionizantes>>.
34. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (INSST). Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Capítulo 49: Radiaciones no ionizantes. [en línea]. [s.a.]. Disponible en:

<<https://www.insst.es/documents/94886/162520/Capítulo+49.+Radiaciones+no+ionizantes/>>.

35. INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO (INSST). Iluminación. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: <<https://www.insst.es/materias/riesgos/riesgos-ergonomicos/iluminacion>>.
36. Ley 16.744: establece normas sobre accidentes del trabajo y enfermedades profesionales. Diario oficial de la República, Santiago, 01 de febrero de 1968.
37. LÓPEZ I Seuba, Manel. Internet de las cosas: La transformación digital de la sociedad. [en línea]. RA-MA S.A. Disponible en: <https://www.google.cl/books/edition/Internet_de_las_Cosas/i8-4EAAAQBAJ>. [consulta: 28 diciembre 2024].
38. MCI ELECTRONICS. ¿Qué es RFID? ¿Cómo funciona? Interfaz del módulo RC522 RFID con Arduino. [en línea]. 2023. Disponible en: <<https://cursos.mcielectronics.cl/2023/01/05/que-es-rfid-como-funciona-interfaz-del-modulo-rc522-rfid-con-arduino/>>.
39. MEDEL García, Juan Manuel. Desarrollo de una plataforma de monitorización y control de un minirobot móvil basada en redes de sensores inalámbricos. Capítulo 3: Descripción de protocolos. [en línea]. Biblus. 2011. pp. 28-32. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/5009/fichero/3_DescripciónProtocolos.pdf>.
40. MOLINA García, Jorge. La importancia de la gestión de riesgos y seguridad en el internet de las cosas (IoT). [en línea]. Repositorio Institucional Universidad Piloto de Colombia. Disponible en: <<http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/6754>>.
41. MUTUAL DE SEGURIDAD. Agentes químicos. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: <<https://www.mutual.cl/portal/publico/mutual/inicio/prevriesgos/programa-vigilancia/agentes-quimicos/>>.
42. NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (NIOSH). NIOSH 6603. [en línea]. 1994. Disponible en: <<https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/6603.pdf>>.

43. ROBOVENT. ¿Qué es un TWA? [en línea]. [s.a.]. Disponible en: [<https://robovent.com/es/frequently-asked-questions/que-es-un-twa/>](https://robovent.com/es/frequently-asked-questions/que-es-un-twa/).
44. OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION (OSHA). OSHA Method 1027, Carbon Dioxide. [en línea]. 2024. Disponible en: [.<https://www.osha.gov/sites/default/files/methods/osha-1027.pdf>](https://www.osha.gov/sites/default/files/methods/osha-1027.pdf).
45. PROCESS SENSING. Analog vs. Digital Sensors – Unpacking the Cost Factors. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: [.<https://www.processsensing.com/en-us/blog/digital-versus-analog-sensors.htm>](https://www.processsensing.com/en-us/blog/digital-versus-analog-sensors.htm).
46. QUIÑONEZ Muñoz, Oswaldo. Internet de las Cosas (IoT). [en línea]. Ibukku LLC. Disponible en: [.<https://books.google.cl/books/about/Internet_de_las_Cosas_IoT.html?id=vnnEDwAAQBAJ&redir_esc=y>](https://books.google.cl/books/about/Internet_de_las_Cosas_IoT.html?id=vnnEDwAAQBAJ&redir_esc=y). [consulta: 18 diciembre 2024].
47. SPARKFUN. How to use a Breadboard. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: [.<https://learn.sparkfun.com/tutorials/how-to-use-a-breadboard>](https://learn.sparkfun.com/tutorials/how-to-use-a-breadboard).
48. SPICEWORKS. What is a Serial Peripheral Interface (SPI)? Meaning, Working, and Applications. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: [.<https://www.spiceworks.com/tech/networking/articles/what-is-spi/>](https://www.spiceworks.com/tech/networking/articles/what-is-spi/).
49. TORRES Guin, Washington, et al. Arquitectura de IoT para el monitoreo de emisiones de gases contaminantes de vehículos y su validación a través de Machine Learning. [en línea]. ResearchGate. Disponible en: [.<https://www.researchgate.net/publication/381909422>](https://www.researchgate.net/publication/381909422). [consulta: 10 febrero 2025].
50. TME. ¿Qué es exactamente USB? [en línea]. 2024. Disponible en: [.<https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/62758/que-es-exactamente-usb/>](https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/62758/que-es-exactamente-usb/).
51. U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Carbon Dioxide Health Hazard Information Sheet. [en línea]. [s.a.]. Disponible en: [.<https://www.fsis.usda.gov/sites/default/files/media_file/2020-08/Carbon-Dioxide.pdf>](https://www.fsis.usda.gov/sites/default/files/media_file/2020-08/Carbon-Dioxide.pdf)

ANEXOS

ANEXO A: HOJA DE DATOS DE SENSOR MQ-135

HANWEI ELECTRONICS CO.,LTD

MQ-135

<http://www.hwsensor.com>

TECHNICAL DATA

MQ-135 GAS SENSOR

FEATURES

Wide detecting scope
Stable and long life

Fast response and High sensitivity
Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in air quality control equipments for buildings/offices, are suitable for detecting of NH_3 , NO_x , alcohol, Benzene, smoke, CO_2 , etc.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V_c	Circuit voltage	$5V \pm 0.1$	AC OR DC
V_H	Heating voltage	$5V \pm 0.1$	AC OR DC
R_L	Load resistance	can adjust	
R_H	Heater resistance	$33 \Omega \pm 5\%$	Room Tem
P_H	Heating consumption	less than 800mw	

B. Environment condition

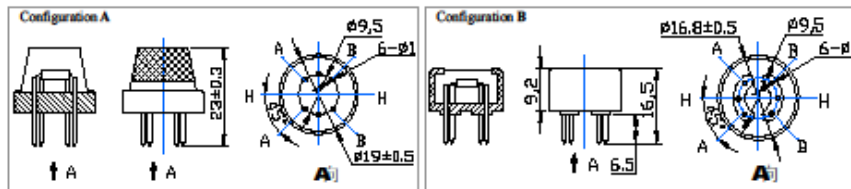
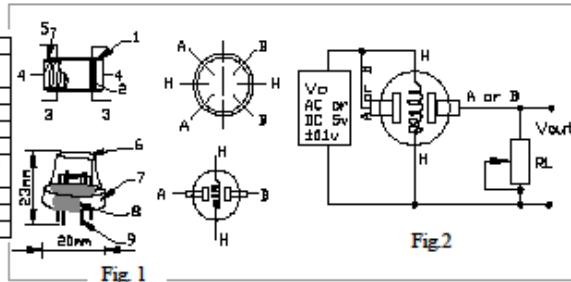
Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T_{ao}	Using Tem	$-10^\circ\text{C} \sim 45^\circ\text{C}$	
T_{as}	Storage Tem	$-20^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$	
R_H	Related humidity	less than 95%Rh	
O_2	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remark 2
R_s	Sensing Resistance	$30K \Omega \sim 200K \Omega$ (100ppm NH_3)	Detecting concentration scope: 10ppm-300ppm NH_3 , 10ppm-1000ppm Benzene 10ppm-300ppm Alcohol
α (200/50) NH_3	Concentration Slope rate	≤ 0.65	
Standard Detecting Condition	Temp: $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ $V_c: 5V \pm 0.1$ Humidity: $65\% \pm 5\%$ $V_H: 5V \pm 0.1$		
Preheat time	Over 24 hour		

D. Structure and configuration, basic measuring circuit

Parts	Materials
1 Gas sensing layer	SnO_2
2 Electrode	Au
3 Electrode line	Pt
4 Heater coil	Ni-Cr alloy
5 Tubular ceramic	Al_2O_3
6 Anti-explosion network	Stainless steel gauze (SUS316 100-mesh)
7 Clamp ring	Copper plating Ni
8 Resin base	Bakelite
9 Tube Pin	Copper plating Ni



Structure and configuration of MQ-135 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro Al_2O_3 ceramic tube, Tin Dioxide (SnO_2) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of

TEL: 86-371-67169070 67169080

FAX: 86-371-67169090

E-mail: sales@hwsensor.com

sensitive components. The enveloped MQ-135 have 6 pin ,4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-135

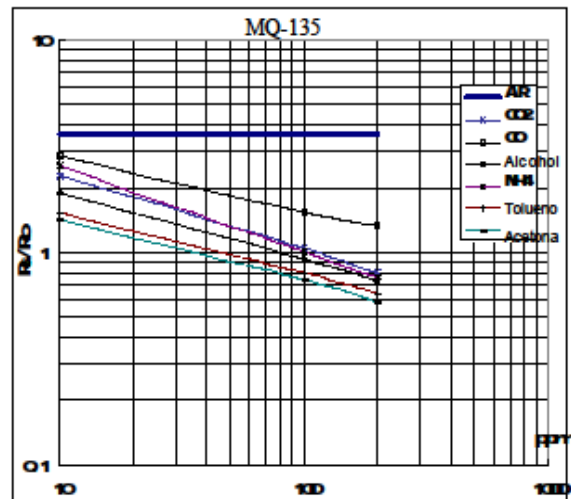


Fig.3 shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-135 for several gases. in their: Temp: 20℃, Humidity: 65%, O₂ concentration 21%, RL=20kΩ

R₀: sensor resistance at 100ppm of NH₃ in the clean air.
R_s: sensor resistance at various concentrations of gases.

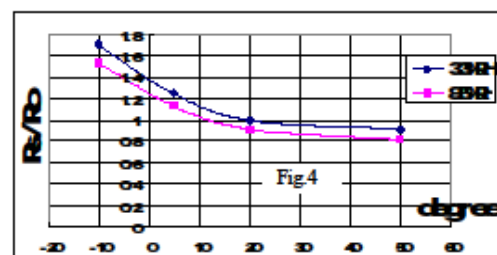
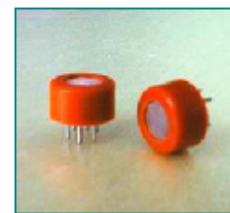


Fig.4 shows the typical dependence of the MQ-135 on temperature and humidity. R₀: sensor resistance at 100ppm of NH₃ in air at 33%RH and 20 degree. R_s: sensor resistance at 100ppm of NH₃ at different temperatures and humidities.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-135 is different to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 100ppm NH₃ or 50ppm Alcohol concentration in air and use value of Load resistance that (R_L) about 20 KΩ (10KΩ to 47 KΩ).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.



TEL: 86-371-67169070 67169080

FAX: 86-371-67169090

E-mail: sales@hwsensor.com

Anexo A. Hoja de datos Sensor MQ-135.

Fuente: ALL DATASHEET [3].

ANEXO B: CODIGO PRINCIPAL DEL SISTEMA

```

○○○

// Bibliotecas requeridas para los componentes
#include <Wire.h>           // Comunicación I2C para la pantalla LCD
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Control de pantalla LCD I2C
#include <SPI.h>            // Protocolo SPI para el módulo RFID
#include <MFRC522.h>        // Control del lector RFID RC522

// Configuración de pines y componentes
#define SS_PIN 10          // Pin Slave Select para RFID
#define RST_PIN 9          // Pin Reset para RFID
MFRC522 rfid(SS_PIN, RST_PIN); // Instancia del lector RFID
#define MQ135_PIN A0       // Pin analógico para el sensor MQ135
float Ro = 86.15;          // Resistencia del sensor en aire limpio (calibrado)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Configura LCD I2C dirección 0x27, 16x2 caracteres

// Variables de estado y cálculo
bool sensorActivo = false; // Control del estado de monitoreo
unsigned long lastMeasurementTime = 0; // Marca de tiempo para mediciones
unsigned int numeroMedicion = 0; // Contador de mediciones
unsigned long sumTiempo = 0; // Acumula Σtiempo
float sumCxT = 0.0; // Acumula Σconcentración x tiempo

void setup() {
  Serial.begin(9600); // Inicia comunicación serial para registro de datos
  SPI.begin(); // Inicia comunicación SPI para RFID
  rfid.PCD_Init(); // Inicializa el lector RFID
  lcd.init(); // Inicializa la pantalla LCD
  lcd.backlight(); // Enciende la retroiluminación del LCD
  mostrarMensajeInicial(); // Muestra mensaje inicial en LCD
  // Encabezado para el archivo CSV
  Serial.println("Nº Medicion,Tiempo (s),Concentracion (ppm),C x T,Sum. Tiempo,Sum. C x T,_CPP");
}

void loop() {
  // Detección de tarjeta RFID
  if (rfid.PICC_IsNewCardPresent() && rfid.PICC_ReadCardSerial()) {
    sensorActivo = !sensorActivo; // Alterna el estado de monitoreo

    if (sensorActivo) {
      lastMeasurementTime = millis(); // Reinicia el temporizador
    } else {
      enviarInactivoAExcel(); // Envía registro de inactividad
    }

    mostrarEstadoLCD(sensorActivo); // Actualiza la pantalla
    rfid.PICC_HaltA(); // Detiene comunicación con tarjeta
  }

  // Toma de mediciones periódicas
  if (sensorActivo && (millis() - lastMeasurementTime ≥ 1000)) {
    lastMeasurementTime = millis(); // Actualiza temporizador
    numeroMedicion++; // Incrementa contador de mediciones
    float co2ppm = leerCO2(); // Obtiene lectura del sensor
    actualizarAcumuladores(co2ppm); // Actualiza cálculos
    float cpp = calcularCPP(); // Calcula promedio ponderado
    enviarDatosAExcel(co2ppm, cpp); // Envía datos por serial
    mostrarDatosLCD(co2ppm); // Muestra valor en pantalla
  }
}

// Muestra mensaje inicial centrado en LCD
void mostrarMensajeInicial() {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(" Esperando"); // Centrado con espacios
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(" Activacion"); // Centrado con espacio
}

```

```

○○○

// Envía formato especial cuando el sistema está inactivo
void enviarInactivoAExcel() {
    Serial.print("——"); // N° Medicion
    Serial.print(",———,"); // Tiempo
    Serial.print("Monitoreo Inactivo"); // Estado
    Serial.print(",———,"); // C x T
    Serial.print("———"); // Sumatoria de Tiempo
    Serial.print(",———"); // Sumatoria C x T
    Serial.println("———"); // CPP
}

// Función de lectura y conversión del sensor MQ135
float leerCO2() {
    int raw = analogRead(MQ135_PIN); // Lectura analógica (0-1023)
    float Vout = raw * (5.0 / 1023.0); // Conversión a voltaje (0-5V)
    // Cálculo de resistencia del sensor (RL = 1kΩ)
    float resistencia = 1 * (5.0 - Vout) / Vout;
    // Fórmula de conversión a ppm
    return 116.68 * pow((resistencia / Ro), -2.848);
}

// Actualiza acumuladores para cálculo de CPP
void actualizarAcumuladores(float co2ppm) {
    sumTiempo += 1; // Cada medición suma 1 segundo
    sumCxT += co2ppm * 1; // Acumula concentración x tiempo (1s)
}

// Calcula CPP
float calcularCPP() {
    return sumCxT / sumTiempo; // CPP = I(Ci*ti)/Iti
}

// Envía datos por puerto serial
void enviarDatosAExcel(float co2ppm, float cpp) {
    Serial.print(numeroMedicion); // Número de medición
    Serial.print(",1,"); // Tiempo por medición (1s)
    Serial.print(co2ppm, 1); // Concentración actual
    Serial.print(",");
    Serial.print(co2ppm * 1, 1); // C x T (1s)
    Serial.print(",");
    Serial.print(sumTiempo); // Sumatoria de Tiempo
    Serial.print(",");
    Serial.print(sumCxT, 1); // Sumatoria C x T
    Serial.print(",");
    Serial.println(cpp, 1); // CPP actual
}

// Muestra estado actual en LCD
void mostrarEstadoLCD(bool activo) {
    lcd.clear();
    if (activo) {
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Monitoreo Activo");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("CO2: ppm");
    } else {
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print(" Monitoreo");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(" Inactivo");
    }
}

// Actualiza medición de CO2 en LCD
void mostrarDatosLCD(float co2ppm) {
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("CO2: ");
    lcd.print(co2ppm, 2);
    lcd.print(" ppm");
}

```

Anexo B. Código principal del sistema.

Fuente: Elaboración propia.