

# Desarrollo de un prototipo analizador de gases contaminantes industriales para la empresa SIAM INGENIERIA S.A.S.

## (marzo de 2023)

José Ignacio González Angarita, Tutor José Leonardo Monroy Hernández, Tutor Carlos Daniel Pimentel Díaz, Facultad de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Santo Tomás Bucaramanga, Colombia, jose.gonzalez@ustabuca.edu.co, jose.monroy@ustabuca.edu.co, carlos.pimentel@ustabuca.edu.co

**Resumen** - SIAM INGENIERIA, una empresa especializada en el monitoreo y consultoría de la calidad del aire ha encontrado dificultades en el manejo de los equipos analizadores de gas contaminante asociadas al peso, transporte y gasto de energía. Para solucionar esta necesidad, se presenta una mejora por medio del desarrollo de un prototipo de baja potencia equipado con sensores electroquímicos. Este dispositivo es capaz de tomar muestras en tiempo real de gases contaminantes (CO, NO, SO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>) presentes en el aire, especialmente aquellos con alta emisión en empresas industriales.

El proceso de elección de los sensores disponibles en el mercado, el diseño del sistema electrónico y la interfaz de usuario se detallan en este artículo para lograr la fabricación de este analizador. También se realiza el diseño computarizado de la carcasa del dispositivo y se hace una comparación con un analizador de gas certificado en la organización en una simulación de un plan de monitoreo real. Este prototipo tiene como objetivo solucionar los problemas actuales y mejorar la eficiencia en el monitoreo de la calidad del aire.

*Palabras claves:* Calidad de aire, analizador de gas, desarrollo, sensores electroquímicos, IoT.

Development of a prototype analyzer of industrial polluting gases for the company SIAM INGENIERIA S.A.S.

**Abstract** - SIAM INGENIERIA, a company specialized in air quality monitoring and consulting, has encountered difficulties in handling pollutant gas analyzer equipment associated with weight, transportation, and energy

expenditure. To solve this need, an improvement is presented through the development of a low power prototype equipped with electrochemical sensors. This device can take samples in real time of polluting gases (CO, NO, SO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>) present in the air, especially those with high emissions in industrial companies.

The process of choosing the sensors available in the market and the design of the electronic system and the user interface are detailed in this article to achieve the manufacture of this analyzer. The computerized design of the device casing is also performed, and a comparison is made with a certified gas analyzer in the organization in a simulation of a real monitoring plan. This prototype aims to solve current problems and improve efficiency in monitoring air quality.

*Keywords:* Air quality, gas analyzer, development, electrochemical sensors, IoT.

## I. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire es un asunto de gran importancia que requiere de una atención constante por parte de la sociedad. Es por ello que cada vez son más frecuentes los controles medioambientales que buscan reducir la huella de carbono en las empresas, tanto grandes como pequeñas. Entre estos controles se encuentran las licencias ambientales, que todas las empresas industriales emisoras de gases contaminantes deben poseer. Para otorgar estas licencias, se lleva a cabo un monitoreo de ciertos gases contaminantes que pueden ser perjudiciales para el medio ambiente y sus habitantes.

La empresa SIAM INGENIERIA es una de las encargadas de realizar estas tareas, utilizando equip FCROs analizadores de concentración de gas para detectar la cantidad de contaminantes presentes en un área determinada. Sin embargo, uno de los principales desafíos de estos equipos radica en su peso y tamaño, lo que dificulta su transporte y uso en diferentes ubicaciones.

En este proyecto, se aborda este problema mediante la creación de un dispositivo de menor tamaño, capaz de realizar las mismas tareas que los equipos tradicionales y con mejoras adicionales, como la capacidad de cargar la información recolectada a una plataforma en la nube.

Para enfrentar este desafío, se llevará a cabo una investigación exhaustiva del funcionamiento de los

---

Artículo científico presentado como opción de grado para optar por el título de Ingeniero Mecatrónico.

Autor: José Ignacio González Angarita. Estudiante de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Santo Tomás Bucaramanga. Correo electrónico: jose.gonzalez@ustabuca.edu.co.

Director: José Leonardo Monroy Hernández. Ingeniero Mecatrónico, Universidad Santo Tomás Bucaramanga. Correo electrónico: jose.monroy@ustabuca.edu.co.

Codirector: Carlos Daniel Pimentel Díaz. Ingeniero Electrónico, Unidades Tecnológicas de Santander. Correo electrónico: carlos.pimentel@ustabuca.edu.co.

diferentes tipos de analizadores de gases disponibles en el mercado, comparándolos con el desempeño de los sensores electroquímicos que se utilizarán en el dispositivo. A partir de ello, se diseñará un circuito electrónico que integrará la placa del microcontrolador ESP-32, los sensores analizadores de gas y otros módulos adicionales. Asimismo, se hará un diseño conceptual para la protección externa de los componentes electrónicos y se llevarán a cabo pruebas de campo tanto en interiores como en exteriores, recolectando información que será comparada con la generada por las máquinas previas para obtener conclusiones al respecto.

## II. RESEÑA DE LA EMPRESA

**Figura 1.** Logo de la organización SIAM



### A. Misión

SIAM INGENIERÍA S.A.S proporciona servicios de laboratorio y consultoría ambiental de alta calidad, siguiendo los estándares más exigentes, para contribuir al desarrollo sostenible de sus clientes. La empresa cuenta con un equipo de profesionales altamente capacitados y sigue procedimientos que cumplen con la normativa legal vigente, con el fin de satisfacer las necesidades y superar las expectativas de sus clientes. [1].

### B. Visión

Para el año 2025, SIAM INGENIERIA S.A.S se posicionará como un laboratorio certificado con amplia acreditación en la matriz Aire, ofreciendo asesoría especializada en consultoría ambiental en el componente atmosférico, con reconocimiento en el mercado a nivel nacional. Se enfocará en la seguridad y salud de sus empleados, manteniendo un Sistema de Gestión de la Calidad que garantice la eficacia en todas sus operaciones. Además, se comprometerá a cuidar el medio ambiente a través de la medición, reducción y compensación de su huella de carbono, y promoverá el uso de energías alternativas. [1].

### C. Tipo de Actividad

SIAM INGENIERIA S.A.S. es una empresa dedicada a la prestación de servicios de arquitectura, ingeniería y consultoría técnica, ofreciendo soluciones integrales y personalizadas a sus clientes.

### D. Cobertura

La organización está afiliada a este tipo de actividades desde el 30 de noviembre del 2012.

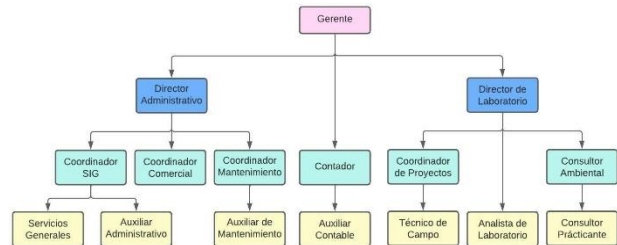
### E. Productos o Servicios

SIAM INGENIERIA S.A.S. ofrece servicios bajo estrictos estándares de calidad y altamente especializados, en

sistema de vigilancia de la calidad del aire, evaluación de emisiones en fuentes fijas, monitoreos de ruido ambiental y demás actividades de la ingeniería ambiental para el sector industrial, eléctrico, petroquímico y civil.

### F. Estructura Orgánica

**Figura 2.** Organigrama de la organización



## III. JUSTIFICACIÓN

La empresa SIAM INGENIERÍA S.A.S ha identificado la necesidad de desarrollar un prototipo analizador de diferentes gases atmosféricos, como el CO, NO, SO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>. Esta iniciativa responde a la demanda de sus servicios de monitoreo de distintos parámetros de concentración de condiciones ambientales, en los que se requiere el monitoreo de al menos dos concentraciones de gas en cada proyecto de análisis de aire.

El objetivo principal de este proyecto es reducir el tamaño del equipo, haciéndolo más manejable y fácil de transportar, lo que permitirá la implementación de IoT en proyectos de muestreo en campo. Esto mejorará significativamente el procedimiento actual de análisis de datos en la empresa, haciéndolo más eficiente, factible y rápido.

Con base en lo anteriormente expuesto, se requiere la contratación de un ingeniero mecatrónico para liderar este proyecto que le permitirá a la empresa SIAM INGENIERÍA S.A.S tener una solución innovadora que se ajuste a sus necesidades específicas y mejore su capacidad de monitoreo ambiental.

## IV. IDENTIFICACIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

La empresa SIAM INGENIERIA S.A.S. se destaca por realizar monitoreos de campo de diferentes gases contaminantes en el ambiente en empresas industriales. Utilizan máquinas para este fin, pero son de difícil transporte ya que cada una de estas, pesa una media de 20 kg (y los proyectos que se solicita monitoreo, en su mayoría se necesitan como mínimo seis de estos, contando todas las estaciones donde se requieran), y aparte su eficiencia energética es baja (necesitando alrededor de 100 Watts por máquina). Sumado a esto, para la elaboración de informes y reportes de diversos proyectos, es necesario que el personal de campo termine el monitoreo en el lugar determinado y desplazarse hasta la sede principal de la empresa SIAM, para entregar el muestreo de datos tomado y así realizar el análisis.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, es una oportunidad de mejora en la empresa SIAM, desarrollar una máquina liviana, que incorpore dispositivos electrónicos de bajo consumo, para que capturen, almacenen y envíen los datos del monitoreo a una plataforma en la nube.

## V. MARCO DE REFERENCIA

### A. Medición de Calidad de Aire

La primera vez que se evidenció una preocupación por la calidad del aire se remonta en 1948 cuando en la ciudad de Donora, Pensilvania, hubo una afectación de smog (una tóxica mezcla de niebla y humo) provenientes de una zona industrial cercana en el que aproximadamente 6000 residentes enfermaron y 20 murieron [2]. El posible incidente de contaminación en el aire más catastrófico de los Estados Unidos.

Después de este suceso, surgieron distintas leyes de protección de la calidad y el control de las emisiones de gases atmosféricos como la ley de Calidad del Aire de los Estados Unidos [3] en la cual amplió los estudios de investigación en cuanto a contaminantes atmosféricos y diferentes técnicas de monitoreo junto a su enfoque en el transporte interestatal.

1. *US EPA*: En 1970, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA) introdujo la Ley de Aire Limpio (CAA) en un esfuerzo constante por proteger el medio ambiente. La ley fue la primera de su tipo en abordar de manera integral la contaminación del aire en los Estados Unidos, permitiendo a la EPA establecer los Estándares Nacionales de Calidad del Aire en el Ambiente (NAAQS) para proteger la salud pública y regular las emisiones de contaminantes del aire de fuentes móviles y estacionarias [4].

### B. Analizador Automático de Gas

Se le llama «Analizador “automático” de gas», debido a que existen métodos manuales por el cual obtener datos de cuánta concentración de partículas específicas existe en cierto sitio muestreado. Como en el caso del Rack de 3 gases, se trata de una caja metálica con dos compartimentos, uno que contiene una bomba de vacío con características específicas definidas por la EPA, y otro que contiene el tren de muestreo, que incluye tres burbujeadores para NOX, SOX y una trampa de humedad [5].

Después surgieron máquinas que analizan concentración de gas de manera automática, como el método de Infrarrojo No Dispersivo (IRND) creado en 1975 para el análisis de monóxido de carbono [6]. El cual solo sufrió ligeros cambios hasta el método que se utiliza en las máquinas como los de la empresa ThermoFisher o API Teledyne que se explican en la sección VII.A.

El método que se utilizará en este proyecto es el más moderno, el electroquímico. Estos sensores a nivel global se han venido entendiendo debido principalmente a su bajo costo y fácil escalabilidad. Para construirlos, dependiendo la aplicación, son necesarios distintos factores para su correcto funcionamiento que se enumerará en los siguientes puntos.

1. *Microcontrolador*: Es un circuito integrado el cual tiene todos los componentes de un computador para funcionar (procesador, memoria, bus de datos, etc.), el cual da las órdenes a cada módulo (sensor analógico, sensor digital, pulsador) que se le conecte a su bus. Para cada aplicación existen ciertos microcontroladores con diferentes características que deban ser ocupados, ya sea en tamaño, velocidad, número de pines, tipo de comunicación, etc.

2. *Reloj de Tiempo Real*: A pesar de que, en su mayoría, los microcontroladores tienen un reloj u oscilador integrado para la sincronización de sus tareas, este se reinicia cada vez que se desconecta de la energía. Para un proyecto como este, en el que se debe tener un registro de dato a dato con su hora de toma específica, es conveniente tener un reloj en tiempo real que siempre posea su hora sincronizada con la real para escenarios donde no se pueda acceder a internet.
3. *Bomba de Aire*: En general los analizadores de gas con sensores electroquímicos no poseen una bomba puesto que por lo regular se utiliza en un punto estático de monitoreo. Este caso es diferente, debido a que este dispositivo tendrá como función el monitoreo de puntos específicos ya sea en una empresa petrolera, minera o eléctrica; en estos escenarios, a veces es necesario que el aire a analizar, por ejemplo, sea el generado en una planta en la que se quema combustible fósil, y la chimenea en la que se expulsa el vapor se ubique en un lugar elevado. En un caso como el descrito, es más efectivo simplemente llevar una manguera al área a analizar, mientras que el dispositivo se encuentra en un lugar a salvo de cualquier posible factor externo que repercuta su funcionamiento.
4. *Interfaz de Usuario*: Es lo que manipulará el usuario para controlar las diferentes funciones del dispositivo. Existen dispositivos como el prototipo de Ryan Kinnett el cual es «plug and play», sin ninguna interfaz, solamente se conecta, y él mismo empieza a registrar datos del aire [7]. Pero esto no es suficiente si se quieren tener todas las condiciones en las que un analizador está funcionando; por ejemplo, en qué hora comenzó su puesta en funcionamiento; o qué número de analizador es (en caso de que se tengan varios puntos de monitoreo para una misma área); o de cuál proyecto está registrando datos (en caso de que se estén manejando varios proyectos a la vez). Todos estos datos, los podría registrar el operario al momento de encender la máquina.
5. *Principio de Funcionamiento del Analizador de gas*: Como se mencionó en la sección V.B., a lo largo de los años, ha habido distintos métodos de funcionamiento para el análisis de partículas de gas en el aire, algunas más complejas que otras. En el caso del prototipo que se expondrá en este proyecto, se usará el método electroquímico, cuyo principio de operación se describe en la sección VII.B.
6. *Consumo y Alimentación*: Uno de los problemas que justifican la construcción de esta máquina es el alto consumo de corriente que sufren los analizadores automáticos actuales en la organización, debido mayormente a que utiliza elementos como fuentes de luz ultravioleta, luz infrarroja, detectores de luz, detectores ópticos (fotomultiplicadores), etc. Son elementos que disipan gran parte de su potencia en forma de calor, arriesgando su eficiencia energética. En el prototipo en construcción, el elemento que más exige corriente es la bomba de aire; el resto de los componentes son de bajo consumo. En la sección VII.L.4. se hace énfasis en el consumo de corriente.

En cuanto a alimentación se refiere, por lo general los módulos de sensorica y microcontroladores, trabajan a 5 V, tensión la cual puede suministrar cualquier cargador de teléfono de la actualidad.

## VI. OBJETIVOS

### A. Objetivo General

Desarrollar un prototipo analizador de gases contaminantes industriales, utilizando módulos electrónicos y tecnología IoT, para mejorar el procedimiento de monitoreo actual, en la empresa SIAM INGENIERÍA S.A.S.

### B. Objetivos Específicos

- Indagar acerca de sensores analizadores de gases, módulos electrónicos y software a través de diversas investigaciones preexistentes y manuales de equipos presentes en la empresa, con el fin de capturar, almacenar y transmitir los datos a la nube y evaluar la disponibilidad comercial de dichos componentes.
- Diseñar un módulo electrónico en un software de diseño de circuitos impresos, que permita ubicar cada componente elegido, adquirir las señales de los sensores de gas, supervisar y controlar los datos, facilitar la comunicación entre los sensores con el usuario y ser utilizado como interfaz física.
- Desarrollar software tanto al nivel del módulo electrónico como a nivel WEB. Programando por medio de lenguaje C una interfaz amigable con el usuario, para poder operar el equipo, y poder adquirir, almacenar y enviar a una plataforma en la nube, los datos que le suministren los sensores.
- Realizar pruebas de funcionamiento en oficina y en campo para cada uno de los sensores de gas y su respectivo módulo electrónico, con el fin de verificar la toma de datos, ajustarlos con equipos de referencia, almacenar la información, y posibilite la escritura y lectura de datos en la plataforma en línea.

## VII. PLAN DE TRABAJO

En el anexo A se encuentra el plan de trabajo que se tiene establecido para la ejecución de cada objetivo y sus diferentes tareas. Por su parte, el documento tiene distintas etapas de desarrollo, en la cual se encuentran:

- Investigación a fondo de los métodos de funcionamiento de los equipos, tanto los analizadores con tecnología antigua, como los sensores que se utilizarán en el prototipo, y los diferentes protocolos de comunicación que se pueden utilizar para registrar información en un servidor de almacenamiento. Adicionalmente una cotización de sensores electroquímicos en el mercado.
- Diseño de la placa del circuito, las partes que lo conforman, el por qué se organizó de esa manera, y la serigrafía de estos.
- Interfaz de usuario que se implementó en el dispositivo, así como el diagrama de flujo que sigue el prototipo en el momento en que enciende y cómo

hace la comunicación con la nube para subir cada archivo.

- Modelos 3D dibujados para poder acomodar cada componente en una carcasa, el material en que puede fabricarse, y una renderización de cómo se vería al construirse.
- Prueba inicial del prototipo, en la que se ajustó la curva de linealidad del sensor y se describió el proceso.

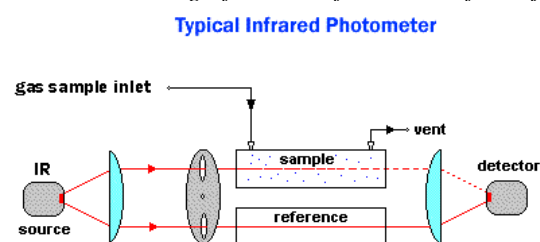
### A. Determinación de Concentraciones por los Métodos Tradicionales

En esta sección, si bien se describirá cada principio de funcionamiento de los equipos analizadores (tanto la determinación másica de las concentraciones con métodos mecánicos como electroquímicos), no se profundizará en el tema ya que este proyecto no es de investigación.

1. *Determinación de la Concentración Másica del Monóxido de Carbono (Fotometría Infrarroja No Dispersiva):* Los detectores infrarrojos no dispersivos (NDIR) son ampliamente utilizados en la industria para medir la concentración de óxidos de carbono (CO y CO<sub>2</sub>).

El proceso de análisis se compone de una lámpara infrarroja, un filtro de longitud de onda, un detector de infrarrojos, y un tubo de muestra o cámara de luz (ver fig. 3). Cuando los gases de una muestra pasan por la cámara de muestra, absorben una cantidad específica de luz infrarroja. Un haz de luz infrarroja se hace pasar a través de la cámara de muestra que contiene CO, y se mide la cantidad de IR absorbido por la muestra en la longitud de onda necesaria [8]. Una rueda de correlación montada delante de la lámpara permite que el cabezal de muestreo mida la concentración del gas, mientras corrige continuamente el desplazamiento y la ganancia del analizador.

**Figura 3. Ilustración gráfica de un fotómetro infrarrojo**



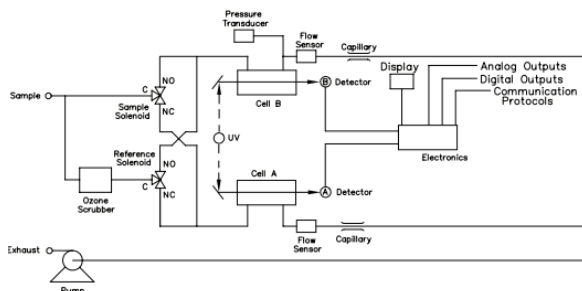
Nota. Tomado de Thermo Scientific. [8]

2. *Determinación de la Concentración Másica de Ozono (Fotometría Ultravioleta):* Este método es similar al del fotómetro infrarrojo, con la diferencia que en este para la detección de ozono en la entrada de la muestra es utilizada una lámpara ultravioleta.

En el Inlet de la muestra, se divide en dos conductos de gas, una de ellas fluye directamente al solenoide de la muestra y el otro primero pasará por el depurador de ozono para transformarse en gas de referencia y de esa manera fluir hacia el solenoide de referencia, así como se muestra en la fig. 4. Cada solenoide se enciende alternadamente por diez segundos y así en un momento estará la celda B con gas de la muestra, luego la celda A

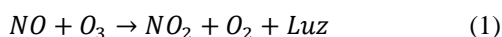
con gas de referencia, y viceversa. Finalmente, los detectores de luz ultravioleta identifican cuánta luz UV existe en ese momento en cada celda y su vez se realiza una comparativa entre las dos corrientes de gas [9].

**Figura 4.** Esquemático de flujo del analizador automático de Ozono modelo 49i de la marca Thermo

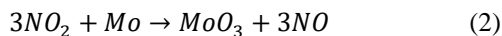


Nota. Tomado de Thermo Scientific. [9, p. 25]

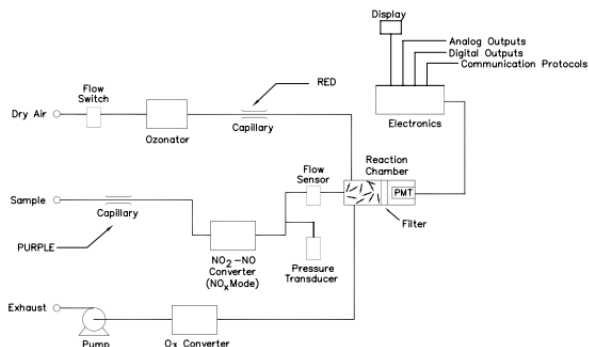
3. **Determinación de la Concentración Másica del Dióxido de Nitrógeno (Quimioluminiscencia):** Las reacciones exotérmicas, son aquellas reacciones químicas que pueden liberar energía en forma de calor o luz. En esta última donde predomina la luminiscencia, se puede determinar generalmente como quimioluminiscencia. El principio de operación para que el analizador pueda detectar la presencia de los diferentes óxidos de nitrógeno, como se ve en la ec. 1, se realiza una reacción química espontánea entre el óxido nítrico y el ozono.



Al ser un sistema que depende de la intensidad de luz generada, se utiliza un sensor óptico fotomultiplicador como en los anteriores equipos. Ya que entre mayor sea la concentración de NO en la cámara de reacción (ubicada en la fig. 5), más luz será generado por este y, por ende, mayor será la corriente generada por el detector [10]. Sin embargo, si se quieren analizar óxidos nítricos diferentes (como el NO<sub>2</sub>, o NO<sub>x</sub>), primero se deben convertir a NO, y una manera de conversión es utilizando un metal reactivo como el Molibdeno, el cual se calienta a una temperatura de 750 °F, de manera que el óxido nítrico deja el exceso de átomos de oxígeno para enlazarse con átomos de Mo, como se muestra en la ec. 2.



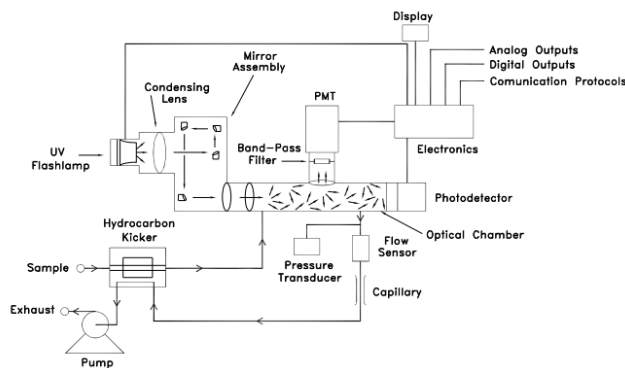
**Figura 5.** Esquemático de flujo del analizador automático de óxidos nítricos modelo 42i de la marca Thermo



Nota. Tomado de Thermo Scientific. [10, p. 23]

4. **Determinación de la Concentración Másica del Dióxido de Azufre (Fluorescencia Pulsante):** Al entrar la muestra al analizador, esta accede seguidamente al eliminador de hidrocarburos. Esta los suprime haciendo penetrar sus moléculas en las paredes de la manguera, mientras que las partículas de SO<sub>2</sub> lo atraviesan fácilmente. Para luego la corriente fluir hacia la cámara de fluorescencia, donde está la lámpara ultravioleta junto al lente de condensación que excita las moléculas de SO<sub>2</sub>, por medio de espejos que reflejan las longitudes de onda de SO<sub>2</sub> y se van descomponiendo a un estado de energía más bajo. La luz UV será proporcional a la concentración de dióxido de azufre, y el filtro de paso de banda ayudará a que el fotomultiplicador (PMT) solamente detecte las moléculas de SO<sub>2</sub> en descomposición, este proceso está gráficamente expuesto en la fig. 6. Finalmente, la muestra es conducida a por un sensor de flujo, el capilar y a través de la carcasa del eliminador de hidrocarburos. [11]

**Figura 1.** Esquemático de flujo del analizador automático de dióxido de azufre modelo 43i de la marca Thermo



Nota. Tomado de Thermo Scientific. [11, p. 27]

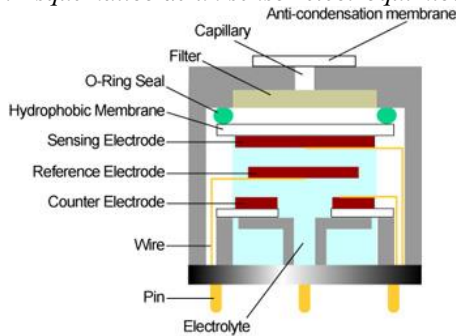
**B. Determinación de Concentración de Sensores Electroquímicos**

Existen diferentes variantes de sensores electroquímicos que miden cada concentración de los cuatro parámetros que se quieren analizar en este proyecto. Sin embargo, cada uno de estos tienen el mismo principio de funcionamiento electroquímico, los cuales generan una corriente proporcional a la fracción volumétrica del gas. Los sensores trabajan por medio de la reacción catalítica electroquímica, con tres electrodos en contacto con un electrolito (Electrodo sensor o de trabajo, electrodo de referencia y contraelectrodo). Los electrodos por lo general son fabricados al fijar un metal noble sobre la membrana hidrofóbica porosa como se observa en la fig. 7. A su vez, el electrodo sensor entra en contacto con el ambiente a través de un capilar para reducir el área de entrada de las moléculas y evitar partículas de indeseadas como polvo, junto a una membrana anti-condensación que igual forma funciona como filtro.

Para el electrolito por lo general se utiliza un ácido, sin embargo, también se usan electrolitos orgánicos, este cambia según el gas que se desee detectar (por ejemplo, para la detección de dióxido de nitrógeno, se utilizan líquidos iónicos y electrolitos como AgCl<sub>3</sub> o NaCl). El gas de entrada se filtra y entra en contacto con el electrodo de trabajo, donde

ocurre una reacción electroquímica de oxidación o reducción. Esta reacción produce una corriente eléctrica que fluye a través del circuito externo [12].

**Figura 2.** Esquemático de un sensor electroquímico de gas



Nota. Tomado de MEMBRAPOR. [12]

### C. Cotización de Sensores Electroquímicos

Al realizar una investigación exhaustiva de sensores electroquímicos de diferentes empresas tanto en europeas como americanas, se obtuvo el valor e información comercial de los sensores de cuatro compañías evidenciadas en la tabla 1. Se definieron unas características en concreto de tal manera que se pudiesen elegir los más completos y eficientes para la aplicación, las cuales se explicarán en las siguientes líneas.

1. **Resolución:** Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y el Código Federal de Regulaciones (CFR), Título 40, Parte 53, Capítulo I, Subcapítulo C, Subparte B, Tabla B-1 [13]. Establece los criterios mínimos que deben tener los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) en cada uno de los parámetros contaminantes a analizar cómo se observa en el fragmento extraído de la tabla 2, entre estos la resolución mínima detectable, la cual es una diferente para cada concentración siendo para SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO y NO<sub>2</sub>, de 0.001, 0.002, 0.2 y 0.01 partes por millón (PPM) respectivamente.
2. **Vida Útil:** A pesar de que este no sea un criterio de alta prioridad, sí se debe tener en cuenta como última comparación entre dos opciones que se hayan establecido como viables para el uso que se dará. De igual forma explorar si los sensores son modulares, es decir, si la placa electrónica externa viene de manera

separada al detector electroquímico. Esto con el fin de que, al vencerse el ciclo de vida del sensor, no sea necesario comprar el módulo completo, sino solo la parte analizadora de gases.

3. **Rango de Medición:** Al igual que la especificación de la resolución, se debe regir a partir del CFR y la EPA. Esta agencia ha definido estos rangos realizando mediciones meteorológicas y ambientales de manera que se pudiera definir qué cantidad de concentración másica en el aire es el adecuado para el bienestar humano.
4. **Tiempo de Respuesta:** Probablemente el que menos prioridad tiene, debido a que no es un factor que defina la eficiencia del dispositivo. En los equipos establecidos actualmente en la empresa, de marca Thermo y API, tienen un tiempo de respuesta de 30 a 40 segundos. Lo cual no es tan rápido, no obstante, brindan una respuesta confiable y acertada. Por lo que, si el equipo tiene un pequeño retardo en responder al muestrear una concentración en específico, pero es capaz de estabilizarse y brindar una respuesta precisa, es apto para el proyecto. Sin embargo, será un criterio para tener en cuenta a la hora de la elección del chip.

Una especificación adicional para considerar es la posibilidad de elegir los sensores de una misma marca comercial, ya que esto reducirá enormemente el costo de envío al país destino.

Teniendo claro qué especificaciones son los más importantes en el momento de elección, se hallaron dos compañías en el que sus sensores cumplen varias características, estos son las propuestas de Spec Sensor y EcSense.

**Tabla 2.** Especificaciones de límite de rendimiento para métodos automatizados

Parameter	Units	SO <sub>2</sub>		O <sub>3</sub>		CO		NO <sub>2</sub>
		Std. range	Lower range	Std. range	Lower range	Std. range	Lower range	(Std. range)
Range	PPM	0-0.5	<0.5	0-0.5	<0.5	0-50	<50	0-0.5
Noise	PPM	0.001	0.0005	0.0025	0.001	0.2	0.1	0.005
Lower detectable limit	PPM	0.002	0.001	0.005	0.002	0.4	0.2	0.010

Nota. Tomado y adaptado del CFR. [13]

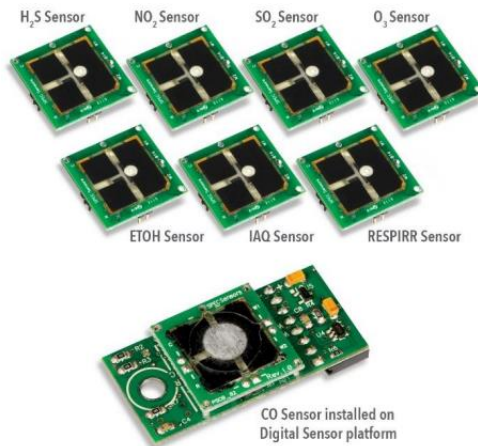
**Tabla 1.** Información comercial de distintos vendedores de sensores electroquímicos

Concentración	Referencia	Empresa	Resolución (PPM)	Vida útil (AA)	Rango (PPM)	T. de respuesta (s)
CO	TB600C-CO-100	EcSense	0,1	> 3	0 – 100	< 10
CO	AB010-R01D-CIT	City Technology	1	5	0 - 1000	30
CO	DGS-CO-968-034	Spec Sensor	0,1	> 5	0 - 1000	15
O <sub>3</sub>	TB600B-O3-5	EcSense	0,001	> 3	0 – 5	< 20
O <sub>3</sub>	DGS-O3-968-042	Spec Sensor	0,02	> 5	0 – 5	< 30
NO <sub>2</sub>	TB600B-NO2-5	EcSense	0,001	> 3	0 – 5	< 3
NO <sub>2</sub>	DGS-NO2-968-043	Spec Sensor	0,02	> 5	0 – 5	< 30
SO <sub>2</sub>	TB600B-SO2-5	EcSense	0,001	> 3	0 – 5	< 3
SO <sub>2</sub>	AD300-R04D-CIT	City Technology	0,1	5	0 – 20	< 10
SO <sub>2</sub>	DGS-SO2-968-038	Spec Sensor	0,05	> 5	0 – 20	< 30
CO, O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>	ZEHS04	Winsen	< 0,01	2	CO: 0 - 12,5 SO <sub>2</sub> : 0 - 2 NO <sub>2</sub> : 0 - 2 O <sub>2</sub> : 0-2	< 120

#### D. Sensores SpecSensor

En cuanto a este detector, se evidencia en sus características que los sensores tienen relativamente buena resolución, sin embargo, el único que cumple con la norma es la propuesta de la concentración de monóxido de carbono, cuyo rango mínimo es de 0.1 partes por millón. En cuanto a los demás parámetros, son sobresalientes y este sería un sensor óptimo para el análisis de CO. Este es mostrado en la fig. 8.

**Figura 3.** Módulos electrónicos de calidad de aire de SpecSensor



Nota. Tomado de SpecSensor. [14]

#### E. Sensores EcSense

El sensor mostrado en la fig. 9, después de observar los módulos de cada concentración, se puede decir que estos sensores tienen todas las particularidades que se buscan; mientras que, para CO, su resolución es de 0.1 PPM, para los demás parámetros es de 0.001 PPM, lo cual es justo lo que se necesita en el proyecto. De igual manera los rangos de medición están en un nivel deseado. A pesar de que su vida útil no se asegura que sea extensa, sí es modular, por lo que se pueden comprar por aparte las cápsulas donde se realiza el análisis de gases, teniendo un costo menor a la hora de realizar el remplazo de partes y mantenimiento.

**Figura 4.** Módulos electrónicos de calidad de aire de EcSense



Nota. Tomado de EcSense. [15]

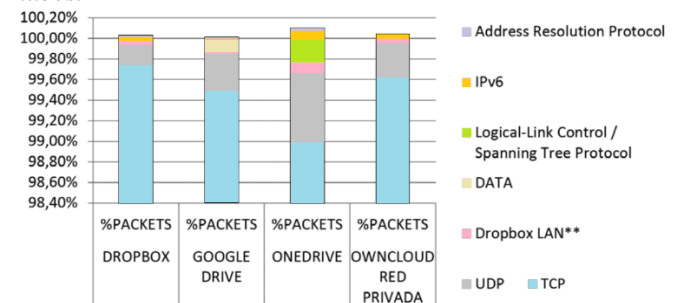
#### F. Protocolos de Comunicación

Al tenerse un muestreo de datos por un cierto periodo de tiempo en una estación de monitoreo de calidad del aire, estos son almacenados en una memoria. Sin embargo, es necesario el rápido acceso de estos al personal de análisis de datos de la empresa, por lo que se necesita un medio por el cual sean enviados a estos usuarios. Una solución a este problema son los datos almacenados en la nube, los cuales después de ser cargados se pueden solicitar en cualquier sitio con acceso a internet.

Existen infinidad de plataformas en la nube en la que se brinda cierto espacio de almacenamiento al usuario para que este pueda guardar cualquier tipo de archivo.

Según Pinzón y Padilla [16], se han realizado estudios de qué protocolos de comunicación son utilizados al cargar información en estos servicios de transferencia de archivos y páginas web tales como TCP (Protocolo de Control de Transmisión) y HTTP (Protocolo de Transferencia de Hipertexto) y también se encuentra el protocolo SSL (Capa de Sockets Seguros) para el manejo seguro de los sockets. Además, compararon la subida de paquetes en las plataformas en la nube más conocidas, tales como Dropbox, Google Drive y OneDrive. Al observarse la fig. 10, se evidencia que la mayoría de estas utilizan como protocolo principal el TCP, debido a que, si bien no es el protocolo más eficiente a la hora de realizar envío de paquetes, sí es el más fiable en los datos que se puedan perder o enviar a una dirección diferente, por lo que es prioridad en estas cargas de información.

**Figura 5.** Porcentaje de paquetes de diferentes protocolos para la transferencia de un archivo de 10MB en diferentes nubes.



Nota. Tomado y adaptado de Estándares Para Cloud Computing. [16, p. 38]

#### G. Diseño del circuito

En esta sección se explicará cómo se realizó el proceso de selección de componentes y por qué se seleccionaron. Adicionalmente, en términos generales el ordenamiento de estos en la placa impresa final y su debida función.

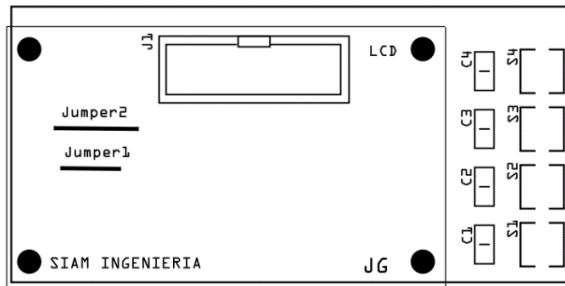
El circuito se ha dividido en dos partes, la placa base y la placa que comunica la pantalla con los botones de movimiento. Se les denominará «Placa Base» y «Placa Interfaz», respectivamente.

Se ha elegido cada componente que serviría para la adquisición de datos de los sensores, se han realizado pruebas en una breadboard con los mismos, se observó que el comportamiento era el requerido y se soldaron los componentes en una placa de cobre, o bien llamado «baquelita universal» para evitar cualquier tipo de ruido en

la lectura de los sensores electroquímicos al momento de manipular las conexiones rápidas o «Jumpers».

1. *Placa Interfaz:* Se presentará la interfaz de usuario por medio de la pantalla LCD policromática de 1.8" TFT (fig. 11), la cual también funcionará como almacenamiento de datos ya que viene incorporado con un módulo para tarjeta microSD; la navegación entre distintas opciones en la interfaz se hace por medio de cuatro pulsadores los cuales tienen como función según su orden como, arriba (^), abajo (v), Ok, y escape (Esc).

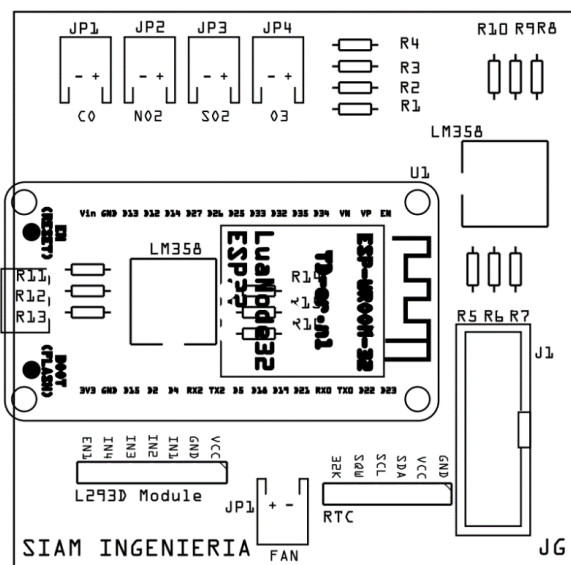
**Figura 6.** Serigrafía de la Placa Interfaz exportado de Fritzing



A cada pulsador se agregó un capacitor en paralelo con el objetivo de evitar el rebote o *debouncing* que puede producir falsos positivos al presionarlos; por último, se utilizó un conector de dieciséis pines para comunicar la Placa Interfaz con la Placa Base.

2. *Placa Base:* La placa presentada en la fig. 12 tiene la mayoría de los módulos electrónicos, de tal manera que en caso de alguno presente alguna avería en el ciclo de vida del dispositivo, al hacer el mantenimiento correctivo no implique más que retirarlo de la regleta de pines en el que está conectado y remplazarlo por uno nuevo. En los siguientes puntos se detallará cada módulo elegido para el montaje.

**Figura 7.** Serigrafía de la Placa Base exportada de Fritzing



3. *Microcontrolador:* Se eligió el microcontrolador ESP-32, gracias a sus múltiples interfaces periféricas que son necesarias para los distintos módulos que se conectarán (SPI, ADC, PWM); su Wi-Fi integrado para la subida de datos directa a la nube; y su programación versátil. Se ubicó en el centro de la placa por su necesaria conexión con todos los componentes.

4. *Sensores Electroquímicos:* En cuanto a los sensores electroquímicos, se seleccionaron los brindados por la marca SpecSensor, a pesar de su baja resolución como se describió en páginas anteriores (sección VII.D.), eran de bajo coste. Y se utilizarán como una prueba inicial para el prototipo. Estos sensores son de respuesta analógica, es decir que el valor de la concentración de gas es proporcional a la tensión entregada por este. Por desgracia la señal que entregan es demasiado pequeña, expresado en milivolts, así que fue necesario realizar una amplificación de la señal a una que el microcontrolador pudiera registrar.

Para superar este problema se utiliza el amplificador operacional LM358 para cada sensor, en el que se calcula un amplificador no inversor con resistencias específicas para que de esta manera se multiplique cada señal con una ganancia de 500, este valor se utiliza a causa de que con anterioridad se realizaron pruebas con el sensor de CO y se observó que el rango de señal que se detectaba era de 0 a 4 milivolts.

5. *Módulos Electrónicos Utilizados:* El módulo encargado de almacenar la hora y fecha será a partir del RTC DS3231 a través de comunicación SPI al igual que la pantalla LCD; para el control PWM de la bomba de aire fue necesario el Driver L293D, el cual viene integrado con un regulador de tensión a 5 volts, por lo que funciona adicionalmente como alimentación para todos los componentes del dispositivo.

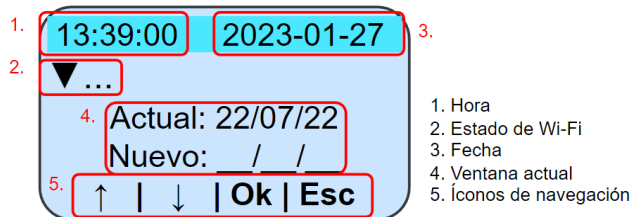
6. *Bomba de Aire:* Por último, la bomba de aire que se utilizará para extraer el aire a analizar será una bomba de presión negativa o bomba de vacío, el cual funciona de 6 a 12 volts. Este puede entregar hasta 5 litros por minuto, no obstante, para saber qué flujo de aire es el óptimo para el análisis de aire, se tomará como referencia el equipo analizador de aire de la marca ThermoFisher el cual recomiendan un flujo constante de 0.800 L/min [11].

Para tener conocimiento de qué tensión sería el adecuado para el flujo de aire deseado, se utilizó un medidor de flujo de la marca DryCat que se observa en la fig. 13. Este tiene una entrada y una salida de flujo, así que básicamente se le conectó una manguera de la salida de aire de la bomba a la entrada de aire del medidor. Se conectó una fuente de tensión a la bomba y se alimentó con 5.06V, y como se observa en la fig. 13, se evidenció un flujo de 0.926 L/min, este es un flujo un poco más alto que el recomendado, a pesar de ello en virtud de que la bomba es de 6 a 12V, se antepuso el bienestar de esta, ya que puede que, al bajar más la tensión, con el tiempo no funcione correctamente.

Figura 8. Prueba de flujo de la bomba de vacío.



Figura 10. Partes de la interfaz de usuario.



H. Interfaz de Usuario (Menú Árbol)

En la interfaz de usuario se deben tener en cuenta todos los datos que el operario podría necesitar modificar y a su vez utilizar. Al comenzar, se tiene la opción de iniciar la toma de datos según el parámetro que se haya escogido, con posibilidad de pararlo o terminarlo cuando ya haya concluido, y mostrar el tiempo que ha llevado el muestreo y guardarlo en la memoria en un archivo .SVG. Las demás opciones son para modificar todas las características necesarias para que el archivo guardado muestre en qué estación de monitoreo, qué día, a qué hora y qué parámetro, se estuvo monitoreando en ese momento. Todo esto evidenciado en la fig. 9.

Como se observa en la fig. 15, es una interfaz bastante intuitiva, y adaptada para cualquier persona contemporánea. Se tiene en la barra superior, información del tiempo actual en todo momento desde que se enciende; un símbolo del estado actual de la conexión Wi-Fi, el cual por defecto se conecta a una red predefinida en su programación como «Estación\_SIAM», y sus estados están determinados como «Buscando red», «Conectado», «Agotado tiempo de espera» y «Conectado sin internet» con los símbolos «▼...», «▼√», «▼x» y «▼!» respectivamente; en la parte central de la pantalla, información de la ventana en la que se está ubicado; y en la parte inferior, los íconos de navegación que cambian constantemente dependiendo la función que tengan en la ventana actual.

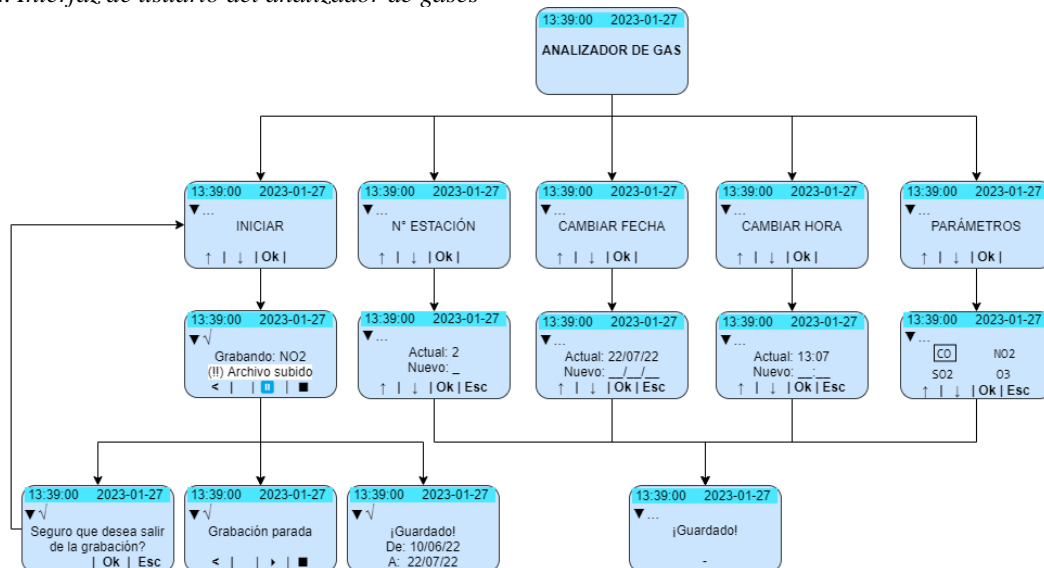
I. Diagrama de Flujo de la Toma de Datos

1. *Proceso de Funcionamiento:* Al encender el equipo y seleccionar en primera instancia «Iniciar», se le impedirá el acceso al usuario diciéndole los parámetros que le faltan por configurar, ya sea la concentración para monitorear, o el número de estación del dispositivo, ya que estos son datos obligatorios como información de registro.

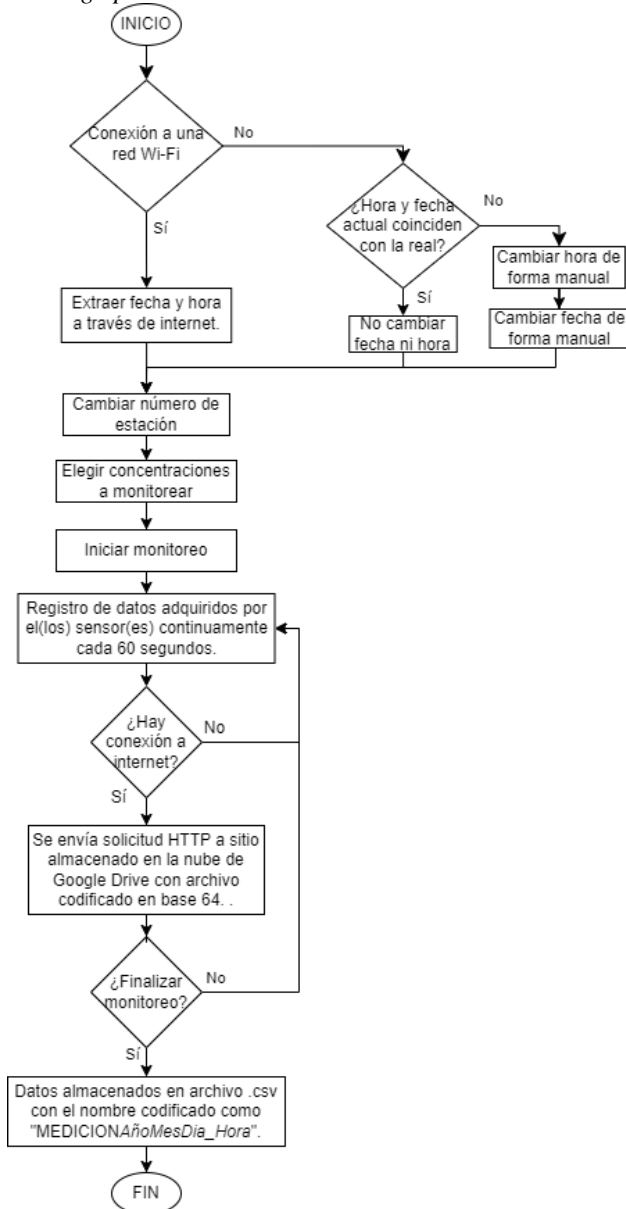
Si se observa la fig. 16, al iniciar el monitoreo, se registran los datos en el archivo .CSV a medida que pasa el tiempo, cada dato que se almacena es el promedio obtenido de los miles de datos que recibe el dispositivo desde los sensores en los 60 segundos que transcurren. Sin embargo, en tiempo real, en la pantalla el usuario evidencia los datos cada 5 segundos.

Al haber conexión a internet, el dispositivo inmediatamente inicia la subida de datos a la nube. Primero codifica el archivo .CSV en base64 (esto se realiza porque el protocolo HTTP sólo permite la transmisión de texto y no permite la transmisión de archivos binarios. La codificación base64 convierte los datos binarios en una representación de texto que puede ser transmitida a través de HTTP y luego decodificada en su formato original en el lado del servidor, en este caso Google Drive), después se conecta al servidor de Google Drive, y realiza la solicitud HTTP.

Figura 14. Interfaz de usuario del analizador de gases



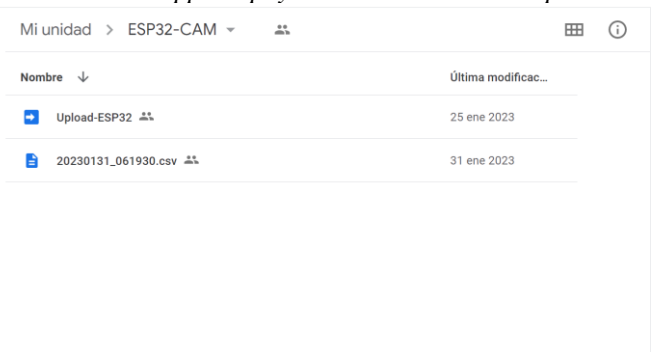
**Figura 11.** Diagrama de flujo vertical del funcionamiento del código para toma de datos.



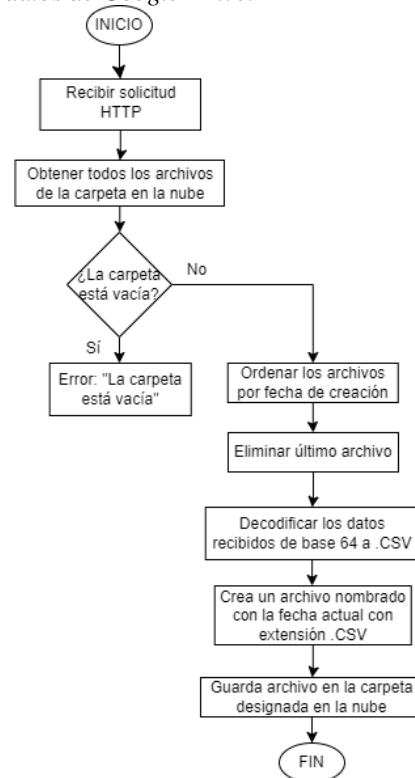
2. *Proceso de Subida de Datos de Google Drive:* El siguiente proceso es realizado mediante una App Script de Google Drive, el cual se implementó como aplicación web, y el enlace generado, se usó en el código de funcionamiento del ESP-32. El script crea una carpeta en la asignación de espacio del servidor llamada «ESP32-CAM» como se ve en la fig. 17.

Se utiliza un proceso similar al que realiza el microcontrolador, pero como receptor. Si se contempla la fig. 18, después de recibir la solicitud, procede a eliminar el último archivo subido a la carpeta asignada, esto con el propósito de no saturar la carpeta con un archivo nuevo cada vez que se registren nuevos datos en el dispositivo y se suban a Google Drive. Consiguiente a esto se decodifica el archivo a la extensión requerida y se le fija un nombre para finalmente guardarlo.

**Figura 12.** Carpeta de almacenamiento en Google Drive que contiene la App Script y un archivo de datos de prueba.



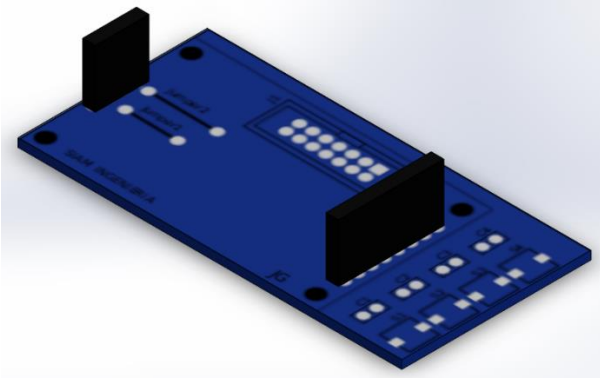
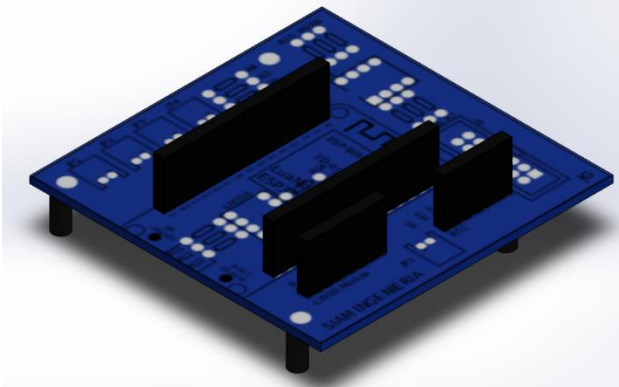
**Figura 13.** Diagrama de flujo vertical del proceso de subida de datos de Google Drive.



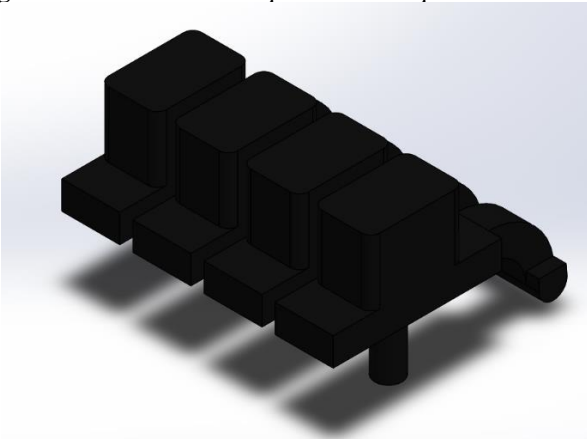
## J. Modelo 3D

Los modelos realizados se desarrollaron en el software SOLIDWORKS 2020. El diseño de los PCB (Placa de circuito impreso), se importaron a hacia este programa y las figuras de los módulos electrónicos conectados son utilizados de la página web libre GrabCAD. Cada parte interna de la carcasa es meramente ilustrativa con el fin de obtener medidas exactas para poderse fabricar y que cada componente tenga su lugar establecido en ella de la mejor manera.

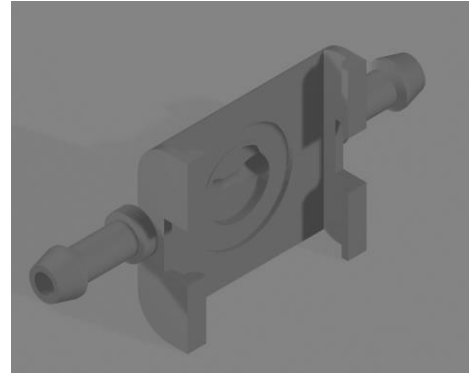
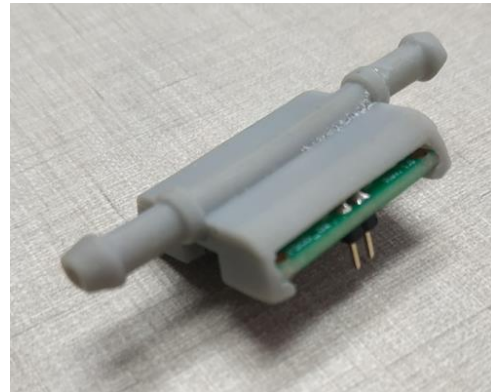
1. *Modelos Circuitos Impresos:* Según la fig. 19 y fig. 20, a ambas placas se les importó la serigrafía de los circuitos diseñados y se extruyeron regletas de pines dependiendo del módulo electrónico que se necesitara conectar. Solamente se modeló esta parte del PCB ya que es el componente con más volumen en el diseño, y como se mencionó antes, es con el fin de modelar la caja que aguarde cada parte y a su vez tener una idea de cómo se vería en su finalización.

**Figura 14.** Modelado del PCB de la Placa Interfaz**Figura 15.** Modelado del PCB de la Placa Base

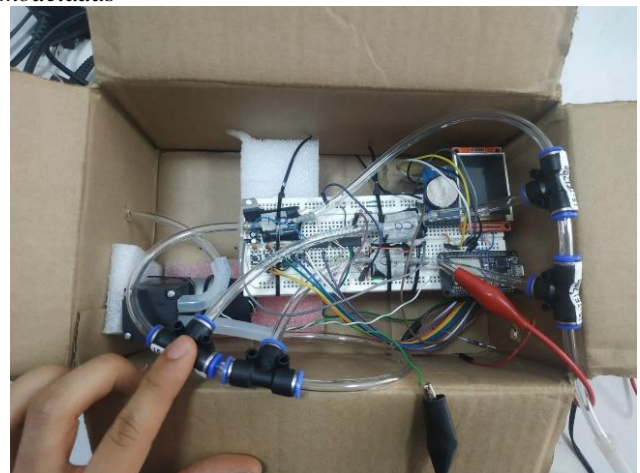
2. *Botones de Navegación:* Era prudente diseñar una protección para que fuera más cómodo para el usuario desplazarse por la interfaz a través de los pulsadores, fig. 21.

**Figura 16.** Modelado de la protección de pulsadores

3. *Cámara de Gas:* Antes de considerar diseñar una cámara de gas, se realizó un modelo 3D (contemplado en la fig. 22), basándose en las dimensiones de los sensores, la cual es una tapa de flujo. De forma que un orificio sea la entrada de la muestra, después fluya el aire a través del sensor, y el otro orificio sea la salida. Se realizó con el objetivo de que fuese más cómodo introducir gas de muestra, ya que en este se conectará una manguera. Y también preciso, ya que no interferirán otras partículas en la detección de gases. Posteriormente se procedió a imprimir en una impresora 3D, se acomodó cada tapa en los sensores como se evidencia en la fig. 23, y se verificó su efectividad introduciendo gas con la bomba de aire.

**Figura 17.** Modelado de tapa de flujo aire para sensores SpecSensor**Figura 18.** Modelo impreso y probado en el sensor de SpecSensor

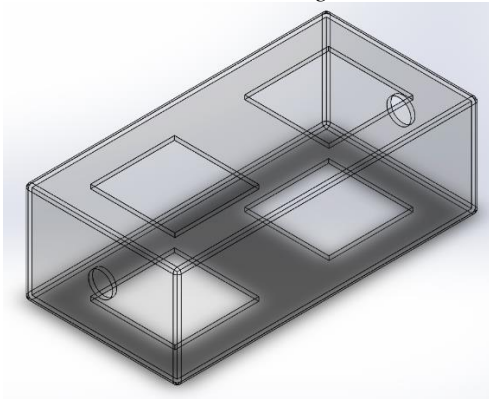
Las pruebas realizadas a un sensor fueron positivas, se registraba respuesta y el flujo de aire era correcto. Lamentablemente al momento de montar los sensores, cada uno con su tapa de flujo en paralelo como se observa en la fig. 24, se evidenció que la corriente de aire que entraba no era la misma que salía, por lo que se detectaron pérdidas, así que al ser deficiente los modelos creados, se decidió buscar una alternativa.

**Figura 19.** Prueba de fugas para las tapas de flujo modeladas

Después del asunto planteado, se dispuso a hallar una manera diferente de que los sensores fuesen «golpeados» por el aire extraído. Así que se pensó en una cámara de gas la cual estuviese cerrada, y solamente tuviera los orificios de salida, entrada, y un lugar para colocar cada sensor. En las pruebas reales se obtuvo una

caja de acrílico el cual se abrieron los diferentes agujeros, así que se dibujó la misma, como se ve en la fig. 25.

**Figura 20.** Modelado de cámara de gas

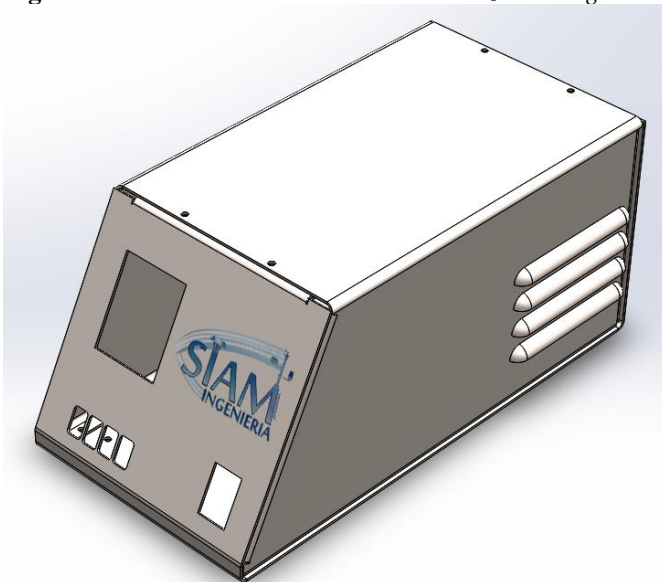


4. *Carcasa:* Para elaborar la caja en la fig. 26, que almacena cada elemento, se dividió en dos chapas metálicas; la parte en que estarán acomodados la mayoría de los componentes y la que funciona como protección superior del dispositivo.

Se ingenió realizarla como chapa metálica, ya que, para fabricar en masa, en términos de manufactura es más factible económicamente comprar láminas de acero, utilizar una cortadora láser de chapa para cada orificio, y finalmente a una dobladora de láminas.

En cuanto a material, es mejor metálico que plástico, por su resistencia a golpes, a entornos de alta temperatura y su costo de fabricación.

**Figura 21.** Modelado de la carcasa del analizador de gas



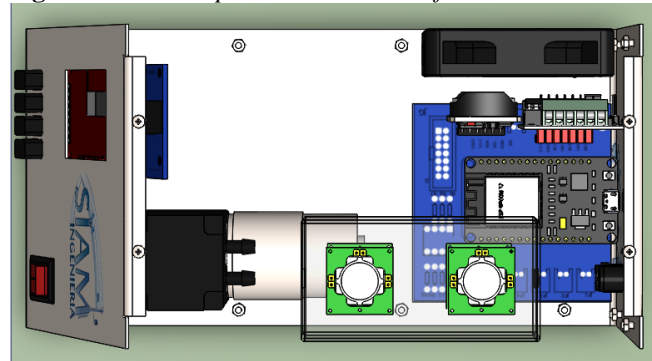
5. *Ensamble Final:* En la fig. 27, se refleja cómo se ubicaron los distintos componentes en el ensamble. En primer lugar, se ubicó la Placa Base en la parte trasera del analizador, ya que en este estaría el microcontrolador, y debe haber un orificio en la caja que se pueda introducir un cable micro USB por si se quiere cambiar el código fuente de este. En la placa también está ubicado el controlador de la bomba, en este están los dos integrados que más sufren de altas

temperaturas, el regulador y el Driver, por lo que se ubicó un ventilador justo en frente de estos, como disipación y evitar el desgaste de los componentes.

También se montó la bomba con sus dos orificios apuntando a la parte trasera del dispositivo, el cual tendrá dos mangueras conectadas, la presión negativa en serie con la cámara de gas, y la presión positiva, directamente a la salida del dispositivo.

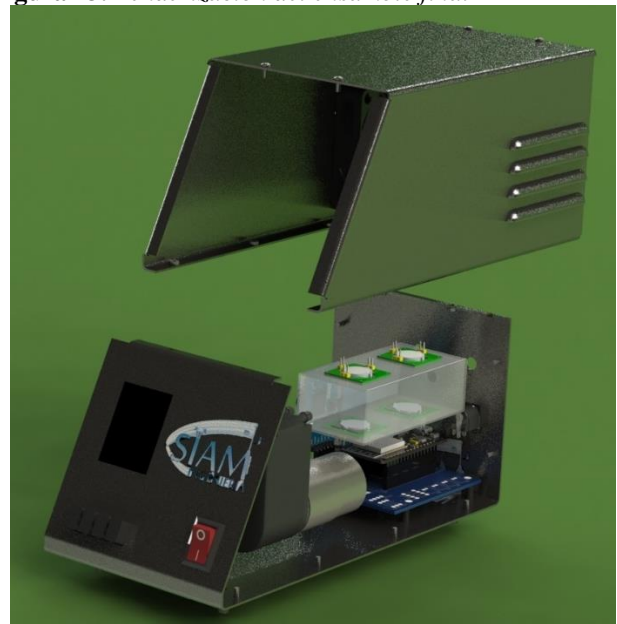
La pantalla con los pulsadores, se ubicaron en la parte delantera de la máquina, inclinada 60 grados para su fácil manejo desde una superficie baja.

**Figura 22.** Vista superior del ensamble final



En último término, en la fig. 28 se realizó una renderización del modelo terminado para tener una perspectiva de su construcción final.

**Figura 23.** Renderización del ensamble final



#### K. Ajuste de Linealidad de los Sensores

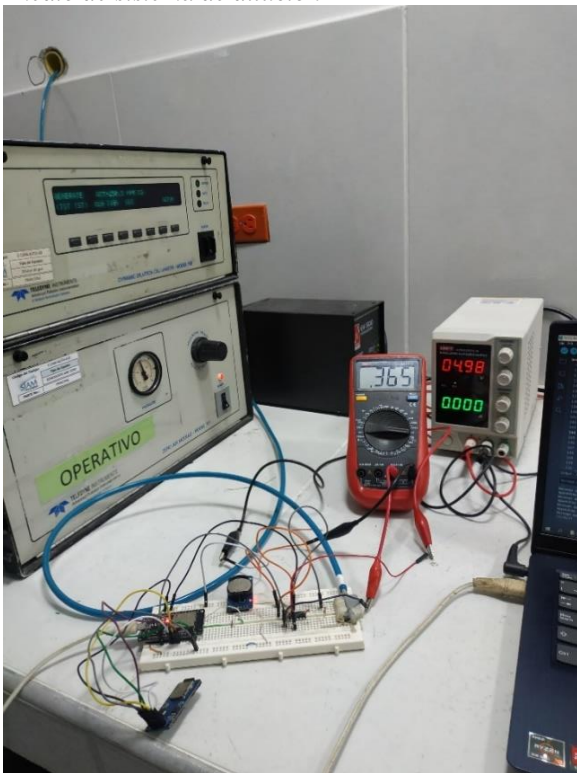
1. *Sensor de CO:* En una prueba inicial, se utilizó el sensor de detección de monóxido de carbono, un multímetro para observar en tiempo real la tensión generada por el sensor, y un módulo de microSD para almacenar los datos; se evidenció el buen funcionamiento de la toma de datos, realizando el registro en todo momento de la hora, fecha, concentración y, para prueba, el voltaje generado, así como se muestra en la tabla 3.

Para este monitoreo de muestras, se utilizaron las máquinas mostradas en la fig. 29. Se generó gas de CO a partir de un sistema electrónico de dilución de gas que, por medio de la apertura de válvulas se produce la concentración de gas requerida, realizando una mezcla de aire zero (aire limpio de gases de medición) y gas suministrado por un tanque el cual contiene distintas mezclas de fluidos de partículas.

**Tabla 2.** Fragmento de archivo generado .CSV para prueba de lectura y escritura de datos

FECHA	HORA	CO (PPM)	CO (V)
25/10/2022	7:19:14	42,10526	0,16
25/10/2022	7:19:19	42,10526	0,16
25/10/2022	7:19:24	42,10526	0,16
25/10/2022	7:19:29	42,10526	0,16
25/10/2022	7:19:34	42,10526	0,16
25/10/2022	7:19:39	42,10526	0,16
25/10/2022	7:19:44	44,73684	0,17
25/10/2022	7:19:49	44,73684	0,17
...	...	...	...

**Figura 24.** Prueba de monitoreo de concentración de gas por medio de sistema de dilución



Se realizó una prueba de linealidad al sensor, en la cual consistía en suministrarle concentración por medio del sistema de dilución antes explicado, se hizo en cuatro intervalos, en 0, 100, 150 y 200 PPM. Registrando el valor teórico y el valor experimental en PPM cuando el sensor ya estuviese estabilizado, como se evidencia en la tabla 4.

La razón por la cual no se inició de 0 a 50 PPM es que el sensor no evidencia cambio de tensión a partir de 70 PPM. Este claramente es un problema que se solucionará en el futuro.

En la fig. 30, se observa el muestreo total tomado durante 30 minutos, cambiando la cantidad de concentración aproximadamente cada 10 minutos. Se pueden observar varias características; primero el tiempo de respuesta, el cual

es alrededor de 3 minutos; también es bastante estable, igualmente es gracias a que se está haciendo un promedio de todos los datos que registra el microcontrolador en el intervalo de tiempo que se le indique registrar las muestras (en este caso cada 5 segundos).

**Tabla 1.** Comparativa de datos experimentales con los teóricos

CO teórico (PPM)	CO experimental (PPM)
0	0
100	55,26
150	131,57
200	202,63

**Figura 25.** Datos tomados del sensor en distintos momentos para diferentes cantidades de concentración



En la tabla IV, se contempla la diferencia que hay para diversos valores de concentración suministrados. A medida que aumenta la concentración, va disminuyendo el desfase que hay. Por lo tanto, se deben linealizar estos valores, por ejemplo, a través de una regresión polinomial, de manera que se obtenga un resultado más confiable.

La ecuación polinomial de regresión será calculada mediante el software Matlab utilizando la función Polyfit(). Esta función devuelve los coeficientes de un polinomio de grado  $n$  que sean los mínimos cuadrados entre los coeficientes proporcionados. Los coeficientes de la ecuación están en potencias descendentes y su longitud es  $n+1$  [17], como se muestra en la ec. 3.

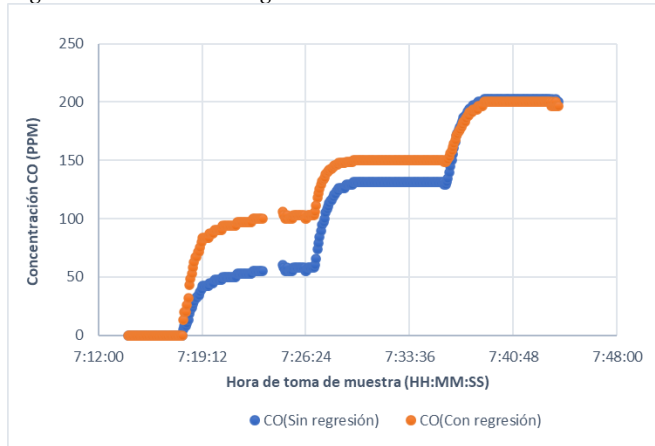
$$p(x) = p_1x^n + p_2x^{n-1} + \dots + p_nx + p_{n+1} \quad (4)$$

Al insertar los dos vectores observados en la tabla 4 a la función de Matlab, y reorganizarlos en la fórmula anterior, la ec. 4, se muestra como a continuación.

$$p(x) = x^3 * (4,4910e - 05) - x^2 * (0,01716) + x * (2,62100) - (2,84217e - 14) \quad (3)$$

Cada dato adquirido por el sensor se multiplica en esta ecuación, dando como resultado una respuesta lineal y confiable al comparar estos datos con los obtenidos en la fig. 29. Reflejado en la fig. 31.

**Figura 26.** Comparación de datos experimentales sin regresión contra con regresión



2. **Sensor de O<sub>3</sub>:** Este sensor al igual que el de NO<sub>2</sub> (explicado en el siguiente numeral), no presentaron cambio alguno de tensión, aún con un amplificador operacional, así como se realizó con el sensor de CO. En la fig. 32 se experimentaron pruebas de lineamiento con un equipo de referencia, un equipo automático de la marca ThermoFisher de serie 49i. Al suministrar concentración de O<sub>3</sub>, mientras que el equipo especializado sí presentaba lecturas según la cantidad suministrada, el sensor permanecía en 0.1 mV.

**Figura 27.** Prueba de funcionamiento para el sensor de detección de O<sub>3</sub>



Se aumentó la concentración hasta 500 PBB, el cual es la cantidad máxima que puede brindar el equipo calibrador, aun así, fue deficiente el intento por hacer uso de este sensor.

3. **Sensor de NO<sub>2</sub>:** Un caso similar al presentado por el sensor de O<sub>3</sub>, experimentó el funcionamiento de este en varios entornos, incluso en el tubo de escape de dos vehículos. Para dar con la sorpresa de la indiferencia del sensor frente a grandes fuentes de emisión de este contaminante atmosférico, por lo que se decidió no utilizarlo en este proyecto al igual que el detector de Ozono.

Se contactó al fabricante sobre este inconveniente, él comentó que, para la correcta lectura de estos sensores, y observar la diferencia de tensión frente a cambios de concentración en el ambiente, es más efectivo utilizar un módulo Conversor Analógico – Digital de 24 bits de resolución, ya que estos manejan tensión en micras y el convertidor que posee el microcontrolador utilizado es de 12 bits. Infortunadamente no se logró adquirir a tiempo este módulo para realizar las debidas pruebas, sin embargo, se tiene destinado como una recomendación a futuro.

#### L. Prueba de Monitoreo de Gas

Se ejecutó la evaluación del prototipo en una caja experimental con los componentes electrónicos en su interior como se observa en la fig. 33. La prueba se hizo en sincronía con un equipo analizador de gas de la marca ThermoFisher de la serie 48i.

**Figura 28.** Prototipo analizador de gas en funcionamiento



1. **Monitoreo de Gas:** La empresa eligió sus instalaciones como lugar para instalar la estación de monitoreo de ensayo. Desafortunadamente, no fue posible hacerlo en un entorno de campo debido a que el equipo de referencia sería utilizado en un proyecto que comenzaría en los días posteriores, lo que resultó en un tiempo de muestreo reducido a solo 24 horas. Los dos equipos empezaron a registrar datos al mismo tiempo, uno al lado del otro, conectados por un racor rápido tipo T, y la manguera de entrada de gas (ver fig. 34), fue ubicada en una ventana al aire libre. La periodicidad del registro de datos fue minuto a minuto, debido a que solo es una evaluación de la eficacia del dispositivo. Ya que según la Resolución 2254 del 2017 Artículo 2, establece que el Tiempo de Exposición para el monitoreo de este gas, es de 1 hora, así que este tiempo de escritura de datos, se modificaría al momento de hacer un análisis de calidad de aire de un proyecto real. [18]

Mientras que el dispositivo guardaba datos, se comprobaba la correcta subida de información en la plataforma en línea. Por medio de datos móviles y un punto de acceso Wi-Fi, con el nombre asignado al ESP-32 y al realizar la búsqueda constante de red, se evidenciaba la

actualización del archivo en la carpeta. Desde que se enviaba la solicitud HTTP, hasta que se observaba en la plataforma, resultó en una duración de alrededor de 10 segundos.

Finalmente, cuando hubo transcurridas 24 horas de monitoreo, se hizo el proceso de descarga de datos de ambos equipos.

2. *Descarga de Datos de Analizador ThermoFisher:* Para poder manipular la información registrada en el equipo se deben seguir ciertos pasos como a su vez contar con algunos materiales antes de realizar la descarga.

Primero se debe contar con un cable RS232 hembra a USB para así poder insertar un conector al analizador y el otro al computador. Así como descargar los respectivos controladores para que el PC lo detecte como un puerto serial.

Después se debe instalar el software del fabricante llamado «iPort». Posteriormente se deben ajustar ciertos parámetros de comunicación como baudios, número de bits, paridad, etc. Al hacer esto, el software busca el ID de la máquina para así descargar los últimos datos registrados, los cuales no pueden exceder 2046 porque el equipo tiene limitada la cantidad de memoria para almacenamiento.

Como el lector puede darse cuenta, es un procedimiento largo e ineficiente el cual se debe hacer cada vez que se utilice el equipo.

3. *Descarga de Datos del Prototipo Analizador:* Para descargar los datos del dispositivo, se tienen dos opciones:

La más sencilla y rápida, es a través de la plataforma en la nube, pero para esto, el operario que esté en campo con el dispositivo debe disponer de un celular inteligente con señal de datos móviles, para que pueda actualizar el archivo en la nube cada que se le facilite. Al tener acceso a esto, solo se tiene que compartir un punto de acceso Wi-Fi, y automáticamente desde cualquier lugar, la persona autorizada para entrar a la carpeta pueda descargar los datos.

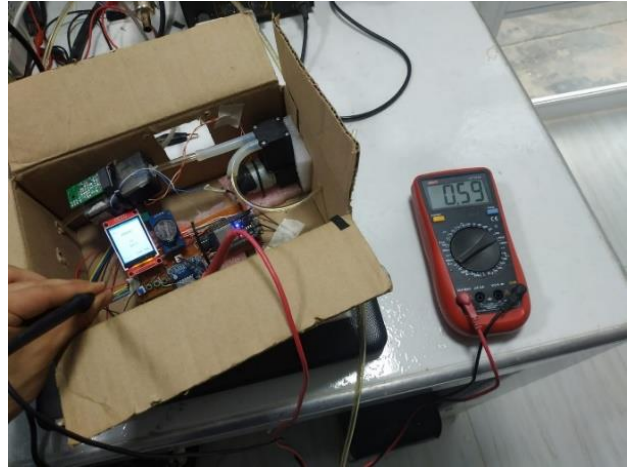
En caso de no haber conexión a internet en el lugar remoto donde se realiza el monitoreo, siempre está disponible la opción de retirar la tarjeta SD del dispositivo, insertarla en un PC y mover los archivos que se necesite.

4. *Consumo del dispositivo:* Se hizo prueba de corriente al prototipo a través del multímetro, con el fin de demostrar el bajo consumo tanto en *Standby*, como en funcionamiento.

Como se observa en la fig. 35, en modo amperímetro, se conectó su pinza positiva del medidor en la entrada *Ground* del módulo L293D y su pinza negativa en el switch de encendido que cierra el circuito con el *Ground* de la fuente de voltaje.

El medidor dio lectura de 0.59 A mientras está en monitoreo, es decir, cuando la bomba está encendida. Y en *Standby* se registró un valor de 0.12 A.

**Figura 29.** Prueba de corriente del prototipo en funcionamiento.

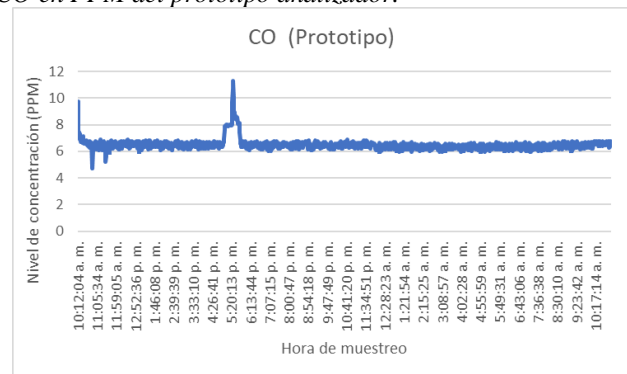


Al utilizar 12 V como voltaje de entrada, la potencia que consume el equipo es de 7.08 W en funcionamiento y 1.44 W en modo reposo.

## VIII. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Después de un día completo en el monitoreo de concentración de CO. Primero se graficaron los datos obtenidos por la parte del prototipo, mostrados en la fig. 36. Se pueden evidenciar varios detalles: el tiempo en el que el equipo logra estabilizarse es de al menos media hora, esto podría interpretarse como una duración extensa, sin embargo, es veloz, ya que el analizador Thermo se debe preparar mucho más antes de poder brindar una respuesta fiable, porque debe calentar componentes como la cámara de gas o el detector de IR.

**Figura 30.** Gráfico y muestreo de datos de concentración de CO en PPM del prototipo analizador.



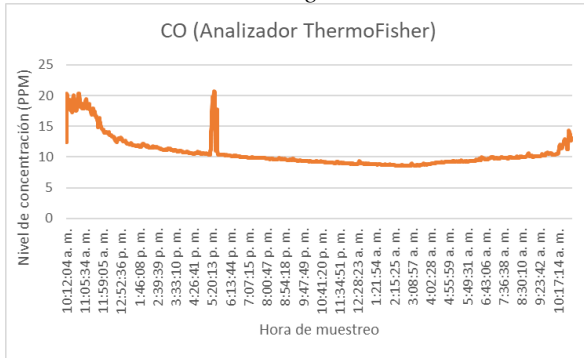
También un extraño pico cerca de las 5 p.m., esto se debe a que se quería ver un factor externo que actuara en ambas máquinas y observar si el comportamiento era similar. Haciendo uso de una fuente significativa de CO: el humo de un papel incinerado. Directamente en el sensor este genera al menos 300 PPM, así que, por motivos de no exagerar la respuesta de los equipos, se acercó a una distancia considerable para que la bomba de cada dispositivo absorbiera el humo a grandes distancias como lo haría con un automóvil en una estación a kilómetros de distancia.

En seguida se representaron gráficamente los datos extraídos del equipo Thermo mostrados en la fig. 37. Señalando las mismas características observadas en la anterior gráfica, se puede detallar el tiempo de estabilización

del equipo, el cual es de casi 2 horas (e incluso un poco más), en consecuencia, como se mencionó antes, las temperaturas las cuales aumentan lentamente, y presentan una alarma en el equipo, indicando que aún no da resultados verídicos.

En cuanto al pico de tensión, también se genera uno similar y proporcional al del prototipo, demostrando un funcionamiento muy acorde a factores externos que en un monitoreo real pueda experimentar.

**Figura 31.** Gráfico y muestreo de datos de concentración de CO en PPM del analizador de gas de ThermoFisher.



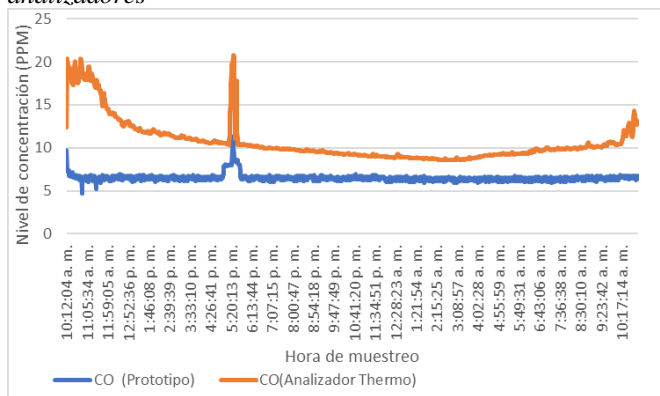
Para diferenciar con precisión ambos resultados, se compararon en la fig. 38.

Se contempla nuevamente la distinción en el tiempo de estabilización, siendo el del sensor electroquímico mucho más rápido.

Al estabilizarse se denota una importante discrepancia en la cantidad de concentración en ambos analizadores, Sin embargo, esto no es problema, ya que sería un ajuste por realizar al equipo de prueba en su cálculo interno, pues el resultado se observa bastante proporcional en toda la vigilancia.

Otra característica que se observa es que el analizador Thermo presenta desde su estabilización hasta alrededor de las 3 a. m., una caída de unidad de sustancia de CO, para luego comenzar en aumento. En cambio, el dispositivo fabricado en el proyecto no presenta ninguna reacción, esto se puede deber al problema mencionado al momento de realizar la prueba de ajuste, en el que se infirió que el sensor electroquímico no presentaba cambios de tensión significativos a cambios muy bajos de concentración. Característica la cual se puede solucionar, remplazando estos sensores analógicos por unos digitales de mejor gama, como los brindados por EcSense mostrados en la sección VII.E.

**Figura 32.** Comparación de resultados de ambos analizadores



## IX. CONCLUSIONES

El dispositivo completó las funciones que se tenía previstas, realizando el almacenamiento de datos en una tarjeta SD en el tiempo de registro requerido, con una interfaz intuitiva para el usuario en el que le es posible modificar, actualizar y seleccionar cada parámetro de configuración que le es necesaria y, por último, hacer uso de una plataforma en la nube (en este caso Google Drive) para la correcta sincronización de datos registrados por el prototipo.

El dispositivo cumplió con el requerimiento de ser de mucho menor consumo que los equipos analizadores actuales en la organización. Siendo de 7.08 W como máximo en el prototipo, a comparación de los 270 W [9, pp. 1-4] (según manual del fabricante) de los equipos Thermo.

El servidor en la nube de Google Drive es un buen sistema de almacenamiento para proyectos de IoT como el presentado, ya que, a través de una App Script, se puede programar cualquier función necesaria para el manejo de archivos (mover, borrar, cortar, crear carpetas, etc.). Y rápida, ya que, con una conexión a internet medianamente estable en un lugar remoto, se pueden subir archivos .CSV de 1 MB en menos de 10 segundos.

Los sensores electroquímicos analógicos de SpecSensor son una buena compra si se necesita realizar una aplicación en el que la precisión del sensor no tenga tanta relevancia, como en un sistema de alarma de incendios.

## X. RECOMENDACIONES

Como mejora inmediata del dispositivo, se debe adquirir un módulo conversor Analógico – Digital de 24 bits para intentar nuevamente la comprobación de funcionamiento de los sensores faltantes de implementación en el prototipo, como es el dióxido de nitrógeno y ozono.

Por solicitud de la organización, se debe llevar a cabo una opción de configuración más al dispositivo al momento de iniciar el monitoreo, la cual es la posibilidad de seleccionar qué número de proyecto se pondrá en marcha y este sea agregado en el mismo archivo que se genere.

Si se quiere tener una mejor resolución de concentración de gas, es conveniente adquirir sensores electroquímicos de tipo digital, como los brindados por la compañía EcSense evaluada en la cotización. Son más costosos y a su vez se tendría que implementar la recepción de datos a través de comandos según su manual de fábrica, pero se prevé una mejor respuesta.

Como competencia futura, se realizará una sección donde solo el usuario de mantenimiento pueda acceder, en el que, a través de la interfaz, sea posible ajustar y calibrar los datos adquiridos por el sensor realizando internamente la fórmula de regresión lineal por mínimos cuadrados.

## APÉNDICE

### A. Plan de Trabajo

Se evidencian los objetivos específicos detallados con cada tarea que se realizó cronológicamente.

## REFERENCIAS

- [1] SIAM Ingeniería, «Misión y Visión.» 2012. [En línea]. Available: <https://siamingenieria.com/wpf/about/>.
- [2] L. Boissoneault, «The Deadly Donora Smog of 1948 Spurred Environmental Protection—But Have We Forgotten the Lesson?», *Smithsonian*, 26 Octubre 2018.
- [3] «The Air Quality Act of 1967.» *Journal of the Air Pollution Control Association*, pp. 62-71, 1968.
- [4] EPA, «United States Environmental Protection Agency.» 12 Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-air-act>.
- [5] IDEAM, «Ideam.gov.co.» Febrero 2008. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Protocolo+par+a+el+Monitoreo+y+seguimiento+de+la+calidad+del+aire.pdf/6b2f53c8-6a8d-4f3d-b210-011a45f3ee88>.
- [6] K. Ishida.Japón Patente 3898462, 1975.
- [7] R. Kinnett, «HACKADAY.» 01 09 2019. [En línea]. Available: <https://hackaday.io/project/167435-a-more-complete-air-quality-monitor>.
- [8] Thermo Scientific, «Infrared Non-Dispersive CO2 Analyzer Working Principle.» 2015. [En línea]. Available: <https://instrumentationtools.com/infrared-non-dispersive-co2-analyzer-working-principle/>.
- [9] Thermo Scientific, «Model 49i Instruction Manual UV Photometric O3 Analyzer.» 2011. [En línea]. Available: <https://www.thermofisher.com/document-connect/document-connect.html?url=https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets%2FEPM%2Fmanuals%2FEPM-manual-Model%2049i.pdf/>.
- [10] Thermo Scientific, «Model 42i Instruction Manual Chemiluminescence NOx Analyzer.» 2007. [En línea]. Available: <https://www.thermofisher.com/document-connect/document-connect.html?url=https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets%2FLSG%2Fmanuals%2FEPM-manual-Model%2042i.pdf>.
- [11] Thermo Scientific, «Model 43i Instruction Manual Pulsed Fluorescence SO2 Analyzer.» 2015. [En línea]. Available: <https://www.thermofisher.com/document-connect/document-connect.html?url=https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets%2FLSG%2Fmanuals%2FEPM-manual-Model%2043i.pdf>.
- [12] MEMBRAPOR, «Electrochemical Gas Sensors.» 2020. [En línea]. Available: <https://www.membrapor.ch/electrochemical-gas-sensors/>.
- [13] Code of Federal Regulations, «Table B-1 to Subpart B of Part 53, Title 40.» 2015. [En línea]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-C/part-53/subpart-B/appendix-Table%20B-1%20to%20Subpart%20B%20of%20Part%2053>.
- [14] SpecSensor, «Digital Gas Sensor Developer Kit: Digital SDK.» 2017. [En línea]. Available: <https://www.spec-sensors.com/product/digital-gas-sensor-developer-kit/>.
- [15] Ec Sense, «Ozone Gas Module.» 2020. [En línea]. Available: <https://ecsense.com/product/tb600b-o3-5-air-quality-sensor-module/>.
- [16] J. P. y. J. Pinzón, «Estándares Para Cloud Computing: Estado Del Arte Y Análisis De Protocolos Para Varias Nubes.» Research Gate, Bucaramanga, 2015.
- [17] MathWorks, «MathWorks.» 2022. [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html>.
- [18] IDEAM, «Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.» 1 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resoluci%C3%B3n+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f>. [Último acceso: 02 02 2023].
- [19] I. Amaya, Á. Martínez y A. Rizzo. [En línea].