



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

Opción 1.- TESIS

**TRABAJO PROFESIONAL**

**DESARROLLO DE UNA NARIZ ELECTRÓNICA PARA EL  
MONITOREO DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE  
CARBONO Y HUMEDAD EN UN INVERNADERO VERTICAL  
ENFOCADO AL CRECIMIENTO DE ESPECIES BIOLÓGICAS  
VEGETALES**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN  
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**PRESENTA:**

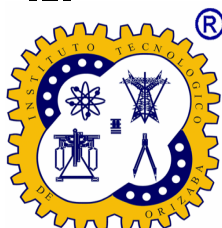
**IQ. GUADALUPE XOLOTZIN ABAD GALINDO**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. GERARDO ÁGUILA RODRÍGUEZ**

**CODIRECTOR DE TESIS:**

**DR. ARACELI ORTIZ CELISEO**





Orizaba, Veracruz, **10/febrero/2025**  
Dependencia: **División de Estudios de  
Posgrado e Investigación**  
Asunto: **Autorización de Impresión**  
OPCION: I

**C. GUADALUPE XOLOTZIN ABAD GALINDO**  
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:  
**INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**PRESENTE.-**

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

" **DESARROLLO DE UNA NARIZ ELECTRÓNICA PARA EL MONITOREO DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO Y HUMEDAD EN UN INVERNADERO VERTICAL ENFOCADO AL CRECIMIENTO DE ESPECIES BIOLÓGICAS VEGETALES**".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica®  
**CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®**

**DRA. OFELIA LANDETA ESCAMILLA**  
**ENCARGADA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



**OG-13-F06**



**2025**  
Año de  
**La Mujer  
Indígena**





Instituto Tecnológico de Orizaba  
División de Estudios de Posgrado

Orizaba, Veracruz, 4/febrero/2025

Asunto: **Revisión de trabajo escrito**

**C. OFELIA LANDETA ESCAMILLA**  
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
**PRESENTE.-**

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

**GUADALUPE XOLOTZIN ABAD GALINDO**

La cual lleva el título de:

**“DESARROLLO DE UNA NARIZ ELECTRÓNICA PARA EL MONITOREO DE LA CONCENTRACIÓN DE  
DÍOXIDO DE CARBONO Y HUMEDAD EN UN INVERNADERO VERTICAL ENFOCADO AL CRECIMIENTO  
DE ESPECIES BIOLÓGICAS VEGETALES”**

Y concluyen que se acepta.

**ATENTAMENTE**

Excelencia en Educación Tecnológica®  
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. GERARDO ÁGUILA RODRÍGUEZ

  
FIRMA

SECRETARIO: DRA. BLANCA ESTELA GONZÁLEZ SÁNCHEZ

  
FIRMA

VOCAL: DR. IGNACIO HERRERA AGUILAR

  
FIRMA

VOCAL SUP.: DRA. ARACELI ORTIZ CELISEO

  
FIRMA

TA-09-18



**2025**  
Año de  
**La Mujer  
Indígena**



# CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| AGRADECIMIENTOS .....   | 10 |
| RESUMEN .....   | 11 |
| ABSTRACT .....  | 12 |
| INTRODUCCIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL CONTENIDO .....   | 13 |
| CAPÍTULO 1: FUNDAMENTACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS PRELIMINAR.....   | 15 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....   | 15 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN.....  | 16 |
| 1.3 HIPÓTESIS .....   | 17 |
| 1.4 OBJETIVOS .....   | 17 |
| Objetivo general.....   | 17 |
| Objetivos específicos.....  | 17 |
| 1.5 INNOVACIONES EN NARICES ELECTRÓNICAS Y SUS APLICACIONES EN EL SECTOR INDUSTRIAL.....  | 17 |
| 1.5.1 Aplicaciones de narices electrónicas en la industria alimentaria .....  | 18 |
| 1.5.2 El uso de narices electrónicas en diversos sectores .....   | 20 |
| CAPÍTULO 2: NARIZ ELECTRÓNICA PARA MEDIR CO2 Y HUMEDAD, PARA EL CULTIVO DE ESPECIES BIOLÓGICAS VEGETALES EN UN INVERNADERO VERTICAL ..... | 24 |
| 2.1 Las Narices Electrónicas (NE) .....   | 24 |
| 2.2 Las narices electrónicas como un sistema integrado .....  | 25 |
| 2.3 El olfato humano y su funcionamiento.....   | 26 |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 2.4  | Comparación del sentido del olfato humano y un sistema de olfato artificial .....                                       | 28 |
| 2.5  | Tipos de sensores de gas .....  | 29 |
| 2.5.1  | Sensores electroquímicos .....  | 31 |
| 2.6  | Relación entre el dióxido de carbono y humedad, en la siembra de especies vegetales .....                               | 32 |
| 2.6.1  | Dióxido de carbono ( $CO_2$ ) .....   | 33 |
| 2.6.2  | Humedad y temperatura.....  | 34 |
| 2.6.3  | Influencia del dióxido de carbono en las especies vegetales.....  | 35 |
| 2.7  | Implementación de espacios controlados en el proceso de cosecha.....  | 36 |
| 2.7.1  | Invernaderos verticales .....   | 37 |
| <br>   |   |    |
| CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA              |   |    |
| EL DESARROLLO DE UNA NARIZ ELECTRÓNICA, APLICADA A UN INVER- |   |    |
| NADERO VERTICAL .....  |   |    |
| 3.1  | Elección de los sensores de acuerdo a las variables de interés.....   | 40 |
| 3.1.1  | Sensor TGS4161 para la detección de Dióxido de Carbono.....   | 40 |
| 3.1.2  | Acondicionamiento de señal de salida del sensor para dióxido de carbono ...   | 40 |
| 3.1.3  | Circuito de acondicionamiento para medición y limpieza .....  | 41 |
| 3.1.4  | Identificación del comportamiento del dióxido de carbono por espectrofotometría por Transformada de Fourier (FTIR)..... | 42 |
| 3.1.5  | Procesamiento de los datos obtenidos por FTIR.....  | 47 |
| 3.2  | Experimentación y prueba de los componentes electrónicos que integran la nariz electrónica .....                        | 48 |

|  |   |           |
|--|---|-----------|
| 3.3  | Pruebas y comportamiento del sensor de dióxido de carbono .....   | 49        |
| 3.3.1  | Relación de los datos obtenidos por espectrofotometría por transformada de Fourier y el sensor para dióxido de carbono .....              | 53        |
| 3.4  | Implementación del sensor HMZ 433A1 para monitoreo de humedad y temperatura.....  | 55        |
| 3.5  | Diseño e integración de una interfaz gráfica para observar la respuesta del sensor para $CO_2$ y para humedad-temperatura HMZ 433A1 ..... | 57        |
| 3.6  | Consideraciones y diseño del enclosure .....  | 60        |
| 3.7  | Celda de medición .....   | 61        |
| 3.8  | Pantalla táctil de cristal líquido para la interfaz gráfica.....  | 62        |
| 3.9  | Módulos electrónicos que integran el sistema.....   | 63        |
| 3.10   | Enclouser general .....   | 65        |
| <b>CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b> |   | <b>67</b> |
| 4.1  | Pruebas y funcionalidad de los circuitos electrónicos para la configuración del sensor de dióxido de carbono .....                        | 67        |
| 4.2  | Tiempo de respuesta y sensibilidad del sensor para dióxido de carbono.....  | 69        |
| 4.3  | Repetitividad de respuesta.....   | 72        |
| 4.3.1  | Demostración del menú de usuario.....   | 74        |
| 4.4  | <b>DISEÑO MECÁNICO</b> .....  | <b>76</b> |
| 4.4.1  | Restricciones mecánicas para el diseño y manufactura del enclosure.....   | 77        |
| 4.5  | Respuesta de la nariz electrónica para el monitoreo de muestras de dióxido de carbono.....  | 80        |
| <b>CONCLUSIONES</b> .....  |   | <b>82</b> |

|  |     |
|--|-----|
| TRABAJO A FUTURO.....  | 83  |
| PRODUCTOS ACADÉMICOS .....   | 84  |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....  | 85  |
| ANEXOS .....   | 90  |
| ANEXO A  DATA SHEET DE LOS SENSORES.....   | 90  |
| ANEXO A.1  Sensor de gas para $CO_2$ .....   | 90  |
| ANEXO A.2  Sensor HMZ 433A1 para humedad y temperatura .....   | 92  |
| ANEXO A.3  Amplificador operacional TL084: Información más relevante.....  | 95  |
| ANEXO B  MANUALES DE OPERACIÓN.....  | 98  |
| ANEXO B.1  Configuración y Manejo de la Interfaz Gráfica mediante la Pantalla<br>LCD Shield Arduino 3.5 TFT .....      | 98  |
| ANEXO B.2  Manual de usuario para la nariz electrónica.....  | 101 |
| ANEXO C  PROGRAMACIÓN PRINCIPAL.....   | 106 |
| ANEXO C.1  Código principal para el desarrollo del menú de usuario a través de<br>la pantalla de cristal líquido ..... | 106 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1. Diagrama sobre el proceso del sistema respiratorio. ....   | 27 |
| Figura 2.2. Estructura del aparato respiratorio humano. ....   | 28 |
| Figura 2.3. Estructura interna del sensor electroquímico [20]. ....  | 31 |
| Figura 2.4. Mapa conceptual de los componentes y funcionamiento de los sensores electroquímicos. ....  | 32 |
| Figura 2.5. Mapa conceptual de las ventajas y desventajas de la implementación de los invernaderos verticales. ....  | 37 |
| Figura 2.6. Invernadero vertical en la región de Chengdu, China. ....  | 38 |
| Figura 3.1. Diagrama de flujo general de la metodología para la elaboración de la nariz electrónica. ....  | 39 |
| Figura 3.2. Simulación en Multisim del voltaje de acondicionamiento del sensor de $CO_2$ . ....  | 41 |
| Figura 3.3. Circuito para limpieza y medición del sensor de $CO_2$ . ....  | 42 |
| Figura 3.4. Espectrofotómetro Thermo Scientific iS5 [30]. ....   | 43 |
| Figura 3.5. Celda para gases. ....   | 43 |
| Figura 3.6. Gráfica del espectro de absorción de IR para una película de poliestireno, usado para calibrar el equipo. ....   | 43 |
| Figura 3.7. Gráfica del espectro infrarrojo del dióxido de carbono. ....   | 45 |
| Figura 3.8. Pasos para obtener los espectros experimentales. ....  | 45 |
| Figura 3.9. Gráficas obtenidas de los espectros experimentales a diferentes volúmenes de $CO_2$ . ....   | 46 |
| Figura 3.10. Gráfica de ejemplo de un espectro total de una muestra de $CO_2$ con un volumen de 2 $cm^3$ . ....  | 47 |
| Figura 3.11. Gráfica de ejemplo del seccionamiento del espectro, mostrando la región de $CO_2$ a diferentes concentraciones. ....  | 48 |
| Figura 3.12. Diagrama esquemático y representación 3D de la fuente de alimentación. ....   | 49 |
| Figura 3.13. Diagrama esquemático, resultados de la simulación electrónica y vista 3D del circuito de acondicionamiento de señal utilizado para el sensor de $CO_2$ TGS 4161. .... | 50 |

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Figura 3.14. | Vista 3D de la tarjeta de conexiones para los sensores de $CO_2$ (TGS 4161), humedad y temperatura (HMZ 433A1) y vista real de la recámara de calibración.                | 51 |
| Figura 3.15. | Conexión reguladora de presión de $CO_2$ .  | 51 |
| Figura 3.16. | Circuito esquemático de control de temperatura para el sensor de $CO_2$ y vista 3D de su circuito impreso.  | 52 |
| Figura 3.17. | Interfaz gráfica para monitoreo en tiempo real del sensor de $CO_2$ .   | 53 |
| Figura 3.18. | Mapa conceptual sobre las características de los métodos de medición de $CO_2$ empleados.   | 54 |
| Figura 3.19. | Principales características del sensor HMZ 433A1 para humedad-temperatura.  | 55 |
| Figura 3.20. | Pantalla de inicio para el monitoreo de la temperatura ambiental.   | 58 |
| Figura 3.21. | Pantalla de inicio para el monitoreo de la concentración del $CO_2$ .   | 58 |
| Figura 3.22. | Obtención del reporte de datos.   | 59 |
| Figura 3.23. | Elección para la ubicación de almacenamiento.   | 59 |
| Figura 3.24. | Diagrama para la elaboración del enclosure y elementos a considerar para el diseño.   | 60 |
| Figura 3.25. | Celda de medición.  | 61 |
| Figura 3.26. | Celda de medición para gases.   | 62 |
| Figura 3.27. | Cara frontal del enclosure, espacio para la pantalla TFT.   | 63 |
| Figura 3.28. | Interior del enclosure con racks para las tarjetas.   | 64 |
| Figura 3.29. | Base para la tarjeta de los sensores.   | 65 |
| Figura 3.30. | Visualización de los elementos internos del enclosure.  | 65 |
| Figura 4.1.  | Presentación de los resultados mediante bloques.  | 67 |
| Figura 4.2.  | Resultados de la manufactura electrónica para los circuitos de acondicionamiento de señal del sensor de $CO_2$ . A) Amplificador B) Ajuste de corriente del calefactor.   | 68 |
| Figura 4.3.  | Gráfica de la respuesta eléctrica experimental del sensor de $CO_2$ que muestra una comparativa entre la operación a temperatura ambiente y la respuesta a $50^\circ C$ . | 69 |
| Figura 4.4.  | Gráfica experimental de la respuesta eléctrica completa para el sensor de $CO_2$ sin muestra, (estabilización, medición y limpieza o regeneración.)                       | 70 |
| Figura 4.5.  | Gráfica experimental de la respuesta del sistema para dos volúmenes   |    |

|  |     |
|--|-----|
| diferentes de $CO_2$ .....   | 71  |
| Figura 4.6. Corrida inicial para un volumen de $3\text{ cm}^3$ .....   | 73  |
| Figura 4.7. Respuesta de dos ciclos de medición con un volumen de $3\text{ cm}^3$ de $CO_2$ . ...  | 73  |
| Figura 4.8. Diagrama de flujo del proceso que muestra los elementos generales del menú principal de comunicación visual en la pantalla táctil de cristal líquido. .... | 74  |
| Figura 4.9. Fotografía que muestra los elementos visuales de la interfaz principal de la nariz electrónica. ....   | 76  |
| Figura 4.10. Seccionamiento del enclosure para impresión 3D. ....  | 78  |
| Figura 4.11. Tapa del enclosure desmontable. ....  | 79  |
| Figura 4.12. Vista del enclosure, antes y después del recubrimiento. ....  | 80  |
| Figura 4.13. Nariz electrónica para el monitoreo de $CO_2$ , humedad y temperatura para la instrumentación de un invernadero vertical. ....                            | 81  |
| Figura A.14. Características del sensor. ....  | 90  |
| Figura A.15. Pinout del sensor .....   | 91  |
| Figura A.16. Información relevante del sensor HMZ 433A1. ....  | 92  |
| Figura A.17. Comportamiento del sensor a temperatura ambiente .....  | 93  |
| Figura A.18. Especificaciones del sensor .....   | 94  |
| Figura A.19. Información general del sensor .....  | 95  |
| Figura A.20. Características más relevantes .....  | 96  |
| Figura A.21. Características eléctricas .....  | 97  |
| Figura B.22. Pantalla principal .....  | 98  |
| Figura B.23. Menú secundario. ....   | 99  |
| Figura B.24. Lectura .....   | 99  |
| Figura B.25. Almacenamiento de datos .....   | 100 |
| Figura B.26. Muestra de las variables de temperatura y humedad, en tiempo real .....   | 100 |
| Figura B.27. Muestra de los archivos CSV para voltajes y humedad-temperatura .....   | 101 |

## LISTA DE TABLAS

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tabla 2.1. | Comparación entre olfato biológico y una nariz electrónica.....   | 29 |
| Tabla 2.2. | Clasificación de sensores químicos de olor.....                   | 30 |
| Tabla 3.1. | Especificaciones operativas del sensor de dióxido de carbono..... | 40 |
| Tabla 3.2. | Tabla de grados de maduración [32]. .....                         | 44 |
| Tabla 3.3. | Datos para la curva de aproximación del termistor.....            | 56 |
| Tabla 4.1. | Tabla de la respuesta del sensor .....                            | 71 |
| Tabla 4.2. | Características específicas del enclosure.....                    | 80 |

## LISTA DE ECUACIONES

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Ecuación 3.1. | Steinhart-Hart .....                                  | 56 |
| Ecuación 3.2. | Para temperatura de 0°C.....                          | 56 |
| Ecuación 3.3. | Para temperatura de 25°C .....                        | 57 |
| Ecuación 3.4. | Para temperatura de 50°C .....                        | 57 |
| Ecuación 3.5. | Ecuación final para cambiar la temperatura a °C ..... | 57 |

## AGRADECIMIENTOS

La culminación de este proyecto representa no solo un logro académico, sino también el resultado del apoyo y la motivación de muchas personas que han estado presentes en este camino.

A mis padres Arturo y María del Pilar:

Gracias por el apoyo que me han ofrecido en estos años y la motivación brindada, por transformar horas de trabajo en la educación de sus hijos. Espero que en un futuro próximo les pueda devolver un poco de lo que nos han dado.

A mi abuelita paterna Aurelia, gracias por cada llamada, me hacía sentir que estaba haciendo las cosas bien y siempre me motivó a continuar con el proceso. A mis hermanos Jared, Karina y Jason, son parte esencial de mi vida y que a su manera demuestran el apoyo.

En este camino también conocí personas nuevas, con las cuales se lograron crear grandes vínculos de amistad. Quiero agradecer a Paco, Eli, Brayan y Edwin por hacer de la maestría algo divertido, por escucharme cuando algo estaba mal, por los consejos y el apoyo que me han dado.

Este logro no sería posible sin el apoyo de los docentes a lo largo de los semestres, pero sobre todo a la guía por parte de mi asesor el Dr. Gerardo, a las observaciones de la Dr. Blanca y la excelente administración y apoyo por parte del coordinador del posgrado, el Dr. Jarquín.

## RESUMEN

La presente tesis aborda el desarrollo de una nariz electrónica destinada al monitoreo de la concentración de  $CO_2$  y el porcentaje de humedad relativa con la finalidad de aplicarlo a un invernadero vertical, con el objetivo de optimizar las condiciones para el crecimiento de especies biológicas vegetales. El propósito principal fue diseñar un sistema electrónico confiable capaz de medir, desplegar y almacenar los datos obtenidos, tomando en cuenta las restricciones de operación propias de un entorno controlado como lo es el invernadero vertical.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque de trascendencia social, monitoreando las variables del sensor de dióxido de carbono y humedad, visualizando la información en una pantalla táctil y ejecutar un sistema de almacenamiento en estado sólido para registrar las mediciones.

Los resultados obtenidos validan la hipótesis planteada, demostrando que es posible integrar un sistema electrónico eficiente para el monitoreo de gases y humedad en este tipo de ambientes. El dispositivo desarrollado no sólo cumple con los requerimientos de precisión y funcionalidad, sino que también facilita la extracción de datos para un análisis posterior, representando un aporte significativo a las tecnologías aplicadas en la agricultura vertical.

**Palabras Clave:** Nariz electrónica, sensor de  $CO_2$ , sensor de humedad, invernadero vertical, enclosure.

## ABSTRACT

This thesis addresses the development of an electronic nose intended for monitoring the concentration of  $CO_2$  and the percentage of relative humidity with the purpose of applying it to a vertical greenhouse, with the aim of optimizing the conditions for the growth of biological plant species. The main purpose was to design a reliable electronic system capable of measuring, displaying and storing the data obtained, taking into account the operating restrictions of a controlled environment such as the vertical greenhouse.

The research was developed under a social significance approach, monitoring the carbon dioxide and humidity sensor variables, displaying the information on a touch screen and running a solid state storage system to record the measurements.

The results obtained validate the proposed hypothesis, demonstrating that it is possible to integrate an efficient electronic system for monitoring gases and humidity in this type of environments. The developed device not only meets the requirements of precision and functionality, but also facilitates the extraction of data for subsequent analysis, representing a significant contribution to the technologies applied in vertical agriculture.

**Keywords:** Electronic nose,  $CO_2$  sensor, humidity sensor, vertical greenhouse, enclosure.

## INTRODUCCIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL CONTENIDO

El monitoreo preciso de variables ambientales, como la concentración de dióxido de carbono y la humedad, es fundamental para optimizar el crecimiento de especies vegetales en invernaderos verticales. Estas estructuras representan una solución sostenible frente a los desafíos actuales de la agricultura, tales como el uso eficiente de los recursos y la capacidad de optimizar la producción en espacios reducidos.

En este contexto, la presente tesis aborda el desarrollo de una nariz electrónica diseñada específicamente para medir y registrar estos parámetros. Este sistema integra tecnología de sensores, diseño electrónico y herramientas de software con el propósito de ofrecer una solución innovadora, precisa y práctica que contribuye al control y mejora de las condiciones de cultivo en entornos controlados.

Con el objetivo de enfrentar este desafío, se han creado espacios acondicionados con las características necesarias para la cosecha de hortalizas y legumbres desde sitios urbanos, donde generalmente es complicado este proceso de siembra. Estos espacios, conocidos como invernaderos verticales [1] y como su nombre lo menciona, hace referencia a la práctica de ubicar un cultivo sobre otro, lo que en resumen reduce la superficie terrestre ocupada, incrementa la producción y mejora la calidad del producto.

En los invernaderos verticales, las especies vegetales pueden experimentar cambios en sus propiedades organolépticas, lo que influye en su proceso de maduración. Dicho proceso está determinado por factores como la temperatura, la humedad y la presencia de gases de maduración, entre ellos el monóxido de carbono, el dióxido de carbono y el etileno.[2]. Para garantizar la calidad del producto final, es fundamental controlar estas variables durante el cultivo. Para fines del proyecto, se hace referencia a aquellas especies que pueden ser cosechadas en un invernadero vertical, tales como las hortalizas y algunas especies vegetales. [3].

El primer capítulo de la presente tesis introduce de manera general la integración de la nariz electrónica (NE) en el monitoreo de la calidad de especies vegetales en invernaderos verticales. En este capítulo, se expone el funcionamiento básico de la NE y se describe su propósito

dentro del contexto del proyecto. El área de interés se centra en la industria alimentaria, en la que se busca monitorear parámetros cruciales, como dióxido de carbono, la humedad y la temperatura dentro de un invernadero vertical, con el objetivo de asegurar la calidad de las especies cultivadas.

La problemática que motivó el desarrollo del prototipo de nariz electrónica se enfoca en las limitaciones y desafíos asociados al monitoreo de la calidad ambiental en los invernaderos verticales tradicionales. En este contexto, se analiza cómo la implementación de esta tecnología puede proporcionar una solución efectiva al facilitar un control más preciso y eficiente de las condiciones ambientales, optimizando así el manejo y rendimiento de estos sistemas agrícolas.

Así mismo, se presenta la hipótesis sobre la cual se fundamenta este estudio, estableciendo el objetivo general y los objetivos específicos que guiaron el desarrollo del proyecto. Estos objetivos fueron esenciales para llevar a cabo un proceso sistemático y bien definido, orientado hacia la integración exitosa de la nariz electrónica en el monitoreo de la calidad de especies vegetales en invernaderos verticales.

# CAPÍTULO 1: FUNDAMENTACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS PRELIMINAR

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, el término agroindustria hace referencia a la evolución de los sectores ganadero, pesquero y agrícola, los cuales se han transformado en una cadena de valor capaz de satisfacer las crecientes demandas de la sociedad.

Un ejemplo destacado de la agroindustria es la cadena hortofrutícola, que abarca la producción de bienes agropecuarios como frutas, vegetales y granos. Estos productos se cultivan idealmente a gran escala para satisfacer tanto la demanda interna como las necesidades de exportación a otros países. Sin embargo, detrás de este proceso subyacen diversos factores que deben ser controlados para lograr este objetivo.

Dependiendo del propósito del proceso, se identifican diferentes tipos de madurez: fisiológica, hortícola o de cosecha, comercial y de consumo. En el presente proyecto, se hará hincapié en la madurez hortícola, la cual se refiere, en términos generales, al momento en que un producto alcanza cualidades cuantitativas y cualitativas que lo hacen apto para su comercialización.

La maduración de estos productos depende de varios factores. Entre ellos se encuentran los cambios físicos, que se reflejan en el color, la textura, el tamaño, entre otros aspectos. Así mismo, existen factores bioquímicos como el aroma, el contenido nutrimental y los inhibidores de la maduración, así como cambios fisiológicos que incluyen el proceso de respiración, la síntesis de nutrientes y la producción de etileno. Es esencial controlar cada una de estas etapas para que la especie vegetal de interés cumpla con las características deseadas por el consumidor.

En el contexto de la instrumentación de un invernadero vertical, esta tecnología permite monitorear los cambios en las concentraciones de gases específicos y la humedad del ambiente. De este modo, el agricultor puede influir en el tiempo de madurez del producto, lo que resulta en una mejor calidad del producto y una mayor rentabilidad económica.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

Es necesario conocer que la actividad económica está conformada por tres secciones; el sector primario (se obtienen materias primas de los recursos naturales), el sector secundario (transformar y procesar las materias) y el sector terciario (actividades relacionadas con los servicios). La agroindustria es un subsector de esta cadena, que entra en el segundo punto y es la encargada de la producción para su posterior comercialización, por ende, la calidad del producto debe ser la más idónea según los requerimientos.

Actualmente se buscan nuevas formas de satisfacer la demanda alimentaria por parte de la población, los productos cosechados en el campo ya no son suficientes para ello. Por lo tanto, se han implementado nuevos medios de producción desde lugares más urbanizados. Una de estas tecnologías recibe el nombre de invernadero vertical y para lograr su fin requiere de instrumentación adecuada a sus necesidades y que el agricultor obtenga los mejores resultados con el producto.

Es en la parte de instrumentación donde las narices electrónicas permiten monitorear los gases que se encuentran en el medio ambiente del invernadero y en el caso de las frutas permite conocer los gases que ellas producen. Pero en el caso de los vegetales el proceso de respiración es diferente, ya que estas especies absorben el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y liberan oxígeno ( $O_2$ ). Es por ello que es necesario monitorear los niveles de  $CO_2$  en el invernadero vertical y de ser necesario inyectar o inhibir la presencia del mismo.

A su vez, depende de la temperatura y humedad, controlando esos puntos se tienen las suficientes variables para lograr un producto de calidad. Aunado a la primera idea, aumentará la rentabilidad de los agricultores y comerciantes al implementar el uso de las NE en el proceso de monitoreo de los invernaderos verticales, ya que repercutirá en la calidad de la hortaliza al mantener controlado el ambiente de enraizamiento.

### **1.3 HIPÓTESIS**

Tomando en cuenta las restricciones de operación de un invernadero vertical, es posible desarrollar un sistema electrónico confiable capaz de medir, desplegar y almacenar los valores de las mediciones de dióxido de carbono y humedad que se presentan durante el proceso de crecimiento de especies vegetales.

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **Objetivo general**

Desarrollar una nariz electrónica con la capacidad para monitorear y desplegar valores de la medición de gases de dióxido de carbono y humedad vinculados con el crecimiento de especies biológicas vegetales en un invernadero vertical.

#### **Objetivos específicos**

- Integrar un sistema electrónico confiable y fácil de operar con la capacidad para medir la concentración de dióxido de carbono y humedad.
- Incorporar en el instrumento anterior las funciones de registro y despliegue de datos, mediante el uso de una interfaz de salida de pantalla táctil y dispositivos de almacenamiento de datos de estado sólido.
- Diseñar y manufacturar el enclosure que permita integrar el sistema completo asegurando que este es mecánicamente confiable y funcional.

### **1.5 INNOVACIONES EN NARICES ELECTRÓNICAS Y SUS APLICACIONES EN EL SECTOR INDUSTRIAL**

A lo largo de los años se ha investigado y desarrollado diferentes equipos que intentan emular los cinco sentidos humanos: vista, gusto, tacto, oído y el olfato. Es este último el de interés para fines del proyecto presentado, dónde se crea una versión de nariz electrónica (NE) para

determinar la concentración de dióxido de carbono, humedad y temperatura en un invernadero vertical.

La nariz electrónica (NE), es capaz de monitorear la concentración de los gases emitidos durante la maduración de las especies biológicas vegetales. Y está conformada por una matriz de sensores [4], donde un único sensor detectará un gas específico y, por lo tanto, al tener una matriz, se pueden colocar tantos sensores como sean necesarios para que pueda detectar una mezcla de gases si así se desea.

Para lograr esto, no sólo se necesitan conocimientos previos en torno a software y hardware, también se requiere información sobre aquellas publicaciones anteriores que han implementado las NE y como lo han hecho en torno a diferentes áreas industriales.

### **1.5.1 Aplicaciones de narices electrónicas en la industria alimentaria**

El uso de las narices electrónicas tiene un campo muy amplio de aplicación, desde la industria alimentaria, la química, medicina, etc. Donde aseguran que con su implementación se podrá mejorar la calidad del producto de interés, la demanda por parte de la sociedad puede ser atendida en mejor escala o incluso puede prevenir accidentes cuando se trata de detección de gases inflamables.

De acuerdo con la investigación realizada por Galeano en 2020, [5] uno de los sectores alimentarios atendidos por esta tecnología es el área frutícola. En este caso, la NE hace una detección de olores, registro de datos y un análisis de los compuestos volátiles mediante una matriz de sensores y con ello crea la llamada "huella digital", que es propia de cada elemento detectado.

A grandes rasgos, el proceso inicia cuando se estimula la NE por compuestos volátiles y dado que se compone por un arreglo de sensores (electroquímicos), la nariz crea la huella digital del alimento y después los datos son analizados por métodos estadísticos y da como resultado el control de calidad, la caracterización y clasificación de la fruta por estado de madurez. Este es un método muy útil para implementarlo en frutas climatéricas, que son aquellas que siguen el proceso de maduración una vez son cosechadas.

Y si bien existen narices electrónicas para evaluar el estado de la fruta, verdura u hortalizas, también están las que analizan el estado del compostaje utilizado en estos procesos de cosecha. Tal como se menciona en el siguiente reporte, *Una nariz electrónica mide la calidad de los abonos orgánicos por el olor* [6], donde se realiza una comparación de los métodos tradicionales como la cromatografía de gases contra la implementación de una NE. En este caso el primer método sólo mide los compuestos de forma individual como, por ejemplo, puede determinar un alcohol, mientras que la nariz electrónica es capaz de abarcar una "familia" de olores y esto se debe a que se conforma por una matriz de sensores.

En *Uso de una nariz electrónica y panel sensorial para la evaluación de la calidad de mora* [7], se presenta y se pone en debate el rendimiento de una nariz electrónica basada en sensores de óxido metálico en la evaluación de aroma derivado de la degradación de la mora. Obteniendo resultados positivos, ya que el uso de la NE permitió determinar la evolución del proceso de degradación de la mora con respecto al tiempo. Y en el caso de los sensores que conformaban el sistema se evaluó y seleccionaron aquellas que tuvieron afinidad por los alcoholes, lo que indica el fenómeno de fermentación. Es por ello que el uso de las narices electrónicas es importante, ya que pueden actuar como monitoreo preventivo y de esa manera, el agricultor tome las medidas necesarias a tiempo y con eso logre un producto de calidad.

Las narices electrónicas son utilizadas en su mayoría como instrumentos para control de calidad por la capacidad de detectar olores según su integración en la matriz de sensores. Pero lo relevante de tener datos es la manera de procesarlos para obtener el mayor beneficio de ellos. No hay una regla definida en el pos-procesamiento de datos obtenidos por este instrumento; sin embargo, en el siguiente artículo *La nariz electrónica, una novedosa herramienta para el control de procesos y calidad en la industria agroalimentaria* [8] se mencionan algunas técnicas idóneas para hacerlo. Una de las más reconocidas es el análisis gráfico (diagrama de barras y diagramas polares), el análisis estadístico multivariado (análisis de componentes principales PCA), el de función por discriminantes DFA y el análisis de clusters CA. No dejando atrás las redes neuronales artificiales y las funciones de base radial RBF, la elección del método a utilizar depende de los datos que se tienen disponibles y el resultado que se requiera. Las narices electrónicas destacan por ser una herramienta de análisis útil para la

caracterización y control de productos en el sector agroindustrial. Algunas de las ventajas que presenta son que debe ser fácil de mover, rápido al momento de hacer la lectura, debe ser confiable y amigable con el usuario .

Pero no sólo existe la implementación de la nariz electrónica de forma individual, sino que puede ser complementada por más elementos. Como se ha explicado anteriormente, la NE emula el sentido del olfato humano y así como existe esta tecnología también hay otras que intentan abarcar los sentidos humanos restantes. Como lo es el caso de la siguiente investigación (A review on combined odor and taste sensor system), en donde se analizan diferentes publicaciones en diversas áreas en las que se ha combinado con éxito la nariz y lengua electrónica [9].

Cuando ingerimos un alimento o una bebida, percibimos el sabor que es el efecto combinado del aroma y el gusto. Este procesamiento paralelo de las señales de una nueva nariz y lengua es posible gracias a la presencia de redes neuronales biológicas grandes y complejas en nuestro cerebro. Los científicos intentan la percepción artificial del olor y el gusto utilizando técnicas similares y se implementa con una serie de sensores y una serie de electrodos conocidos como nariz y lengua electrónicas, respectivamente. La fusión de ambas tecnologías, en varios niveles, proporciona mejores resultados para varias aplicaciones. Este artículo de revisión analiza diferentes técnicas de fusión de la información de la nariz y la lengua electrónicas, así como las aplicaciones del sistema combinado en diferentes campos.

Es el caso de *Electronic Nose, Tongue and Eye: Their Usefulness for the Food Industry* [10], hacen la integración de una nariz, lengua y vista electrónica. En esta investigación se realizó una búsqueda en aproximadamente 86 investigaciones para comprender el funcionamiento de cada una de estas tecnologías, cómo se integran y cómo pueden hacer que trabajen en conjunto y puedan ser utilizadas como un medio de control, calidad y seguridad en la industria cervecera, el vino, frutas, etc.

### **1.5.2 El uso de narices electrónicas en diversos sectores**

Pero el uso de las narices electrónicas no se limita al sector alimenticio, hay diferentes áreas en las que pueden ser utilizadas.

En el área de la salud una investigadora del programa Conacyt, desarrolló olfatos electrónicos para la evaluación de diabetes mellitus mediante el aliento del paciente [11], utilizando sensores a base de polímeros que son sensibles a la acetona, acetoacetato y betahidroxibutirato. Como resultado se dice que cuando una persona padece diabetes mellitus tiene una concentración más alta de lo normal en el aliento de estos indicadores, dichos sensores están integrados en la ya mencionada nariz electrónica.

También se han hecho importantes aplicaciones en el ámbito de la seguridad, existe un modelo que combina el análisis de componentes principales y análisis discriminantes de Fisher [12]. El cual se probó en dos escenarios: discriminando entre dos sustancias explosivas, una no explosiva, explosivos y no explosivos. Obteniendo los mejores resultados en el segundo caso. Para probar la confianza del modelo se utilizó una prueba de permutación, obteniendo una precisión del 67 % con un p-valor  $< 0.01$  para el primer escenario y una precisión del 86.6 % para el segundo. Estos resultados hacen pensar que, mejorando las características del prototipo tanto en hardware como en software, se obtendrían los mejores resultados.

Formando parte de la ingeniería de control y la seguridad, se construyó un sistema de nariz electrónica que consta de una matriz de sensores de gas y una red neuronal para detectar fugas de gas hidrógeno en habitaciones. Aquí se implementa el método proporcional-integral-derivado mejor conocido como PID, que controla el extractor de aire con el fin de eliminar las fugas de gas que detectó la nariz electrónica. Los resultados del experimento mostraron que este sistema podría clasificar varios gases como el gas hidrógeno, el humo de los vehículos y el perfume, con una tasa de éxito del 86.67 % . El control PID se activa cuando se clasifica el gas hidrógeno con concentraciones superiores a 100 ppm, estos resultados pueden minimizar y prevenir las fugas de gas y mantener una buena calidad del aire interior. La investigación completa se puede encontrar en el artículo *Electronic nose based on gas sensor array and neural network for indoor hydrogen gas control system* [13].

El uso de la robótica está ganando gran auge actualmente, tal es el caso de la mejora de un prototipo de robot que detecta los agentes de triperóxido de acetona (TATP) por medio de un sistema de detección nasal electrónico o bien conocido como nariz electrónica, que está equipada con sensores de gas que pretende reemplazar a los perros que son utilizados para

detectar compuestos químicos como, por ejemplo, en los aeropuertos. La mejora en el nuevo diseño se vio reflejada en la estructura más ligera (2 kg), el consumo de energía del controlador, la movilidad y la capacidad de mandar una alerta SMS a una autoridad seleccionada en cierto radio de distancia. Se realizaron pruebas de detección de sustancias en diferentes materiales como plástico, tela y papel, con resultados positivos gracias al uso de sensores de grado médico y una selección más amplia de sensores con la capacidad de detectar diferentes agentes químicos [14] .

En programación gráfica se publicó un artículo que recibe el nombre de *Implementación de un sistema de olfato electrónico para la adquisición de volátiles provenientes de almendras de cacao seco operado mediante el uso de una interfaz gráfica en LabView* [15]. En este caso utilizan una matriz de nueve sensores de gases del fabricante MQ, que tienen la función de percibir los volátiles de almendras de cacao seco. Con la ayuda de una tarjeta de adquisición de datos (Arduino Mega) se realiza la comunicación entre la matriz de sensores y el software desarrollado en LabView. La finalidad de este proyecto es monitorear la calidad del aroma del grano de cacao, para que al momento de ser vendido el producto sea de buena calidad y por ende tendrá mejor retribución monetaria para el agricultor.

Y sin dejar atrás la implementación del internet de las cosas (IoT) en E-nose sensor array optimization based on volatile compound concentration data [16], es un estudio que propone una técnica para optimizar una matriz de sensores, cambiando las señales eléctricas por datos de concentración de compuestos orgánicos volátiles para minimizar el uso de sensores. Dejando un total de cuatro sensores de diez que eran al inicio, utilizando el algoritmo KNN, estos sensores restantes fueron capaces de predecir muestras de plátano con hasta el 80% de precisión y, una vez implementado en la nariz electrónica, alcanzó el 78% .

Otra publicación que intenta respaldar la variedad de aplicaciones que puede tener una nariz electrónica, mediante algoritmos clave, es la mostrada en "Programmable olfactory computing" por [17]. Se propone el uso de Ahromaa una arquitectura heterogénea para la computación olfativa con ciertas restricciones de potencia de energía, y se compara con las arquitecturas de referencia que se obtienen de un microcontrolador (MCU).

Una contribución al medio ambiente es el uso de la nariz electrónica que desarrollaron los científicos del Instituto de Química de la Universidad de São Paulo (IQ-USP) [18], la cual es capaz de identificar y clasificar por medio del olor diferentes tipos de madera y plásticos, así mismo detecta con anterioridad la contaminación de naranjas por hongos. La variable que hace posible esa detección es la variación de la conductividad eléctrica que posteriormente se convierte en una señal digital que es interpretada por un software y en cuestión de segundos identifica el tipo de sustancia volátil que está en contacto con el dispositivo.

## CAPÍTULO 2: NARIZ ELECTRÓNICA PARA MEDIR CO<sub>2</sub> Y HUMEDAD, PARA EL CULTIVO DE ESPECIES BIOLÓGICAS VEGETALES EN UN INVERNADERO VERTICAL

En la actualidad, la creciente demanda en diversos sectores de la sociedad, especialmente en la industria alimentaria, ha generado la necesidad imperante de implementar tecnologías avanzadas que optimicen cada etapa de la producción agrícola. Estas tecnologías deben contribuir de manera significativa a procesos como la producción, la cosecha y el almacenamiento, así como a la mejora general de la calidad de los productos destinados al consumidor final.

En este contexto, uno de los objetivos principales de este trabajo fue proponer el diseño y desarrollo de una nariz electrónica. Como se detalló en los capítulos previos, este dispositivo fue concebido para su implementación en un invernadero vertical destinado al cultivo de diversas especies biológicas vegetales. Este tipo de infraestructura no solo representa una alternativa innovadora frente a los sistemas tradicionales, sino que también ofrece un enfoque sostenible y eficiente para maximizar la productividad agrícola en espacios reducidos.

La necesidad de desarrollar e implementar este dispositivo radica en garantizar que las especies cultivadas crezcan y prosperen bajo un régimen controlado y personalizado, con el propósito de obtener productos de alta calidad. En este sentido, resulta fundamental el monitoreo y control preciso de factores críticos como la concentración de dióxido de carbono y la humedad relativa, ya que estos parámetros tienen un impacto significativo en los procesos de crecimiento y desarrollo de los cultivos. Por lo tanto, la nariz electrónica surge como una solución tecnológica que no solo permite una gestión más eficiente de las condiciones ambientales, sino que también contribuye a satisfacer las exigencias del mercado alimentario contemporáneo.

### **2.1 Las Narices Electrónicas (NE)**

El origen de este moderno dispositivo se remonta a la década de los 60, cuando la empresa Bacharach Inc., especializada en la fabricación de instrumentos para medir el flujo de aire y la detección de gases, desarrolló un dispositivo llamado "Sniffer". Sin embargo, debido a que este solo contaba con un sensor de gas, no fue considerado dentro de la categoría de narices

electrónicas (NE). Fue hasta los años 80 que Krishna Persaud y George Dodd, investigadores de la Universidad de Warwick en Gran Bretaña y del Argonne National Laboratory en Los Ángeles, respectivamente, realizaron la primera publicación relacionada con las NE. Su trabajo abordaba el sistema olfativo biológico y cómo este lleva a cabo el proceso de detección de olores [19]. Inicialmente, utilizaron sensores semiconductores de óxidos metálicos, para luego pasar a sensores basados en polímeros conductores.

Durante ese mismo período, en Asia, Japón comenzó a investigar la frescura de los pescados utilizando matrices MOX (sensores semiconductores de óxido metálico). Fue en los años 80 cuando las investigaciones de Europa, América y Asia convergieron, dando lugar al concepto moderno de la nariz electrónica. Este sistema se define como un *instrumento compuesto por una agrupación de sensores químicos con sensibilidades parcialmente solapadas, junto a un sistema de reconocimiento de patrones, capaz de analizar y reconocer aromas, tanto simples como complejos.*

## **2.2 Las narices electrónicas como un sistema integrado**

En primer lugar, se debe entender que un sistema integrado se refiere a un conjunto de componentes y/o subsistemas que trabajan de manera conjunta, es decir, como una unidad. Están diseñados para realizar una función específica y los conforman una parte de hardware, software y otros recursos que ayudan a realizar la tarea específica.

Hay diferentes tipos de sistemas integrados, pero en el contexto de la ingeniería electrónica puede referirse a circuitos integrados, lo que optimiza el espacio a utilizar. En este contexto se entiende que una nariz electrónica es un sistema integrado diseñada para un objetivo específico dependiendo de la implementación deseada.

Está conformada por un conjunto de componentes, como los sensores, los circuitos electrónicos que la componen, la parte de hardware y software que la hacen manejable para el usuario.

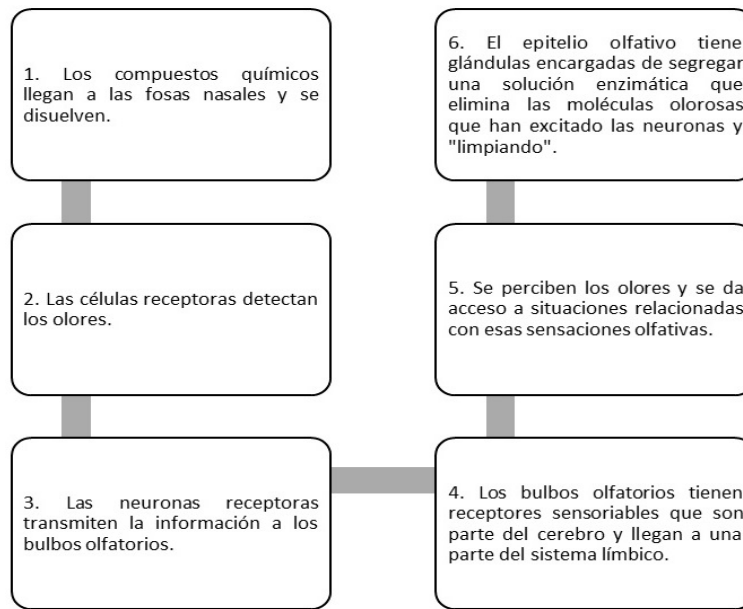
## 2.3 El olfato humano y su funcionamiento

Como parte fundamental del desarrollo de una nariz electrónica (NE), primero es necesario comprender el funcionamiento del sistema olfativo biológico, ya que este modelo inspira el diseño de las NE. A grandes rasgos, el sistema olfativo es responsable de percibir moléculas odoríferas que son transmitidas a través del medio ambiente, y en el caso del ser humano, esos olores aportan información valiosa sobre el entorno.

El sentido del olfato pertenece a los llamados "sentidos químicos", ya que se estimula mediante sustancias químicas presentes en el aire. Esta percepción de las sustancias es lo que se conoce como olores en el contexto del sentido del olfato.

El proceso que lleva a cabo el sistema olfativo comienza cuando las sustancias odoríferas son inhaladas y se disuelven en la secreción acuosa que recubre las terminaciones ciliadas. Posteriormente, estas sustancias entran en contacto con las terminaciones nerviosas especializadas. Cuando las sustancias odoríferas estimulan estas terminaciones, se genera una corriente eléctrica caracterizada por un potencial generador relativamente lento y de larga duración. Sin embargo, cuando los conductos nasales están obstruidos, como ocurre en el caso de un resfriado, esta estimulación no tiene lugar, lo que impide la percepción de los olores.

Este proceso biológico ([Figura 2.1](#)) sirve de base para el diseño de las narices electrónicas, que buscan replicar artificialmente la capacidad de detectar y analizar olores.



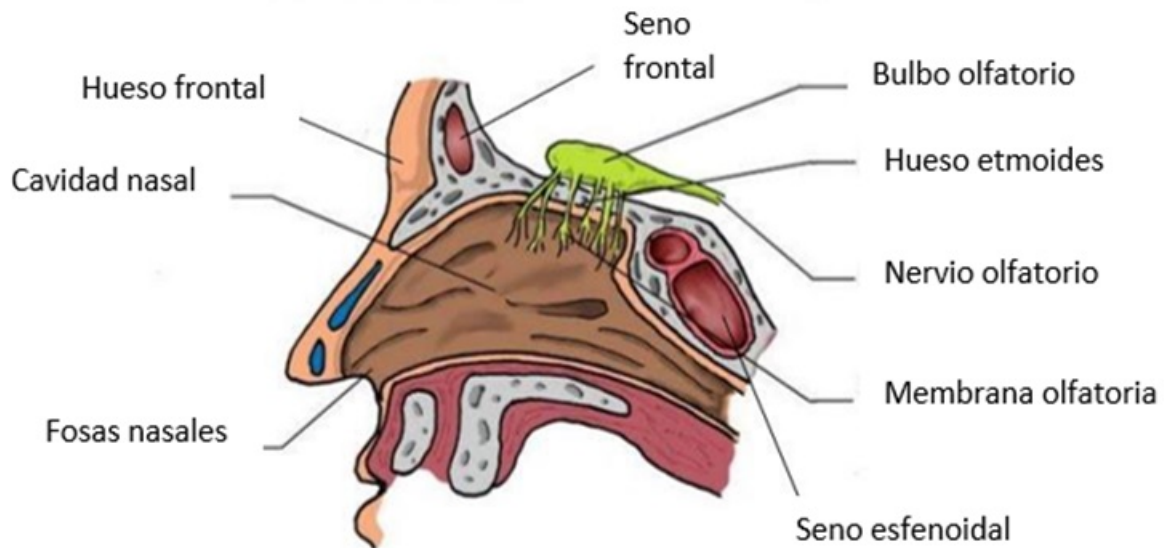
**Figura 2.1: Diagrama sobre el proceso del sistema respiratorio.**

Una vez que comienza el proceso de reconocimiento de olores, los nervios periféricos forman conexiones especializadas que se desarrollan y fortalecen con la experiencia sensorial. Es el bulbo olfativo, una estructura clave en el sistema nervioso, el encargado de procesar, distinguir y clasificar los diferentes estímulos odoríferos que percibe. Este órgano actúa como un centro de control, analizando los patrones de los olores y enviando la información al cerebro para su interpretación.

A nivel biológico, se pueden medir las señales nerviosas y observar cómo el cerebro responde ante los estímulos olfativos. Sin embargo, lo que ocurre a nivel psíquico, es decir, cómo el cerebro traduce estas señales en una experiencia consciente de olor, sigue siendo un misterio en gran parte. Este fenómeno es conocido como la "sensación olfativa", un área de estudio que aún presenta numerosos interrogantes en la neurociencia.

El sentido del olfato en los seres humanos es extremadamente sensible, llegando a ser hasta 10,000 veces más preciso que otros sentidos. Esta alta sensibilidad permite un reconocimiento casi instantáneo de las sustancias odoríferas que se encuentran en el ambiente. El sistema olfativo humano cuenta con millones de células receptoras de olores, estimándose que existen entre 300 y 1,000 tipos diferentes de receptores. Estos receptores permiten al ser humano

identificar una gran diversidad de olores con gran precisión y rapidez. Gracias a esta compleja red de receptores y conexiones nerviosas, el olfato es capaz de detectar incluso pequeñas concentraciones de moléculas odoríferas, haciendo de este sentido uno de los más poderosos en términos de percepción sensorial.



**Figura 2.2: Estructura del aparato respiratorio humano.**

## **2.4 Comparación del sentido del olfato humano y un sistema de olfato artificial**

Una parte importante es saber que la nariz humana se ha utilizado como una herramienta analítica en la industria (como paneles de cara), para evaluar la calidad de productos como bebidas, perfumes, etc. Sin embargo, es un método limitado por la subjetividad porque pueden influir variaciones fisiológicas.

Como se mencionó anteriormente las primeras publicaciones sobre sistemas olfativos artificiales surgió en los 80's y, en base a ello y al desarrollo de nueva tecnología microelectrónica se dio pie a la fabricación de las NE. Las narices electrónicas intentan imitar lo mismo que las biológicas, pero basándose en las matemáticas para describir lo que están identificando. Cuando se aspira un olor-aroma los sensores del sistema olfativo envían señales eléctricas al cerebro y son almacenadas en la memoria entonces, cuando recibe nuevas señales, estas

son comparadas con las anteriores y de esa forma logran identificarlas como se muestra en la [Tabla 2.1](#).

**Tabla 2.1: Comparación entre olfato biológico y una nariz electrónica**

|                       | <i>Sistema olfativo biológico</i> | <i>Nariz electrónica</i>         |
|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| <b>Olor o aroma</b>   | Receptores olfativos              | Matriz de sensores               |
| <b>Señal</b>          | Bulbo olfativo                    | Pre-procesado (microcontrolador) |
| <b>Procesamiento</b>  | Cerebro                           | Computadora                      |
| <b>Identificación</b> | Respuestas del cerebro            | Respuestas de una base de datos  |

## 2.5 Tipos de sensores de gas

Es necesario saber que los sensores son dispositivos electrónicos basados en materiales que cambian alguna de sus propiedades en presencia de las sustancias gaseosas, teniendo en consideración las propiedades fisicoquímicas. Los sensores se pueden clasificar en ópticos, resistivos, electroquímicos, entre otros y los que son utilizados con mayor frecuencia son los resistivos, que tienen la característica de que los compuestos volátiles que se absorben en su superficie provocan un cambio de resistencia eléctrica en el material.

Sin embargo, los de interés para la nariz eléctrica son los sensores físicos con principio óptico ([Tabla 2.2](#)), que se basan en la transmisión y recepción de luz, como lo es el sensor de dióxido de carbono que basa su funcionamiento en la absorción de la radiación infrarroja (IR), el dispositivo cuenta con un emisor y receptor de luz que manda y recibe un haz de luz con la longitud de onda de absorción del  $CO_2$ .

**Tabla 2.2: Clasificación de sensores químicos de olor.**

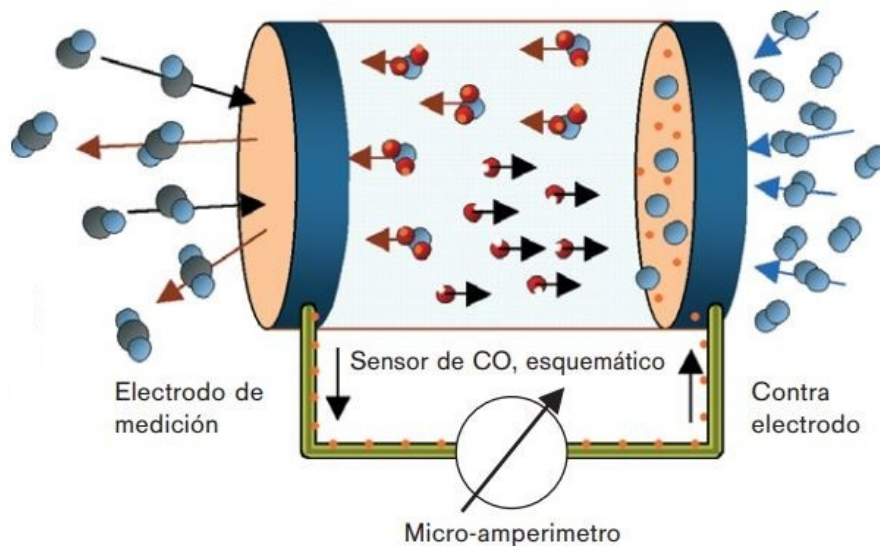
|                  |                            |                                |  |  |
|------------------|----------------------------|--------------------------------|--|--|
| <b>Directos</b>  | <i>Físicos</i>             | <b>Principio</b>               | <b>Medición</b>                            | <b>Tipo de sensor</b>  |
|                  |                            | Conductímetro                  | Conductancia                               | Químico resistivo CP.  |
|                  |                            | Capacitivo                     | Capacitancia                               | Químico capacitivo-Polímero.                                 |
|                  | <i>Químicos</i>            | <b>Principio</b>               | <b>Medición</b>                            | <b>Tipo de sensor</b>  |
|                  |                            | Amperimetría                   | Corriente                                  | Gas tóxico-electrocatalítico.                                |
|                  |                            | Conductímetro                  | Conductancia                               | Químico resistivo-MOS.                                       |
|                  |                            | Potenciométrico                | Voltaje                                    | Químico diodo-diodo Schottky.                                |
| I-V/C-V          | Químico transistor-MOSFET. |                                |  |  |
| <b>Complejos</b> | <i>Físicos</i>             | <b>Principio</b>               | <b>Medición</b>                            | <b>Tipo de sensor</b>  |
|                  |                            | Gravimétrico                   | Piezo eléctrico                            | Químico sensible a masa.                                     |
|                  |                            | Óptico                         | Intensidad/espectro                        | Química de fibra óptica, fluorescencia, quimioluminiscencia. |
|                  | <i>Químicos</i>            | <b>Principio</b>               | <b>Medición</b>                            | <b>Tipo de sensor</b>  |
|                  |                            | Calorimétrico                  | Temperatura                                | Químico térmico-Termisor, termopar.                          |
|                  |                            | Amperimetría<br>Térmico óptico | Corriente, temperatura, intensidad de luz. | Biosensores  |

### 2.5.1 Sensores electroquímicos

En general, en la [Tabla 2.2](#) se exponen los diferentes tipos de sensores, siendo destacables para este proyecto los de tipo electroquímicos. La característica principal es que responden a cambios específicos de alguna propiedad eléctrica, como:

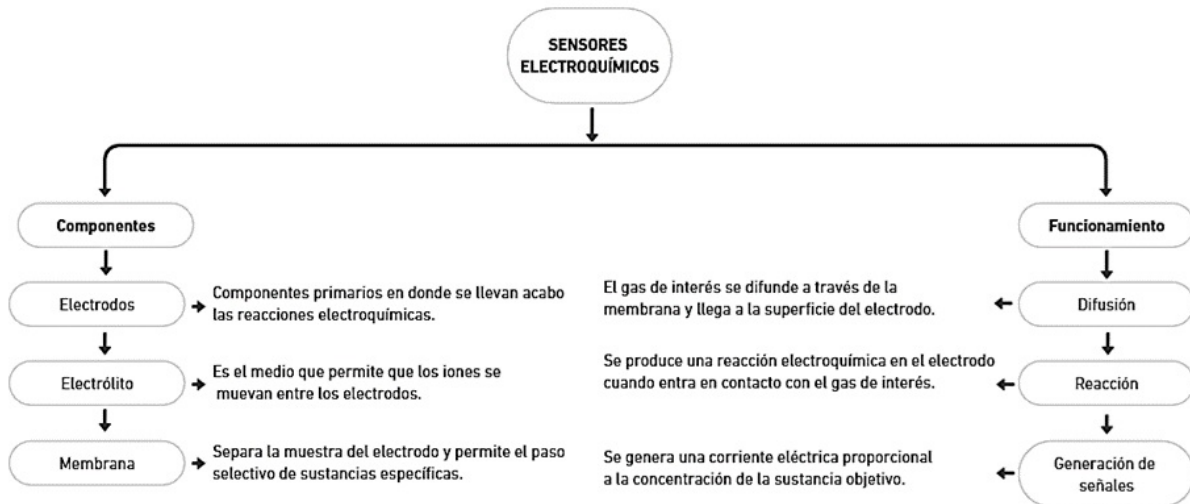
- Corriente eléctrica
- Potencia

En la [Figura 2.3](#) se puede observar de mejor manera como se compone internamente un sensor electroquímico y como es el mecanismo de respuesta.



**Figura 2.3: Estructura interna del sensor electroquímico [20].**

Está conformado por electrodos, uno es el electrodo de trabajo y el contraelectrodo, el contacto eléctrico puede ser por electrolito (medio para transportar iones) o por medio de un circuito de corriente eléctrica externo que transporta los electrones. En la [Figura 2.4](#), se pueden observar los componentes principales de este tipo de sensores, así como el funcionamiento y en que parte se lleva cada proceso al momento de la medición.



**Figura 2.4: Mapa conceptual de los componentes y funcionamiento de los sensores electroquímicos.**

## 2.6 Relación entre el dióxido de carbono y humedad, en la siembra de especies vegetales

En el contexto de los invernaderos verticales, el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y la humedad relativa son variables ambientales clave que influyen directamente en el crecimiento y desarrollo de las especies vegetales. El  $CO_2$  es esencial para la fotosíntesis, el proceso mediante el cual las plantas producen energía. Un nivel adecuado de  $CO_2$  en el ambiente puede acelerar el crecimiento de las plantas, mejorar su rendimiento y, en consecuencia, aumentar la calidad de la cosecha.

Por otro lado, la humedad relativa afecta procesos fisiológicos fundamentales, como la transpiración y la absorción de nutrientes. Un nivel inapropiado de humedad puede provocar estrés en las plantas, favorecer la proliferación de enfermedades o limitar su capacidad de desarrollo. En los invernaderos verticales, donde el espacio reducido y la disposición por niveles intensifican las interacciones ambientales, mantener un equilibrio adecuado de estas variables se vuelve aún más crucial.

La relación entre estas dos variables es compleja, ya que están interconectadas: el aumento del  $CO_2$  puede influir en la apertura de los estomas de las plantas, afectando la transpiración y,

con ello, la humedad en el entorno. Así, un monitoreo constante y un control preciso de estos factores son indispensables para garantizar una cosecha de alta calidad en sistemas agrícolas modernos como los invernaderos verticales.

### **2.6.1 Dióxido de carbono ( $CO_2$ )**

El dióxido de carbono es un gas incoloro e inodoro, químicamente está compuesto por un átomo de carbono y dos de oxígeno unidos mediante enlaces covalentes. Este gas forma parte de la naturaleza porque atrapa el calor y es considerado un gas de efecto invernadero. Surge de la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural, también de incendios forestales o de procesos naturales como lo son las erupciones volcánicas [21].

Sin embargo, desde el punto de vista ambiental las plantas no existirían sin este gas, porque es necesario para el proceso de fotosíntesis (que es el proceso metabólico por el cual las plantas verdes sintetizan las sustancias orgánicas y obtienen energía). Este gas por sí sólo se encuentra en el medio ambiente con concentraciones variadas entre los 300 y 550 ppm, dependiendo de la zona porque no es el mismo nivel en zonas rurales que zonas urbanas.

La manera en que el dióxido de carbono influye en el cultivo es, que al aumentar la concentración de dicho gas en el interior de un invernadero vertical se va a incrementar la actividad fotosintética. En otras palabras, un aumento de la precocidad, rendimiento, producción (entre un 15-25 % ) y la calidad de la cosecha.

La radiación solar es el factor más determinante para asegurar una adecuada asimilación de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) por las plantas, aunque también influyen variables como la ventilación, la temperatura y la humedad.

Para lograr una producción óptima tanto en calidad como en cantidad, las plantas necesitan una concentración de  $CO_2$  en el rango de 700 a 1000 ppm. Sin embargo, los niveles de  $CO_2$  en el ambiente exterior suelen oscilar entre 350 y 380 ppm, mientras que, dentro de un invernadero, sin una ventilación adecuada, esta concentración puede descender a valores inferiores a 100 ppm [22].

Cuando la radiación solar es alta y las demás condiciones son favorables, la actividad fotosin-

tética aumenta significativamente. Sin embargo, si las ventanas del invernadero permanecen cerradas, el  $CO_2$  disponible en el aire del interior puede reducirse por debajo de los niveles del ambiente exterior, lo que eventualmente disminuye e incluso detiene la actividad fotosintética debido a la carencia de este gas. Esto genera pérdidas en la producción y retrasa la cosecha, subrayando la importancia de aplicar  $CO_2$  en los momentos adecuados.

A través del monitoreo del cultivo mediante sensores y equipos de control climático, es posible ajustar la dosificación de  $CO_2$  considerando variables como la radiación solar, la temperatura, la humedad y la velocidad del viento. En algunos casos, incluso se puede suspender la aplicación de  $CO_2$  si las condiciones internas del invernadero no favorecen la apertura de los estomas de las plantas. Esta gestión precisa permite optimizar el crecimiento y desarrollo de los cultivos, garantizando mejores resultados.

## **2.6.2 Humedad y temperatura**

Entre los diversos aspectos que influyen en la producción dentro de un invernadero, el control de las condiciones climáticas es el más relevante. El crecimiento y desarrollo de los cultivos, a lo largo de sus diferentes etapas, dependen directamente de factores ambientales clave, como la temperatura y la humedad relativa [23].

La humedad relativa (% HR) es un parámetro climático crítico a la hora de realizar cualquier cultivo, dependiendo de la especie a cultivar son los rangos de % HR que se deben mantener. Para la mayoría de las plantas se debe establecer un rango del 80 % aproximadamente, ya que en este nivel las tasas de crecimiento son más altas para las plantas comunes en los invernaderos.

Una de las medidas que se pueden tomar para controlar la humedad es la técnica de humidificación. Cuando no se dan las condiciones óptimas dentro del invernadero, hay una reducción en la actividad fotosintética, lo cual afecta el estado de la planta; es decir, el crecimiento y la calidad se ven reflejados cuando alguna de estas variables no es controlada.

La acción que toman las plantas en este proceso de fotosíntesis es la siguiente: durante el día la planta abre sus estomas y con ello se favorece el intercambio de gases y activa la transpiración.

Cuando la humedad relativa es baja dentro del invernadero y por su parte la temperatura es alta, entonces la planta cierra los estomas y se disminuye la acción de generar energía [24].

Para gestionar la humedad y la temperatura en un invernadero, se emplean diversos sistemas de humidificación. Entre ellos se incluyen válvulas de nebulización conectadas a una o más bombas, así como ventiladores equipados con nebulizadores integrados. El objetivo principal es combinar la ventilación y la nebulización para maximizar la evaporación del agua y, de este modo, reducir la temperatura ambiente. El uso de equipos de control climático para regular la temperatura y la humedad asegura que el invernadero mantenga condiciones ambientales óptimas para el desarrollo del cultivo.

### **2.6.3 Influencia del dióxido de carbono en las especies vegetales**

Una vez identificadas las variables que influyen en el proceso de maduración, resulta esencial comprender cómo estas impactan a las especies vegetales involucradas. Las plantas cuentan con estructuras microscópicas llamadas estomas, ubicadas principalmente en las hojas. Estos poros son responsables de regular el intercambio gaseoso con la atmósfera, contribuyen al control de la temperatura de la planta y participan en el manejo del agua que la especie vegetal absorbe para sus funciones vitales.

En este contexto, el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) desempeña un papel crucial. Las células vegetales utilizan este gas, junto con el agua, para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis, mediante el cual producen compuestos orgánicos esenciales para su desarrollo. Por esta razón, mantener un porcentaje de humedad adecuado dentro de un invernadero vertical es fundamental, ya que garantiza un entorno óptimo para que las plantas obtengan la energía necesaria para su crecimiento saludable y sostenido [25].

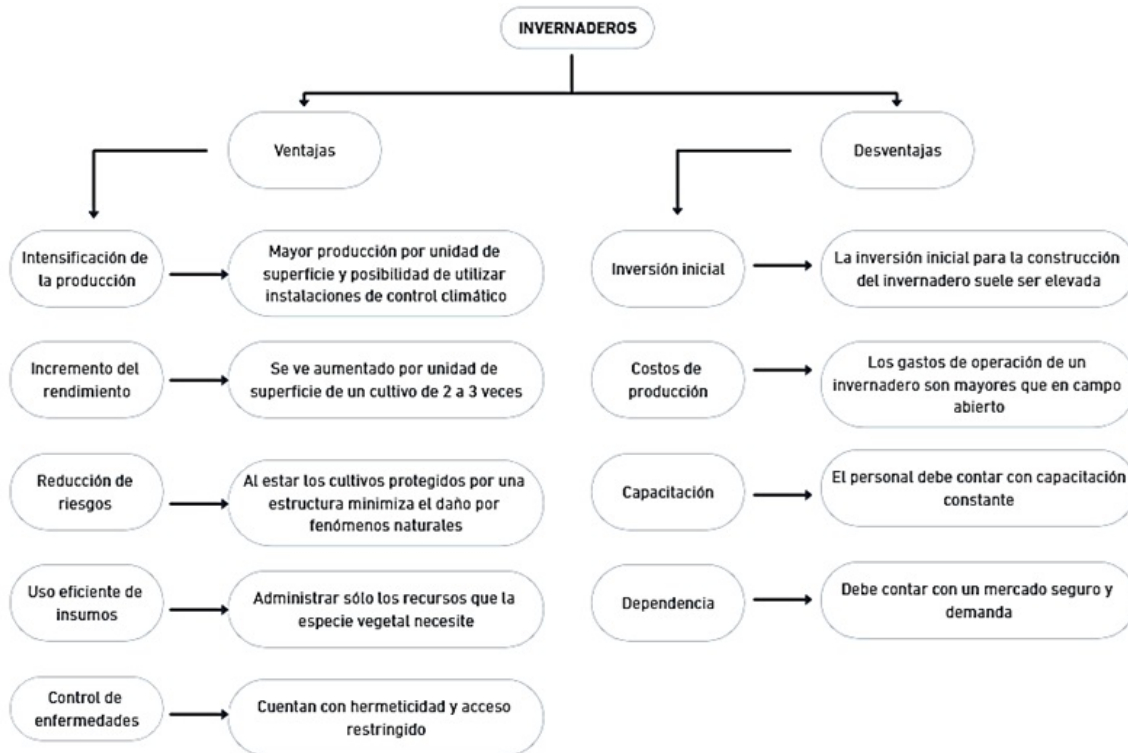
De manera general, se sabe que las plantas absorben dióxido de carbono y liberan oxígeno, lo que podría llevar a pensar que un mayor contenido de  $CO_2$  en el ambiente del invernadero favorece la producción. Sin embargo, esto debe manejarse con cautela. Una concentración excesiva de dióxido de carbono no solo puede interrumpir el proceso de maduración, sino también debilitar los mecanismos de defensa de las plantas, haciéndolas más vulnerables a

plagas y enfermedades. Por tanto, es imprescindible encontrar un equilibrio en la concentración de este gas para maximizar la productividad sin comprometer la salud de las plantas.

## **2.7 Implementación de espacios controlados en el proceso de cosecha**

De acuerdo a la Norma Mexicana para el Diseño y Construcción de Invernaderos (NMX-E-255-CNCP-2008), Invernaderos-Diseño y Construcción-Especificaciones (Greenhouses-Design and Construction-Specifications) [26], un invernadero se define como una construcción agrícola de estructura metálica, usada para el cultivo y/o protección de plantas. Tiene una película plástica translúcida que no permite el paso de lluvia al interior y el objetivo es reproducir o simular las condiciones climáticas adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas en su interior.

Estos espacios permiten que los horticultores obtengan mayor eficiencia en el proceso de cosecha, con la ayuda de tecnología que mejore la producción, calidad y se aproveche la superficie terrestre para la siembra, la producción resultará más rentable. También existe el riesgo de contraer algún tipo de plaga cuando se habla de espacios libres, por ello contar con un espacio en el cual se puedan tener las variables controladas es muy importante para la agroindustria actualmente [27]. En el siguiente [Figura 2.5](#), se muestran algunas de las ventajas y desventajas de la implementación de invernaderos.



**Figura 2.5:** Mapa conceptual de las ventajas y desventajas de la implementación de los invernaderos verticales.

### 2.7.1 Invernaderos verticales

Se estima que actualmente la población mundial sobrepasa los 8000 millones de habitantes y dentro de 25 años superará los 10,000 millones, de los cuales el 75 % vivirá en zonas urbanas. Esto tiene como consecuencia un aumento en los recursos energéticos, alimentarios e hídricos. El sector agrícola específicamente se ve en la necesidad de aumentar la producción, pero manteniendo la sustentabilidad en el proceso.

Es aquí donde nacen los invernaderos verticales o también conocidos como un tipo de agricultura protegida vertical (APV), como una respuesta a la siembra y cosecha, desde espacios urbanos reducidos y con pocos recursos naturales. La tecnología como el internet de las cosas (IoT) y el uso de sensores son muy importantes para mantener el control dentro del invernadero [1].

En términos generales, los invernaderos verticales producen cultivos en ambientes controlados

(niveles de  $CO_2$ , humedad, temperatura, luz, etc.) y justamente los cultivos que están en crecimiento se apilan en capas, formando varios niveles o pisos de altura. La [Figura 2.6](#) es la granja vertical no tripulada más alta del mundo en China [28]; cuenta con 20 pisos y una gran variedad de cultivos que se desarrollan de forma autónoma, es decir, cuenta con un sistema automático de suministro de nutrientes, iluminación artificial y control basado en IA.

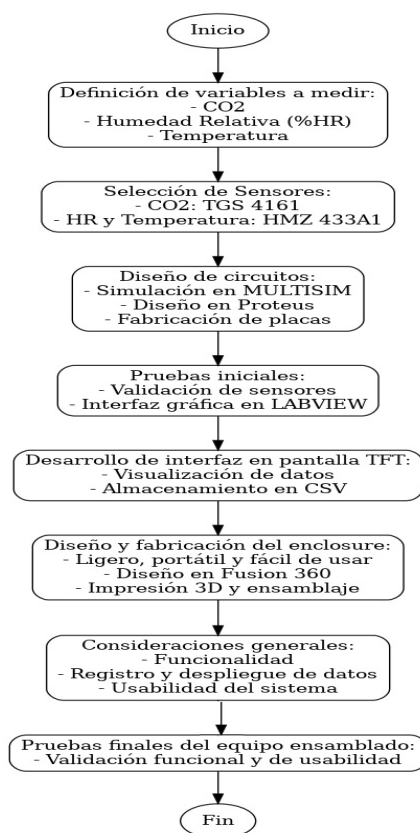


**Figura 2.6: Invernadero vertical en la región de Chengdu, China.**

# CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE UNA NARIZ ELECTRÓNICA, APLICADA A UN INVERNADERO VERTICAL

En este capítulo se describe la metodología para el diseño, implementación y validación de la respuesta experimental de una nariz electrónica destinada al monitoreo de especies biológicas vegetales en un invernadero vertical. Esta tecnología surge como una herramienta clave para optimizar la calidad de las especies vegetales al permitir un análisis continuo y no invasivo de los compuestos volátiles que emiten. El desarrollo de esta metodología integra principios de ingeniería electrónica y química.

Para lograr la integración de la nariz electrónica es necesario visualizar las etapas del proceso e ir describiendo cada una detalladamente. En la [Figura 3.1](#) se presenta un diagrama de flujo de la metodología propuesta y que se utilizó para alcanzar los objetivos de nuestro trabajo. .



**Figura 3.1: Diagrama de flujo general de la metodología para la elaboración de la nariz electrónica.**

### 3.1 Elección de los sensores de acuerdo a las variables de interés

Como se ha establecido en los capítulos anteriores las variables que se requieren monitorear de acuerdo al proceso que llevan las especies vegetales, son: el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y humedad (% HR). Para elegir los sensores, se tomaron en cuenta principalmente parámetros tales como: el rango de medición, la resolución, la sensibilidad, la exactitud, repetibilidad y el tiempo de respuesta.

#### 3.1.1 Sensor TGS4161 para la detección de Dióxido de Carbono

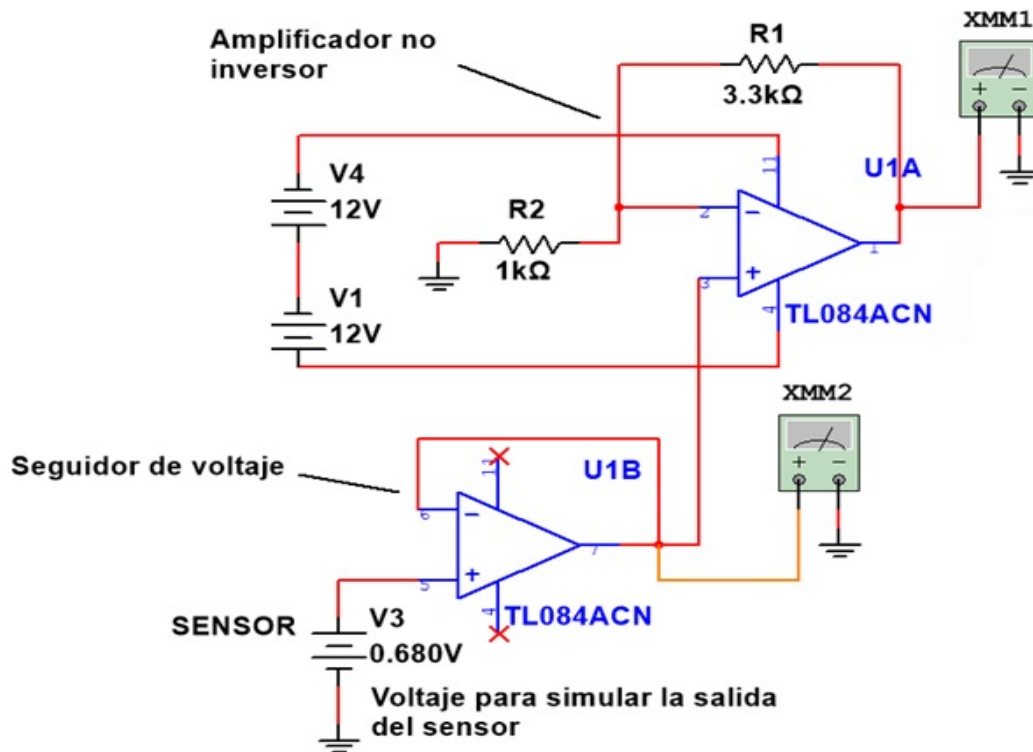
La primera variable a tomar en cuenta es el gas  $CO_2$ , por ende la elección de un sensor de tipo electroquímico es muy importante. El sensor para dióxido de carbono de la serie Figaro [29] de tipo electroquímico, requiere seguir con ciertos lineamientos para que su funcionamiento sea el correcto. Los detalles más específicos del sensor se pueden consultar en el datasheet Anexo A-[Sección ANEXO A](#) y ciertas especificaciones que se muestran en la [Tabla 3.1](#).

**Tabla 3.1: Especificaciones operativas del sensor de dióxido de carbono.**

| Características del sensor TGS4161 |                  |
|------------------------------------|------------------|
| Voltaje del calentador (VH)        | 5.0v +/- 0.2v DC |
| Resistencia del calentador (RH)    | 70+/-7ohms       |
| Corriente del calentador           | Aprox. 50mA      |
| Concentración óptima de detección  | 350-5000 ppm     |
| EMF en 350 ppm de $CO_2$           | 220-490 mV       |

#### 3.1.2 Acondicionamiento de señal de salida del sensor para dióxido de carbono

De acuerdo con las especificaciones del fabricante, el sensor químico resistivo que seleccionamos para nuestro trabajo, requiere de circuitos electrónicos que deben permitir controlar la temperatura de operación del dispositivo y acoplar de manera eficiente su señal de salida. A continuación, en la [Figura 3.2](#) se muestra el circuito esquemático de acondicionamiento de la señal.



**Figura 3.2:** Simulación en Multisim del voltaje de acondicionamiento del sensor de  $CO_2$ .

De acuerdo con la configuración básica de operación, la señal de salida del sensor excursiona de 44 a 72 mV para un rango de 350 a 5000 ppm. Tomando en cuenta los valores anteriores, se diseñó el circuito de la [Figura 3.2](#) para amplificar la señal dentro de un rango seguro de operación compatible con sistemas digitales (0-5 Vcd).

### 3.1.3 Circuito de acondicionamiento para medición y limpieza

Para operar de manera eficiente el sensor de  $CO_2$  (medición y limpieza) se necesita controlar de manera precisa la corriente del calefactor interno del dispositivo. De esta manera, una corriente de aproximadamente 50 mA es necesaria para estabilizar la temperatura en el proceso de medición, mientras que para realizar la limpieza/regeneración del sensor se necesita una corriente de aprox. 62 mA.

En la [Figura 3.3](#) presentamos el esquema del circuito electrónico que se utilizó para controlar

de manera automática el nivel de corriente del calefactor del sensor. En este circuito la resistencia R Calentamiento con un valor de 112 Ohms corresponde a la resistencia interna del calefactor. Se observa también que el circuito cuenta con dos trimpots que ayudan a realizar ajuste fino de la corriente, tanto para la compuerta de 50 mA como la de 62 mA, la segunda hace referencia a la corriente que el sensor necesita para eliminar aquellas impurezas que puedan quedar adheridas en la membrana del sensor.

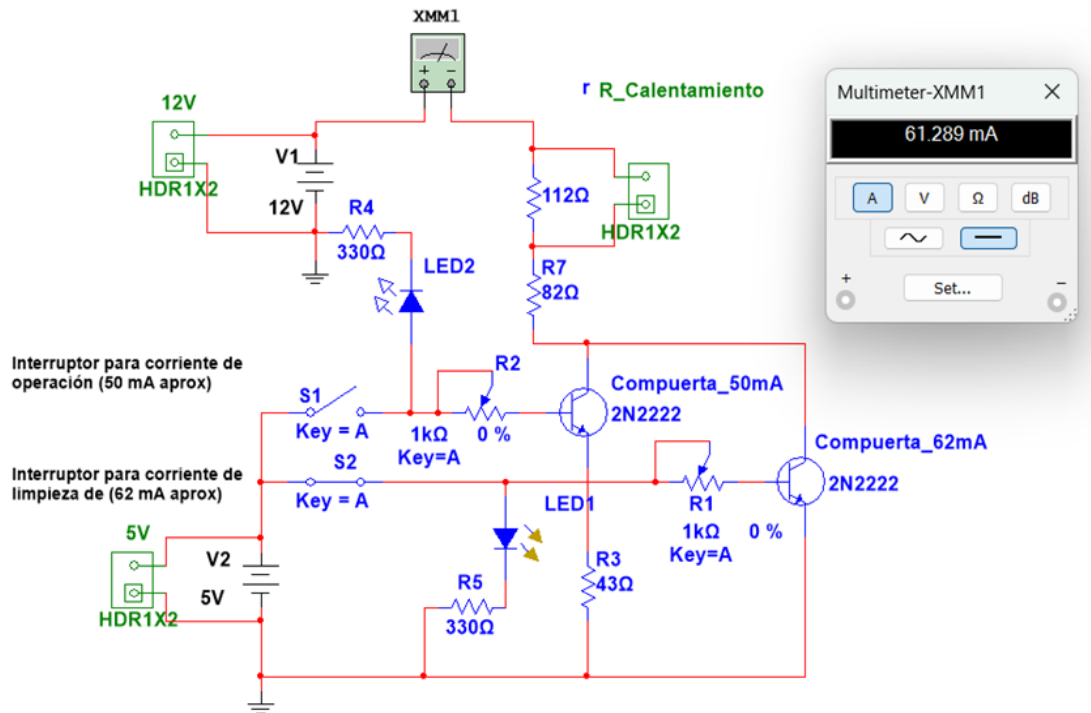


Figura 3.3: Circuito para limpieza y medición del sensor de  $CO_2$ .

### 3.1.4 Identificación del comportamiento del dióxido de carbono por espectrofotometría por Transformada de Fourier (FTIR)

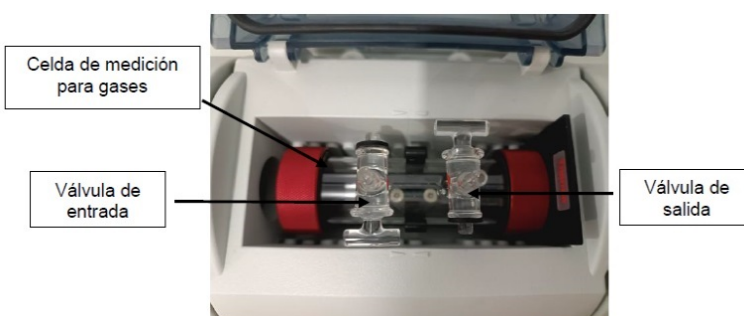
Cabe mencionar que, para justificar el uso del sensor de  $CO_2$ , fue necesario investigar la dinámica del comportamiento de este gas, conocer sus características, tales como: longitud de onda, porcentaje de absorbancia, entre otros. Para esta investigación, se utilizó la técnica FTIR en el espectrofotómetro de transformada de Fourier en el rango de infrarrojos, que se usa para aislar los espectros del gas de interés, es decir, la luz emitida es absorbida en distintos puntos del espectro, dando como resultado la "huella digital" del grupo funcional que interactúa en

ese punto con una longitud de onda específica.

El equipo que se utilizó fue el espectrofotómetro Nicolet IS5 FTIR (Figura 3.4), el cual se puede utilizar para distintos tipos de fases de muestras ya que cuenta con aditamentos necesarios para procesar muestras sólidas o gases. Para fines de este trabajo se estarán procesando gases, para lo cual es necesario colocar la celda de gases (Figura 3.5) y el equipo lo detecta de manera automática. El software en cuestión es denominado OMNIC, el cual es capaz de mostrar el espectro de la muestra de una manera clara y detallada.



**Figura 3.4: Espectrofotómetro Thermo Scientific iS5 [30].**



**Figura 3.5: Celda para gases.**

El equipo anterior tiene un rango de medición que va desde los  $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ , donde se estudian las vibraciones moleculares (Figura 3.6) y de este modo se puede conocer la composición molecular de la mezcla (en este caso, corresponde a una muestra gaseosa).



**Figura 3.6: Gráfica del espectro de absorción de IR para una película de poliestireno, usado para calibrar el equipo.**

Para conocer el comportamiento del gas fue necesario encontrar las bandas de absorción

y longitud de onda específica del dióxido de carbono, para ello se decidió hacer pruebas utilizando plátano roatán (*Musa paraisiaca* var. *Cavendish*), ya que es fácil de adquirir durante todo el año y la maduración puede lograrse en poco tiempo a consideración de otras especies vegetales o frutas [31].

Se adquirió en una etapa de maduración comercial y para todos los casos se ocupó 1 kg de muestra. Para que la muestra fuera uniforme, la elección se basó en la escala de grados de maduración de Von Loesecke [32]. En dicha escala se toman en cuenta características físicas que se observan a simple vista (como el color de la cáscara) y seccionando la fruta en tallo, centro y punta para clasificarlo de mejor manera (Tabla 3.2).

En base a esos parámetros se optó por el grado 4 de maduración correspondiente a un tono más amarillo que verde y es el punto de partida para el procesamiento de muestras.

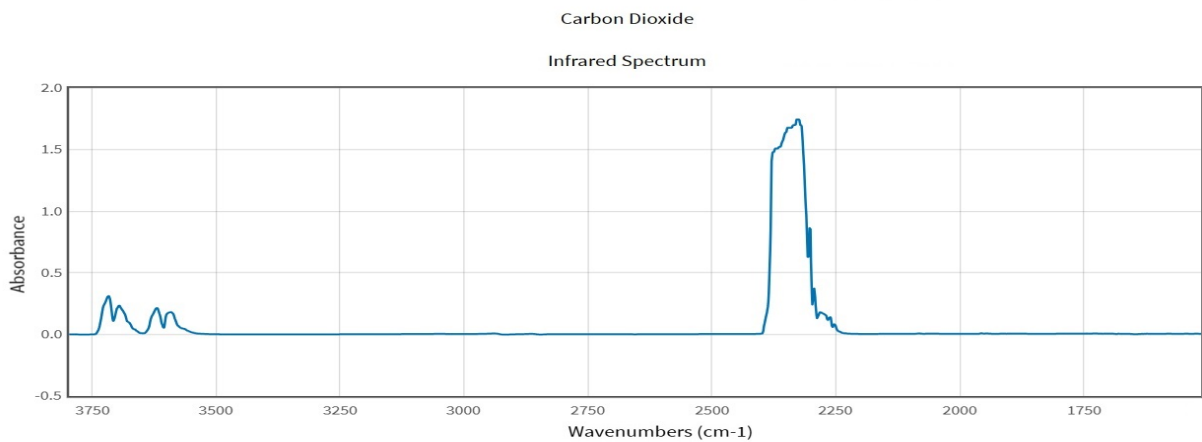
**Tabla 3.2: Tabla de grados de maduración [32].**

| Grado de Maduración | Características            | Imagen  |
|---------------------|----------------------------|---|
| 1                   | Verde                      |  |
| 2                   | Verde claro                |  |
| 3                   | Verde amarillento          |  |
| 4                   | Más amarillento que verde  |  |
| 5                   | Amarillo con puntas verdes |  |
| 6                   | Totalmente amarillo        |  |
| 7                   | Amarillo con puntas cafés  |  |

Para el procesamiento de las muestras fue necesario conocer el software OMNIC. Posteriormente con el equipo ya calibrado, se inyectó la cantidad de gas deseada, para fines de este proyecto se utilizaron volúmenes de 1, 2 y 3  $cm^3$  y el muestreo se realizó cada hora para observar la evolución del gas con respecto al tiempo.

En la [Figura 3.7](#) se puede observar la referencia del espectro infrarrojo del dióxido de carbono, en relación de la longitud de onda ( $cm^{-1}$ ) y el porcentaje de absorbancia.

Se observó que la banda de absorción característica del dióxido de carbono se encuentra en el rango de 2250 a 2400  $cm^{-1}$  con un porcentaje de absorbancia aproximado de 1.5. Por lo tanto, en las pruebas realizadas con el gas emitido por los plátanos, se busca obtener un espectro que se asemeje lo más posible al espectro de referencia.



**Figura 3.7: Gráfica del espectro infrarrojo del dióxido de carbono.**

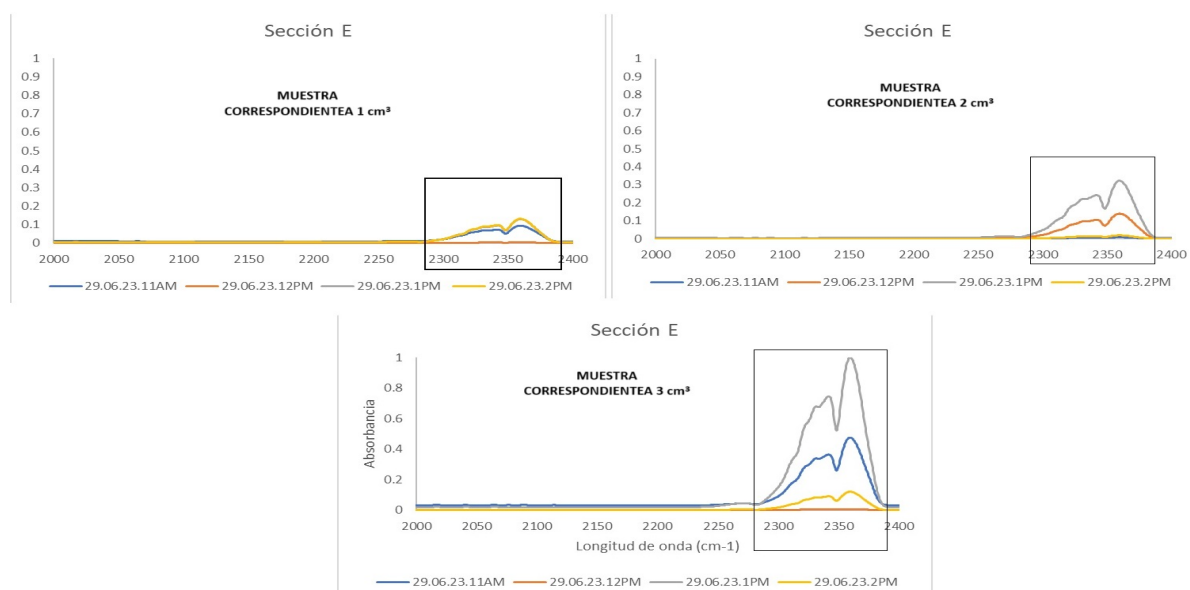
Es importante considerar el nivel de maduración de la fruta, ya que, en este proceso, las concentraciones de gases varían, y otros factores pueden interferir en las mediciones, tales como la temperatura, la humedad relativa del ambiente y la producción de  $CO_2$  y  $CO$ . De manera general, se describe la parte experimental que corresponde a este proceso mediante la [Figura 3.8](#).



**Figura 3.8: Pasos para obtener los espectros experimentales.**

La primera etapa de nuestro procedimiento consistió en verificar que el equipo esté en condiciones óptimas para realizar las pruebas. Para ello, se lleva a cabo una primera corrida sin gas con el propósito de eliminar posibles contaminantes. El espectro obtenido en esta fase se conoce como background. Posteriormente se obtiene el dióxido de carbono mediante la generación de gases de maduración del plátano roatán. La segunda etapa es la extracción de dicho gas, que se realizó utilizando una jeringa comercial con volúmenes conocidos de 1, 2 y 3 cm<sup>3</sup>; luego, el gas se inyecta en la celda de gas del espectrofotómetro. En la tercera etapa, se ejecuta la corrida de la muestra con el software OMNIC, lo que permite obtener un espectro en el cual se observa la banda de absorción del gas de interés, la cual se analizará en los párrafos siguientes. Finalmente, se realiza una purga del equipo inyectando aire puro a la recámara de medición después de cada muestra para eliminar residuos de la muestra anterior y evitar la contaminación.

Se pudo observar la variación que presenta una muestra a diferentes concentraciones, en la [Figura 3.9](#), se tiene un porcentaje de absorbancia de 1.5 mientras que en los obtenidos el máximo es de 1, esta amplitud de la banda de absorbancia se debe a la concentración de ppm de  $CO_2$  y que es proporcional al volumen de la muestra.

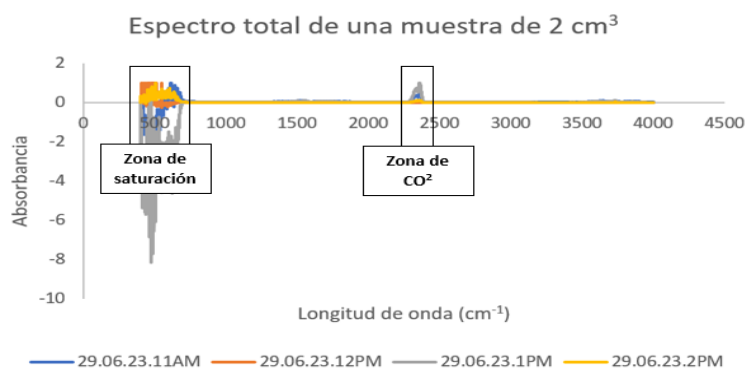


**Figura 3.9:** Gráficas obtenidas de los espectros experimentales a diferentes volúmenes de  $CO_2$ .

La metodología anterior nos sirvió de base para verificar la disponibilidad de  $CO_2$  a partir de una fuente confiable, es decir, una especie biológica.

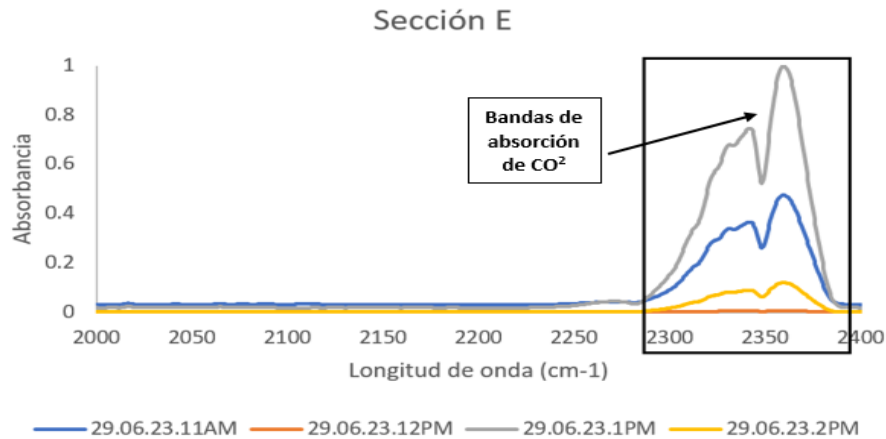
### 3.1.5 Procesamiento de los datos obtenidos por FTIR

Como bien se muestra en las secciones anteriores, los resultados se dan en un rango específico para el espectro infrarrojo medio, sin embargo, de todo el rango de medición, solo algunas secciones presentan bandas de absorción que son de nuestro interés. En la [Figura 3.10](#) se muestra el ejemplo del espectro para un volumen de  $2\text{ cm}^3$ . Tal como se puede observar, el espectro muestra un conjunto de bandas ubicadas en  $500\text{ cm}^{-1}$  en donde no es posible diferenciar la información debido a un efecto de saturación del instrumento.



**Figura 3.10:** Gráfica de ejemplo de un espectro total de una muestra de  $CO_2$  con un volumen de  $2\text{ cm}^3$ .

Para analizar los resultados, los datos se normalizaron y el espectro inicial se seccionó en intervalos de  $400\text{ cm}^{-1}$  con el objetivo de resaltar los detalles y lograr distinguir las diferentes bandas de absorción (ver [Figura 3.11](#)).



**Figura 3.11: Gráfica de ejemplo del seccionamiento del espectro, mostrando la región de  $CO_2$  a diferentes concentraciones.**

Tal como se puede observar en la gráfica anterior, el procedimiento de normalizar los datos permite distinguir claramente las bandas de absorción del dióxido de carbono y resultó de gran ayuda para el análisis de la respuesta de nuestro sistema tal como se verá más adelante.

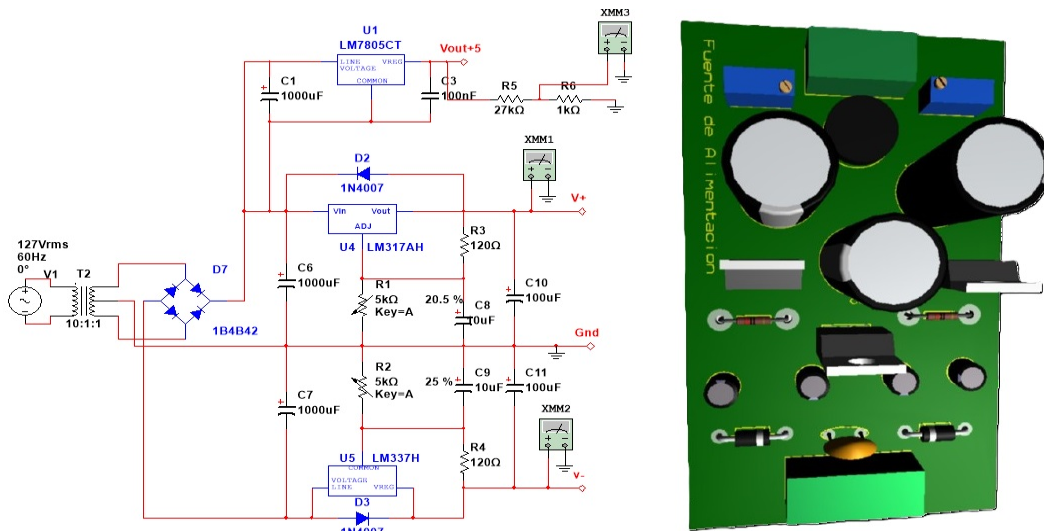
### **3.2 Experimentación y prueba de los componentes electrónicos que integran la nariz electrónica**

En esta sección se muestra el desarrollo y la puesta a prueba de los principales componentes electrónicos que integran nuestro trabajo, con la finalidad de validar el funcionamiento de los circuitos empleados, tales como:

- Circuito acondicionador de la señal de salida del sensor para dióxido de carbono.
- Circuito de medición y limpieza del sensor para dióxido de carbono.
- Circuito electrónico para el acople de los sensores seleccionados (TGS 4161 y HMZ 433A1).
- Prueba y funcionamiento de la fuente de alimentación

Además, se detalla el diseño y la simulación de la fuente de alimentación del sistema, la cual

es un elemento esencial para suministrar la energía a los módulos electrónicos del sistema y la fuente de alimentación se presenta en la [Figura 3.12](#).



**Figura 3.12: Diagrama esquemático y representación 3D de la fuente de alimentación.**

La fuente de alimentación se seleccionó con base a sus características ya conocidas de desempeño, calidad, simplicidad y facilidad de manufactura. Esta fuente suministra corriente continua a los sistemas analógicos de manera estable, así como también a las unidades digitales.

### 3.3 Pruebas y comportamiento del sensor de dióxido de carbono

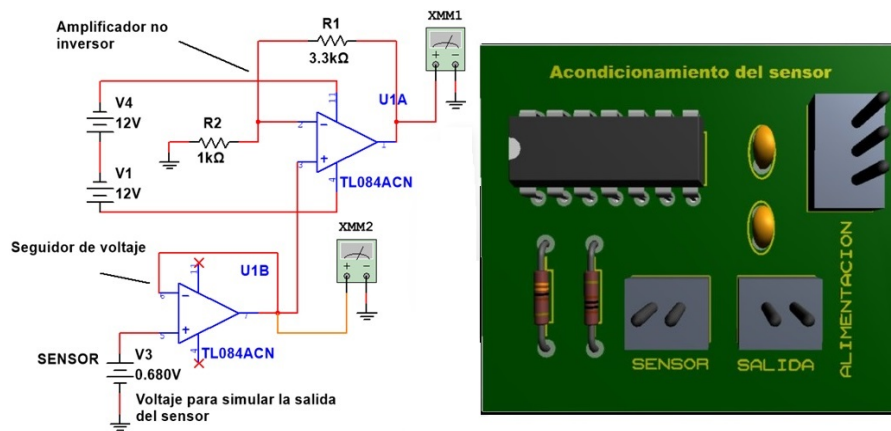
El sensor para determinar la concentración de dióxido de carbono (TGS 4161) es un dispositivo electroquímico de tipo semiconductor. Su funcionamiento se basa en la medición del cambio en la conductividad del material sensible, lo que modifica su resistencia eléctrica interna.

Para iniciar las pruebas experimentales, se utilizó el circuito básico de operación, que incluye un seguidor de voltaje conectado a su salida. Así mismo, fue necesario realizar una serie de procesos adicionales a la señal eléctrica mediante el uso de circuitos analógicos a base de amplificadores operacionales de uso general (circuito integrado TL084).

El circuito integrado TL084 resultó adecuado para esta aplicación, ya que permite integrar tanto el seguidor de voltaje como el amplificador en un solo encapsulado. Además, su bajo

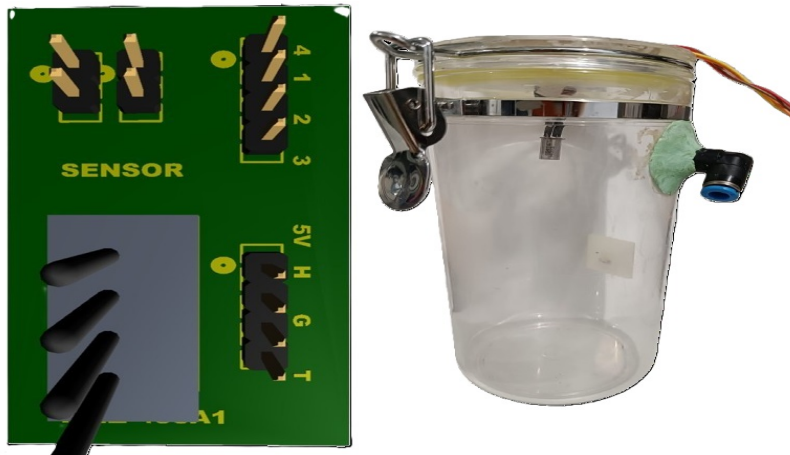
consumo de energía, buena respuesta en frecuencia y amplio rango de ganancia lo hacen ideal para los requisitos del proyecto, los diseños electrónicos están en base a la norma [33].

A continuación, se presenta el circuito de acondicionamiento de señal del sensor, diseñado de acuerdo con los aspectos mencionados previamente (véase la Figura 3.13). Este circuito se simuló mediante una versión estudiantil del software Multisim de la compañía National Instruments mientras que el ensamble electrónico se diseñó mediante el software Proteus Design Suite de la compañía Labcenter Electronics Ltd. versión estudiantil.



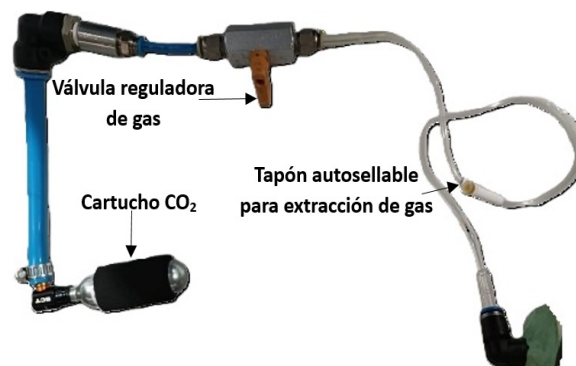
**Figura 3.13: Diagrama esquemático, resultados de la simulación electrónica y vista 3D del circuito de acondicionamiento de señal utilizado para el sensor de  $CO_2$  TGS 4161.**

Ahora bien, con respecto a la estrategia para medir humedad y temperatura se optó por utilizar el sensor HMZ 433A1 de la compañía Ghitron Technology. Esto se debió a que es una unidad robusta y confiable, económica y fácil de instrumentar electrónicamente, ya que cuenta con los circuitos de acondicionamiento de señal necesarios para entregar una señal de salida analógica en voltaje apta para su uso inmediato. En la Figura 3.14 se muestra la vista 3D de la tarjeta de conexiones que se diseñó y manufacturó, así como la recámara de calibración que se utilizó para validar la respuesta de los sensores de  $CO_2$ , humedad y temperatura.



**Figura 3.14:** Vista 3D de la tarjeta de conexiones para los sensores de  $CO_2$  (TGS 4161), humedad y temperatura (HMZ 433A1) y vista real de la recámara de calibración.

Para calibrar los sensores se utilizó  $CO_2$  de un cilindro comercial de la marca Bontrager de 16g. Debido a que la presión de salida del cartucho es elevada y no puede regularse de manera conveniente, se decidió instalar una extensión y una válvula para controlar el flujo de salida (Figura 3.15). El gas fue extraído con una jeringa de inyección y punción con conector Luer e inyectado directamente en el frasco de pruebas. Durante el proceso, se utilizó un voltmetro para monitorear la respuesta del sensor y asegurar que funcionara dentro del rango especificado en la hoja de datos (0-5V).

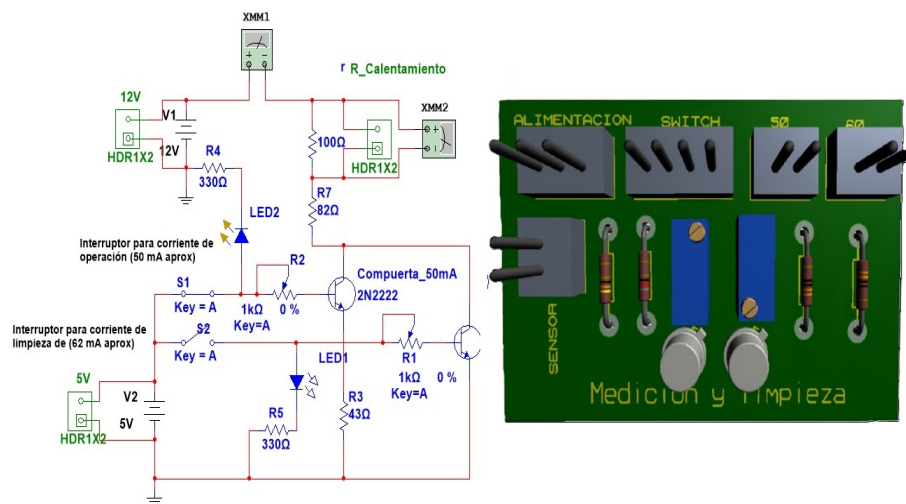


**Figura 3.15:** Conexión reguladora de presión de  $CO_2$ .

Una vez que se verificó el correcto funcionamiento de esa etapa, se procedió a implementar el circuito encargado de la medición y la limpieza del sistema. Este circuito tiene como

función principal suministrar la corriente de medición, establecida en 50 mA, para garantizar la precisión en la toma de datos del sensor. Además, se encarga de proporcionar la corriente de limpieza, la cual es de 60 mA, con el objetivo de mantener el sensor en condiciones óptimas de operación, evitando acumulaciones o interferencias que pudieran afectar su rendimiento. Ambas corrientes son esenciales para el correcto desempeño y mantenimiento del sistema de medición, asegurando su estabilidad a lo largo del tiempo.

El circuito de medición y limpieza se puede observar en la [Figura 3.16](#), donde dichos cambios se ven reflejados mediante el uso de un switch doble. Lo que realiza en un cambio de temperatura, con los 50mA que es la corriente de funcionamiento se alcanza los 50°C para estabilizar el sensor y con la de 60mA hay un aumento de temperatura que ayuda a la limpieza en la superficie del sensor de  $CO_2$ .



**Figura 3.16: Circuito esquemático de control de temperatura para el sensor de  $CO_2$  y vista 3D de su circuito impreso.**

Una vez que se han manufacturado todas las unidades del sistema, será indispensable contar con un visualizador adecuado que permita monitorear el comportamiento del gas, específicamente dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Para cumplir con este propósito en el contexto experimental, se desarrolló una interfaz gráfica utilizando el software LabView, la cual se integró con la tarjeta NI USB-6009 de National Instruments. Esta interfaz permite observar de manera

gráfica la variación del gas a través de cambios de voltaje en tiempo real, proporcionando una representación clara y comprensible de los datos. Además, se ha considerado la interacción del usuario con la interfaz, por lo que se ha incorporado una sección dedicada al registro de datos. Esta funcionalidad permite almacenar los resultados para un análisis posterior más detallado y la posibilidad de generar gráficos que faciliten la interpretación de la información recolectada. En resumen, la interfaz no solo permite la visualización de los datos en tiempo real, sino que también ofrece herramientas útiles para la documentación y análisis de las mediciones obtenidas.



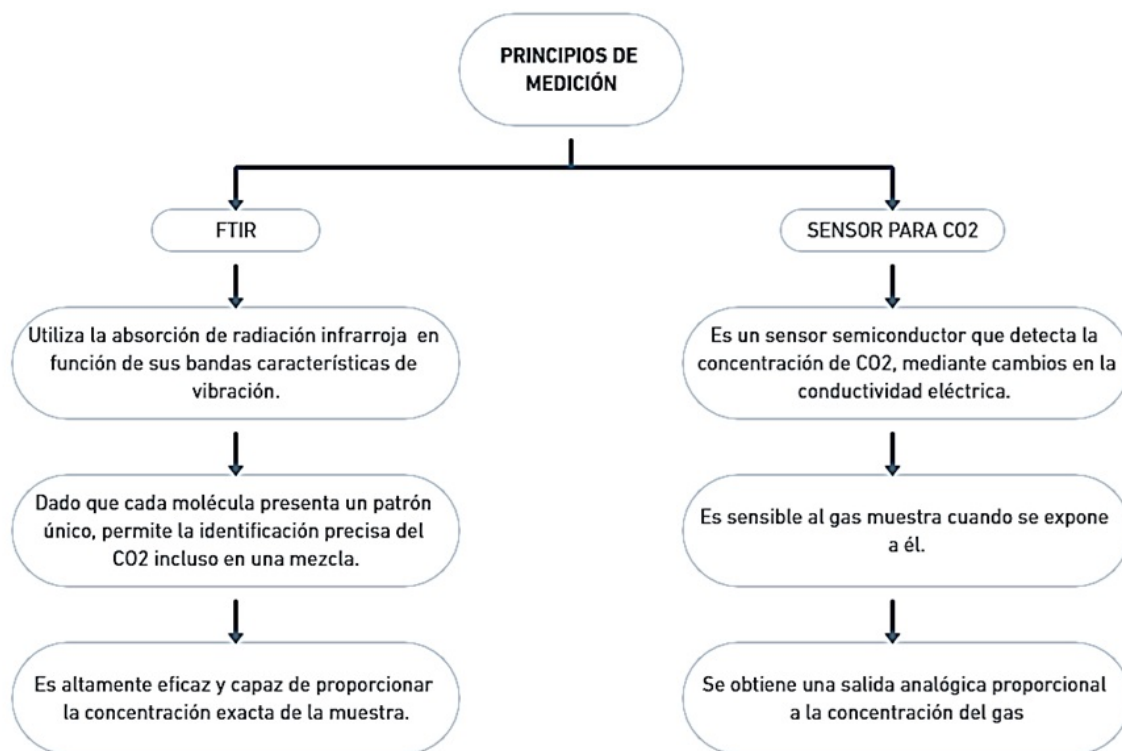
**Figura 3.17: Interfaz gráfica para monitoreo en tiempo real del sensor de  $CO_2$ .**

En la [Figura 3.17](#) se presenta una forma sencilla de visualizar los datos en tiempo real, además de su representación gráfica. La interfaz ofrece la opción de detener la lectura de datos en cualquier momento y permite almacenar en una micro SD el registro de estos mediante el botón "Guardar datos".

### 3.3.1 Relación de los datos obtenidos por espectrofotometría por transformada de Fourier y el sensor para dióxido de carbono

La relación que existe entre un método y otro es que ambos buscan cuantificar la concentración del gas muestra (dióxido de carbono), pero emplean principios de detección y técnicas de análisis distintas como se muestra en el siguiente [Figura 3.18](#). Como se puede observar en

el espectro se puede llegar incluso a identificar el  $CO_2$  en una mezcla de gases y en el caso del uso del sensor seleccionado, es específico para el dióxido de carbono, por lo cual se debe tener cuidado de que no existan contaminantes en la celda de medición y en caso de que haya alguna interferencia, sólo detectará el gas de muestra.



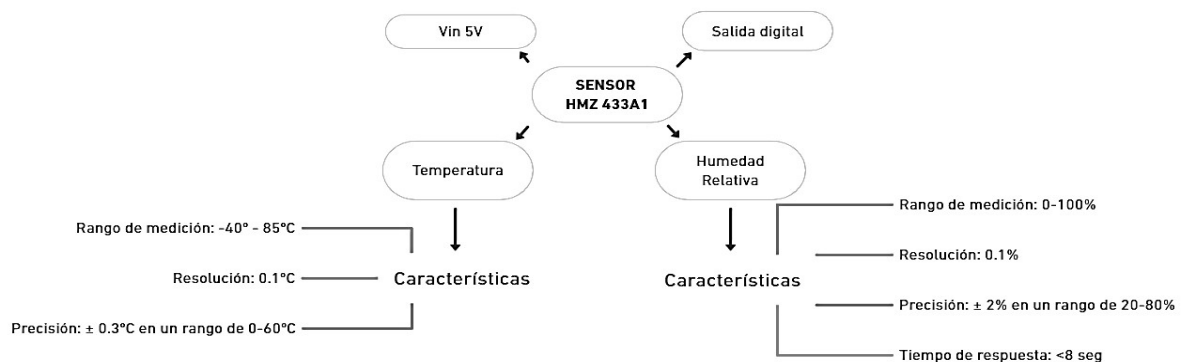
**Figura 3.18: Mapa conceptual sobre las características de los métodos de medición de  $CO_2$  empleados.**

Los datos obtenidos por el método de espectrofotometría por Transformada de Fourier es una referencia necesaria que se utilizó como base para calibrar y validar las mediciones que se generaron con el sensor TGS 4161. Al comparar ambas lecturas a las mismas concentraciones se ajusta la sensibilidad y linealidad del sensor de gas, además en caso de existir interferencias propias de la muestra que se está procesando se verán reflejadas en el espectrofotómetro y de esta manera se tiene mayor cuidado con el proceso de inyección de muestra en el sensor de gas. La ventaja de utilizar un método sobre otro, recae en el medio que se empleará.

### 3.4 Implementación del sensor HMZ 433A1 para monitoreo de humedad y temperatura

La humedad es un fenómeno natural relacionado con la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera. Se distinguen dos tipos de humedad: absoluta y relativa, siendo esta última la que se desea medir en este caso. La humedad relativa se define como la proporción de vapor de agua (usualmente se mide en gramos) en el aire (medida en  $m^3$ ) en comparación con la cantidad necesaria para alcanzar la saturación a una temperatura determinada [34]. A medida que la temperatura del aire aumenta, la cantidad de vapor de agua que este puede contener también se incrementa. La humedad relativa se mide en un rango de 0 a 100 %, dónde el 0 % se refiere al aire totalmente seco y el 100 %, al aire saturado.

La implementación del sensor HMZ 433A1 permite al usuario monitorear esos parámetros y tener un ambiente controlado, donde se garantiza la funcionalidad del sistema electrónico. En la [Figura 3.19](#) se muestran las principales características de este sensor, datos que se pueden observar a más detalle en el datasheet del fabricante [35].



**Figura 3.19: Principales características del sensor HMZ 433A1 para humedad-temperatura.**

Otro de los factores que influye en la lectura del sensor de gas antes mencionado es la temperatura. Las temperaturas extremas pueden afectar la vida del sensor, en el datasheet el fabricante indicará que rango de temperatura es el ideal para el funcionamiento del sensor y

que no dañe la membrana ni los electrodos de trabajo.

El sensor de temperatura está integrado por un termistor de tipo Coeficiente Negativo de Temperatura (NTC), el cual es de los más comunes y disminuye su resistencia conforme la temperatura aumenta. Una de las características de este tipo es que no son lineales, así que para calcular la curva característica del termistor se debe usar la ecuación de Steinhart-Hart [36], la cual se muestra en la (Ecuación 3.1):

**Ecuación 3.1: Steinhart-Hart**

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C (\ln R)^3$$

Dónde:

T = Temperatura en Kelvin

R = Resistencia del termistor en kOhms

A,B,C = Constantes de la curva de aproximación

Para obtener las constantes de la curva, se seleccionan tres puntos que se obtienen de la [Tabla 3.3](#), los datos se encuentran en el datasheet del fabricante y con ellos se resuelve el sistema de ecuaciones.

**Tabla 3.3: Datos para la curva de aproximación del termistor.**

| Temperatura (°C)    | 0   | 10     | 20     | 25 | 30     | 40     | 50     | 60     |
|---------------------|-----|--------|--------|----|--------|--------|--------|--------|
| Resistencia (kOhms) | 160 | 98.714 | 62.328 | 50 | 40.356 | 26.756 | 18.138 | 12.554 |

Los puntos de temperatura son 0°C, 25°C y 50°C, por lo tanto, las ecuaciones son las siguientes:

**Ecuación 3.2: Para temperatura de 0°C**

$$1 + \ln 160.56 + (\ln 160.56)^3 = \frac{1}{0 + 273}$$

**Ecuación 3.3: Para temperatura de 25°C**

$$1 + \ln 50 + (\ln 50)^3 = \frac{1}{25 + 273}$$

**Ecuación 3.4: Para temperatura de 50°C**

$$1 + \ln 18.138 + (\ln 18.138)^3 = \frac{1}{50 + 273}$$

Una vez realizado los cálculos las constantes quedan de la siguiente manera:

A= 0.00237531 B= 0.00024632 C= 0.00000028

Por lo tanto, el despeje final de la ecuación de Steinhart-Hart para obtener los datos en °C es:

**Ecuación 3.5: Ecuación final para cambiar la temperatura a °C**

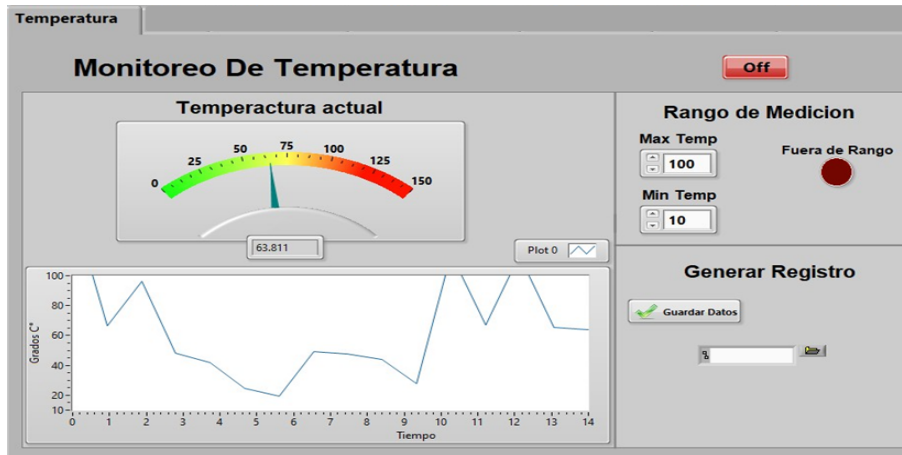
$$TC = \frac{1}{1/0.00237531 + 0.00024632 \ln(R) + 0.00000028 \ln(R)^3} - 273$$

Dicha ecuación será utilizada en el código que se desarrolló en Arduino como parte de la interfaz usuario-máquina, donde se monitorea el cambio de temperatura mediante la pantalla lcd shield arduino 3.5 tft.

### **3.5 Diseño e integración de una interfaz gráfica para observar la respuesta del sensor para CO<sub>2</sub> y para humedad-temperatura HMZ 433A1**

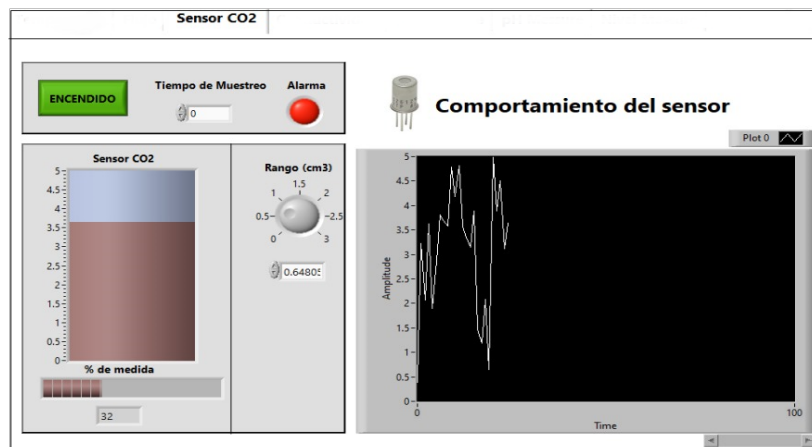
Una de las subfases en la etapa electrónica, es observar las variables de interés desde una interfaz virtual, que permite aproximar los resultados en la integración física de la nariz electrónica. Para lo cual, se realizó una interfaz con la capacidad de observar la medición de temperatura, graficar y obtener un concentrado de datos. En la [Figura 3.20](#), se puede observar la variable de temperatura con un sensor RTD y utilizando el software LabView. Cuenta con

un rango máximo y mínimo de medición, la parte gráfica y una alarma en caso de estar fuera del rango señalado.



**Figura 3.20: Pantalla de inicio para el monitoreo de la temperatura ambiental.**

En la (Figura 3.21), se muestra la interfaz gráfica para el monitoreo del  $CO_2$ . Cuenta con un rango que hace referencia al volumen inyectado en  $cm^3$ , cuenta con la parte gráfica para observar el comportamiento del mismo en tiempo real y una alarma en caso de que exceda el volumen.



**Figura 3.21: Pantalla de inicio para el monitoreo de la concentración del  $CO_2$ .**

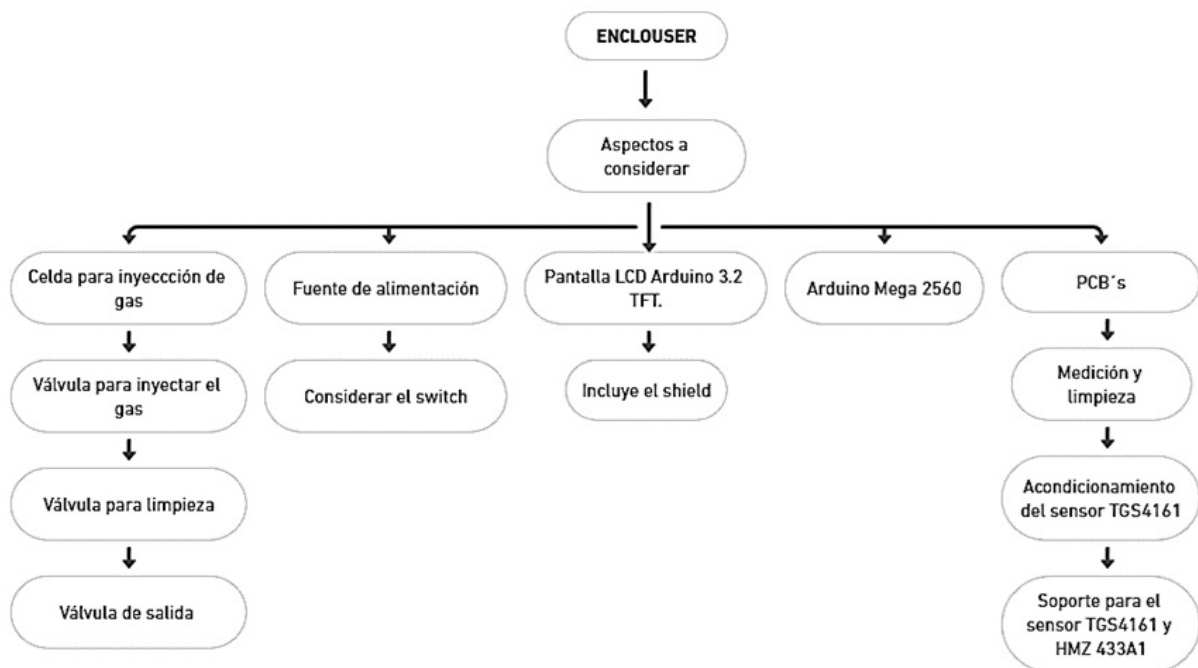
Dado que el objetivo principal radica en los datos obtenidos, con el propósito de realizar una comparación detallada entre la implementación virtual y su contraparte física, resulta



### 3.6 Consideraciones y diseño del enclosure

Una vez que la parte electrónica del sistema esté funcionando de manera óptima, el siguiente paso consiste en diseñar el armazón que alojará todos los componentes necesarios para la integración completa de la nariz electrónica. Este armazón no solo debe cumplir con la función de contener los elementos electrónicos, sino también proporcionar una estructura que garantice la protección, la estabilidad y la funcionalidad del dispositivo en su conjunto.

A continuación, se presenta la [Figura 3.24](#) utilizado para desarrollar el armazón de la nariz electrónica, acompañado de una descripción detallada de los aspectos clave a considerar durante su diseño. Entre estos aspectos se incluyen el tamaño y la disposición de los componentes, el tipo de materiales empleados, la ventilación adecuada para los sensores y el fácil acceso a las partes internas para mantenimiento o ajustes. Además, se deben tener en cuenta las condiciones ambientales en las que operará el dispositivo, lo que podría influir en la selección de materiales y en el diseño general del armazón. La correcta integración de estas consideraciones asegura que la nariz electrónica funcione de manera eficiente y confiable en diversas aplicaciones.

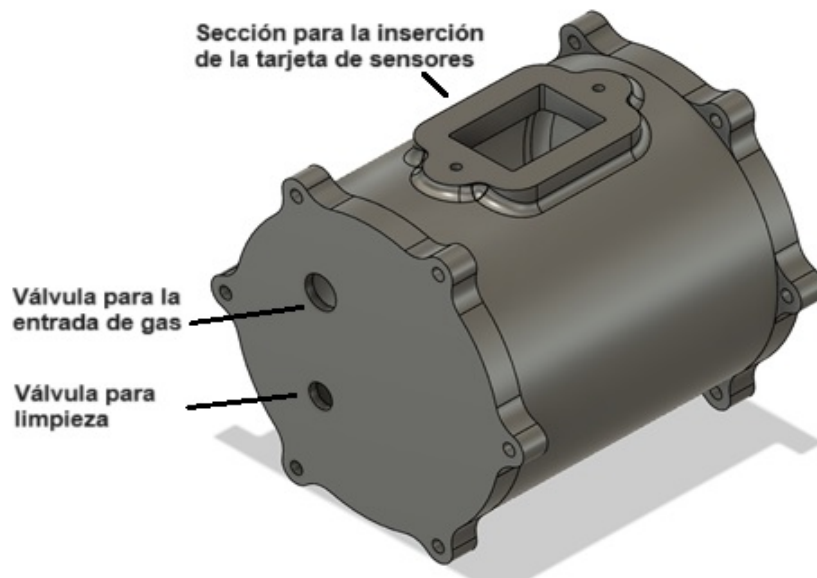


**Figura 3.24: Diagrama para la elaboración del enclosure y elementos a considerar para el diseño.**

### 3.7 Celda de medición

Uno de los aspectos más importantes es la celda donde se inyectará el gas muestra ( $CO_2$ ) que se desea monitorear. La celda debe ser hermética y deberá contener el sensor TGS 4161 para  $CO_2$  y el HMZ 433A1, los cuales están integrados en una sola placa para reducir su tamaño. Se deben considerar dos entradas y una salida: la primera entrada corresponde a la válvula para la inyección de la muestra, la segunda entrada es para la válvula de limpieza, a la cual se conectará una bomba con el fin de hacer circular aire limpio a través de la celda para eliminar los residuos del gas inyectado. La salida será la encargada de mantenerse abierta o cerrada dependiendo de si se desea limpiar o no la celda (Figura 3.26).

Se ha considerado un volumen de  $1000\text{ cm}^3$  y una forma geométrica cilíndrica. La elección de esta forma en lugar de un cubo se debe a que requiere menos material para su construcción, permite una distribución uniforme del gas, y al no tener esquinas, se reducen los puntos de falla.



**Figura 3.25: Celda de medición.**

En la Figura 3.26 se puede observar el ensamblaje final de la celda diseñada para la inyección de gas. Para su construcción, se emplearon varillas roscadas que fueron cuidadosamente

cortadas a la medida, permitiendo la fabricación precisa de los seis tornillos necesarios para su montaje. Las tapas de la celda fueron equipadas con juntas de sellado, cuyo propósito es garantizar una hermeticidad adecuada, evitando cualquier posible escape de gas durante su funcionamiento.

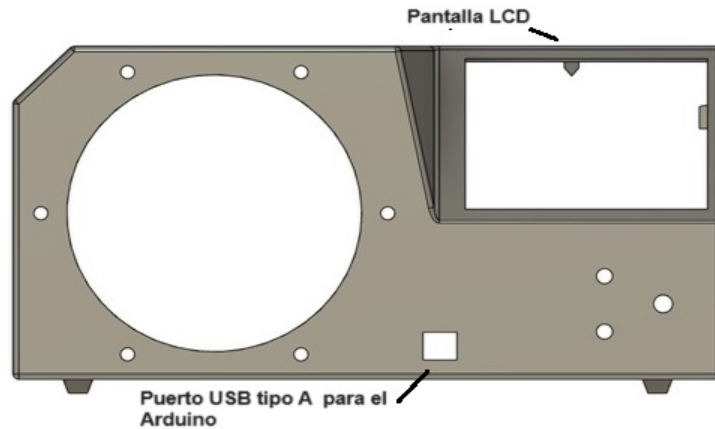
Adicionalmente, en la parte correspondiente al acople para la tarjeta de sensores, se diseñó un sistema removible que permite acoplar y desacoplar dicha tarjeta según sea necesario. Es fundamental realizar esta operación con especial atención, asegurándose de que no se comprometa el sellado hermético y que no se generen fugas en el sistema durante su manipulación.



**Figura 3.26: Celda de medición para gases.**

### **3.8 Pantalla táctil de cristal líquido para la interfaz gráfica**

Otro aspecto importante, además de estético, en este proyecto es el uso de una pantalla TFT táctil, la cual está programada con un menú que permite acceder a los sensores, observar su comportamiento a través de una gráfica y almacenar los datos. Dado que este elemento requiere un módulo Shield y el uso de un Arduino Mega 2560, es fundamental considerar el espacio necesario para estos componentes al diseñar el enclosure ([Figura 3.27](#)).



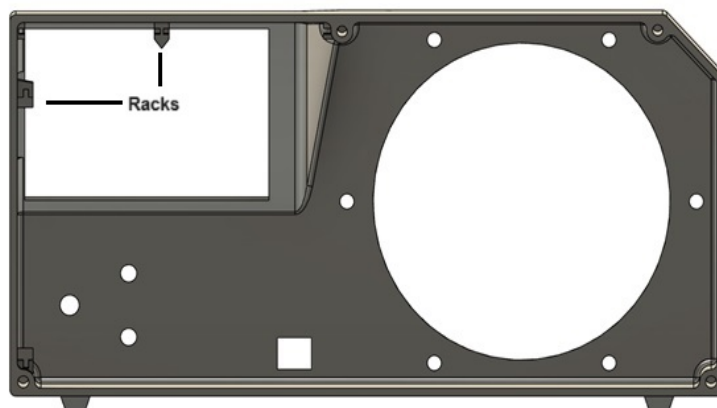
**Figura 3.27: Cara frontal del enclouser, espacio para la pantalla TFT.**

### **3.9 Módulos electrónicos que integran el sistema**

Como se ha indicado previamente, el componente eléctrico del sistema está constituido por una tarjeta electrónica dedicada a las funciones de medición y limpieza, así como por los circuitos de acondicionamiento necesarios para el adecuado funcionamiento del sensor. Este conjunto de tarjetas de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés) ha sido diseñado para garantizar una integración funcional y modular dentro del dispositivo.

El diseño contempla un mecanismo de soporte basado en presión, el cual utiliza *racks* específicos para cada tarjeta. Estos racks están diseñados desde la parte de la simulación de manera que las tarjetas puedan insertarse y retirarse con facilidad, permitiendo un deslizamiento suave y seguro (Figura 3.28). Esta característica facilita enormemente la manipulación de las placas, ya sea para tareas de mantenimiento, ajuste o sustitución, sin comprometer la estabilidad ni la conectividad del sistema eléctrico.

Esta solución no solo optimiza la accesibilidad al componente eléctrico, sino que también contribuye a la durabilidad y confiabilidad del dispositivo en su conjunto, dado que minimiza el riesgo de daño a las tarjetas durante su manejo. Además, el diseño modular del soporte refuerza la versatilidad del sistema, permitiendo futuras modificaciones o actualizaciones en función de las necesidades del usuario.

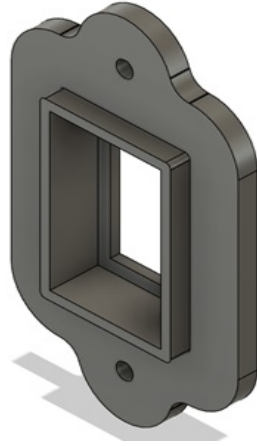


**Figura 3.28: Interior del enclouser con racks para las tarjetas.**

De manera similar, se ha desarrollado un soporte específico para la tarjeta electrónica asociada a los sensores (Figura 3.29), con el propósito de facilitar su correcta integración en la celda de inyección de gas. Este soporte ha sido diseñado para permitir la inserción precisa y segura de la tarjeta, asegurando su alineación adecuada dentro del sistema.

Para garantizar la estanqueidad y prevenir cualquier posible fuga de gas, el soporte incorpora un sello hermético, fabricado a partir de una junta especialmente seleccionada por sus propiedades de resistencia y durabilidad en condiciones de operación. Además, el soporte está diseñado para ser fijado mediante tornillos, proporcionando un anclaje firme y estable que refuerza la seguridad y confiabilidad del ensamblaje.

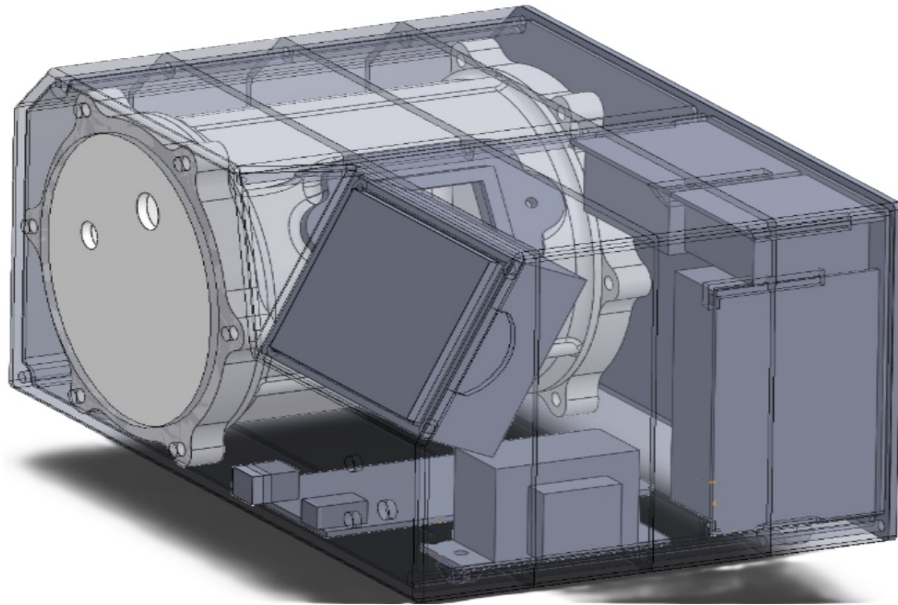
Esta solución técnica no solo asegura el funcionamiento óptimo de los sensores dentro de la celda, sino que también contribuye a la integridad del sistema al evitar la pérdida de gas durante las pruebas o el monitoreo. Adicionalmente, el diseño permite realizar ajustes o reemplazos de la tarjeta de manera eficiente, optimizando los procedimientos de mantenimiento y operación.



**Figura 3.29: Base para la tarjeta de los sensores.**

### **3.10 Enclouser general**

Una vez establecidos los aspectos fundamentales que deben considerarse en el desarrollo del sistema, se procede a la conceptualización y elaboración del diseño final del enclosure [Figura 3.30](#). Este diseño ha sido cuidadosamente desarrollado para cumplir con requisitos específicos, tales como garantizar la funcionalidad del sistema, ofrecer ergonomía en su manejo, facilitar su transporte y proporcionar un almacenamiento seguro y ordenado para los circuitos electrónicos.



**Figura 3.30: Visualización de los elementos internos del enclosure.**

En la parte frontal del enclosure se han integrado tres orificios estratégicos. Uno de ellos está destinado a un interruptor manual, cuya función principal es permitir al usuario alternar entre las dos corrientes que gestionan el circuito, una para la medición y otra para la limpieza. Los otros dos orificios están diseñados para alojar indicadores LED, los cuales informan visualmente cuál de las corrientes está en funcionamiento en un momento dado.

Este enfoque de diseño no solo optimiza el rendimiento del sistema, sino que también facilita el uso intuitivo y el mantenimiento del dispositivo. Se realizó una simulación del enclosure con los elementos físicos electrónicos que estará integrando. Finalmente, podemos señalar que a lo largo de este capítulo se han presentado los detalles metodológicos y experimentales que se utilizaron para desarrollar nuestro trabajo. En el siguiente capítulo se mostrarán los resultados más relevantes relacionados con el material que se ha expuesto hasta el momento.

## CAPÍTULO 4: PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo presentamos los resultados más relevantes que se lograron al aplicar los procedimientos y la metodología expuesta en el capítulo anterior. Se abordan resultados relacionados con el desarrollo de sistemas electrónicos, las aplicaciones de software para gestionar la operación de la nariz electrónica, así como los resultados de la manufactura mecánica e integración de nuestro sistema.



**Figura 4.1: Presentación de los resultados mediante bloques.**

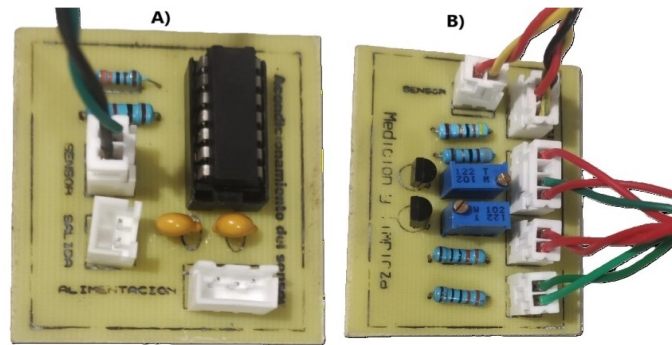
Como se podrá verificar más adelante, los bloques de resultados de la [Figura 4.1](#) abarcan la manufactura de los circuitos electrónicos, el diseño y la manufactura de la celda de medición de la interfaz gráfica mediante la pantalla táctil de cristal líquido añadiendo las funciones necesarias para el registro y despliegue de datos en tiempo real, las restricciones/manufactura del enclosure y, por último, la integración de la nariz electrónica y la interacción con el usuario.

### **4.1 Pruebas y funcionalidad de los circuitos electrónicos para la configuración del sensor de dióxido de carbono**

Los resultados de la implementación del sensor de dióxido de carbono se basan en las restricciones dadas en los apartados [3.1.1](#) a [3.1.4](#) así como en los detalles de los circuitos propuestos que se establecieron en el capítulo anterior. El primero de ellos es aquel circuito electrónico que amplifica el voltaje de salida del sensor de  $CO_2$  que ajusta su temperatura de operación.

Los resultados de la manufactura electrónica se pueden observar en la [Figura 4.2](#), la figura A hace referencia al amplificador de la salida de voltaje del sensor, mientras que el de la derecha (figura B) es el encargado de realizar los cambios mediante un switch de 3 puntos

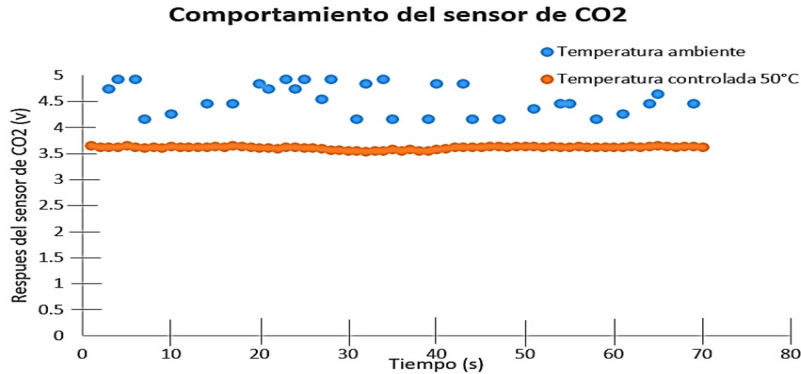
(medición/off/regeneración) .



**Figura 4.2: Resultados de la manufactura electrónica para los circuitos de acondicionamiento de señal del sensor de  $CO_2$ . A) Amplificador B) Ajuste de corriente del calefactor.**

Se requieren dos corrientes de funcionamiento como se señaló en el capítulo 2, la primera es la encargada de estabilizar el sensor y la segunda eliminará aquellos residuos que puedan quedar después de la medición (regeneración). Esto se traduce en aumentar y disminuir la temperatura del calefactor del sensor, para lograr esa configuración fue necesario el uso de dos potenciómetros en valor fijo para cada corriente del circuito que proporciona la temperatura de operación ideal de acuerdo a la fase, se integró un switch de cola de rata (el cual queda en la parte frontal del enclosure) para hacer los cambios de temperatura.

Una vez acondicionado el sensor, se comienza la etapa de pruebas para visualizar la respuesta, en la siguiente [Figura 4.3](#) se observa el comportamiento del sensor durante los dos ciclos de respuesta; el primero se muestra en color azul y es la respuesta del sensor de  $CO_2$  cuando no se controla la temperatura de funcionamiento, es decir, se encuentra a temperatura ambiente. Por lo tanto, se puede observar una respuesta inestable a lo largo del tiempo, llegando incluso a la saturación máxima del sensor y superando los 5V (valor máximo de respuesta con el amplificador de señal). Por otro lado, los puntos naranjas indican el voltaje de salida cuando se aplica la corriente recomendada en la hoja de datos y obteniendo una temperatura controlada a los 50°C, muestra una salida lineal y estable en comparación a la primera respuesta.



**Figura 4.3:** Gráfica de la respuesta eléctrica experimental del sensor de  $CO_2$  que muestra una comparativa entre la operación a temperatura ambiente y la respuesta a 50°C).

La gráfica anterior nos permite afirmar que el sensor ha alcanzado su respuesta estable y que ya se encuentra listo para realizar la medición de dióxido de carbono. Este comportamiento asegura que, en mediciones posteriores, la respuesta del sensor es confiable y nos permite afirmar que los circuitos electrónicos de acondicionamiento trabajan correctamente.

## 4.2 Tiempo de respuesta y sensibilidad del sensor para dióxido de carbono

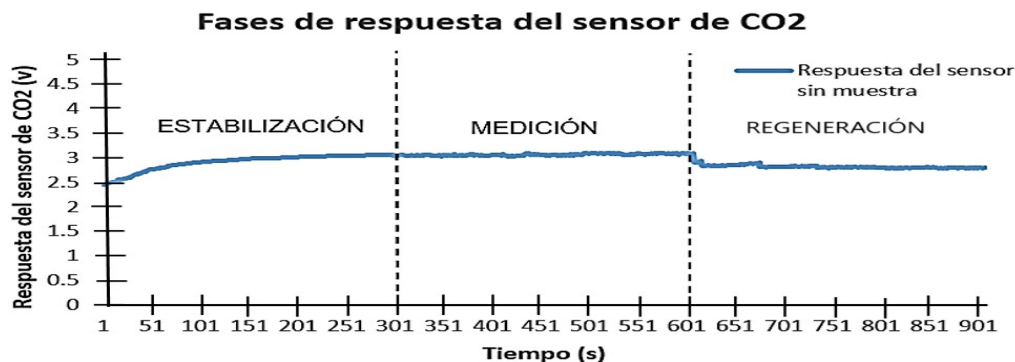
Una vez calibrado el sensor, se procedió a realizar un conjunto de pruebas experimentales con dióxido de carbono a diferentes concentraciones. Estas pruebas son importantes porque nos ayudaron a evaluar el tiempo de respuesta del sensor y permiten determinar cómo es la estabilización del dispositivo, y como ya es sabido, esta información nos sirve como criterio de aceptación de la medición.

Este proceso comprendió tres etapas:

- Tiempo de estabilización
- Periodo de medición
- Fase de regeneración

En la [Figura 4.4](#) se ilustran las fases mencionadas durante una prueba sin gas. Al encender el sensor, este inicia un proceso de equilibrio. Una vez transcurridos aproximadamente 5 min,

cuando no se observan cambios significativos, la gráfica muestra un valor inicial inferior a 2.5V. Esto se debe a la presencia natural de concentraciones de  $CO_2$  en el ambiente, que rondan los 360 ppm. Al alcanzar una temperatura de  $50^\circ C$ , corresponde a la temperatura de operación del sensor, este se estabiliza y su respuesta deja de presentar variaciones.



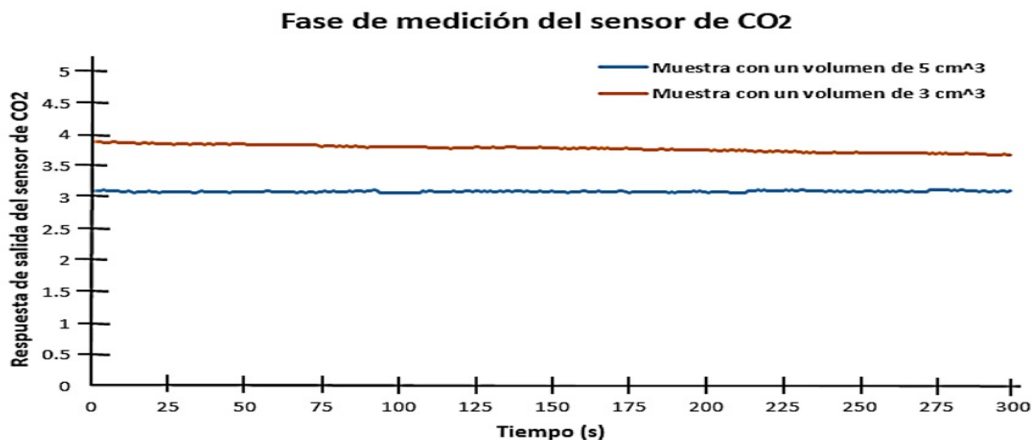
**Figura 4.4: Gráfica experimental de la respuesta eléctrica completa para el sensor de  $CO_2$  sin muestra, (estabilización, medición y limpieza o regeneración.)**

Se realizaron una serie de pruebas durante 3 meses, con lo cual se pudieron establecer las fases al momento del monitoreo según los cambios y el tiempo. La fase de estabilización hace referencia al tiempo que le toma al sensor llegar al equilibrio, en todas las pruebas hay un voltaje inicial que se explicó en el párrafo anterior.

En ese momento y a partir de los 5 minutos se inicia la fase de medición, la cual puede durar tanto como el usuario lo desee (para fines prácticos se tomaron 5 min), considerando que los datos se van almacenando cada segundo. Cuando se quiera interrumpir la lectura, se debe hacer el cambio manualmente desde el switch integrado y es cuando se da pie a la fase de regeneración del sensor de  $CO_2$  (con 5 min es suficiente para regresar al punto de estabilización).

Para tener una idea clara de la respuesta del sensor de  $CO_2$ , se realizaron pruebas con diferentes volúmenes mostrados en la [tab:Características del sensor de dióxido de carbono ??](#), que se explicará más adelante. Siguiendo esas respuestas se observa en la [Figura 4.5](#) la respuesta de salida del sensor de  $CO_2$  sólo en la fase de medición. La primera muestra se graficó en azul y corresponde a un volumen de  $3\text{ cm}^3$  y se observa como la respuesta sobrepasa ligeramente

los 3.0 V mientras que el trazo en naranja corresponde a un volumen de  $5 \text{ cm}^3$  y se estabiliza a un valor aproximado de 3.7 V. Otro aspecto importante de señalar es que el comportamiento de la respuesta es similar en ambos ensayos.



**Figura 4.5:** Gráfica experimental de la respuesta del sistema para dos volúmenes diferentes de  $CO_2$ .

En la [Tabla 4.2](#) se dan los resultados obtenidos para cuatro mediciones experimentales en donde se utilizaron volúmenes de  $CO_2$  de 3 y  $5 \text{ cm}^3$  respectivamente. La respuesta promedio en la siguiente tabla se da en voltaje. Esto nos ayuda a tener una idea clara del comportamiento de nuestros circuitos de acondicionamiento de señal y, como se puede verificar la respuesta dentro de todo el rango de tiempo.

**Tabla 4.1:** Tabla de la respuesta del sensor

| Muestra | Volumen ( $\text{cm}^3$ ) | Equivalencia en ppm | Promedio de respuesta (Vo) |
|---------|---------------------------|---------------------|----------------------------|
| 1       | 3                         | 3000                | 3.0                        |
| 2       |                           |                     | 3.0                        |
| 3       | 5                         | 5000                | 3.7                        |
| 4       |                           |                     | 3.8                        |

Tal como se esperaba, la respuesta del sensor de dióxido de carbono aumenta como función

del volumen de la muestra de gas, es decir, mientras más grande el volumen inyectado, mayor será el voltaje de salida.

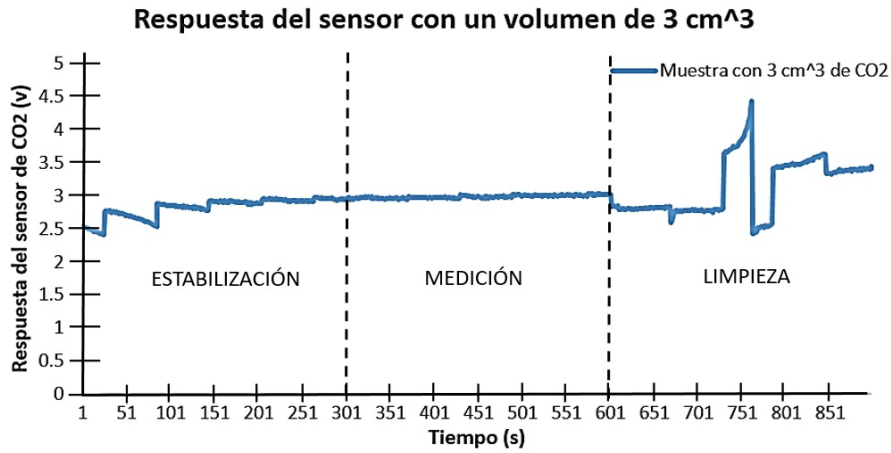
### **4.3 Repetitividad de respuesta**

Un parámetro importante al cual le prestamos atención es la confiabilidad de la respuesta del sensor. Para estudiar este parámetro, se realizaron una serie de pruebas utilizando un volumen de 3 cm<sup>3</sup>, con el objetivo de obtener un conjunto de gráficas que demuestren la repetibilidad de los datos en diferentes días y con diferentes condiciones ambientales. Esto implica que el sensor mantenga un comportamiento consistente en todas las pruebas, mostrando variación únicamente como función de la concentración del gas.

Existen perturbaciones que pueden afectar la respuesta del sensor, pero una de las más notorias es la forma en la que el usuario inyecta la muestra del gas de interés. En principio, el método de inyección consistió en:

- Extraer el directamente de un cilindro comercial mediante el uso de una jeringa.
- Inyectar el gas en la válvula de entrada de la celda de medición.
- Iniciar la captura de datos de la medición.

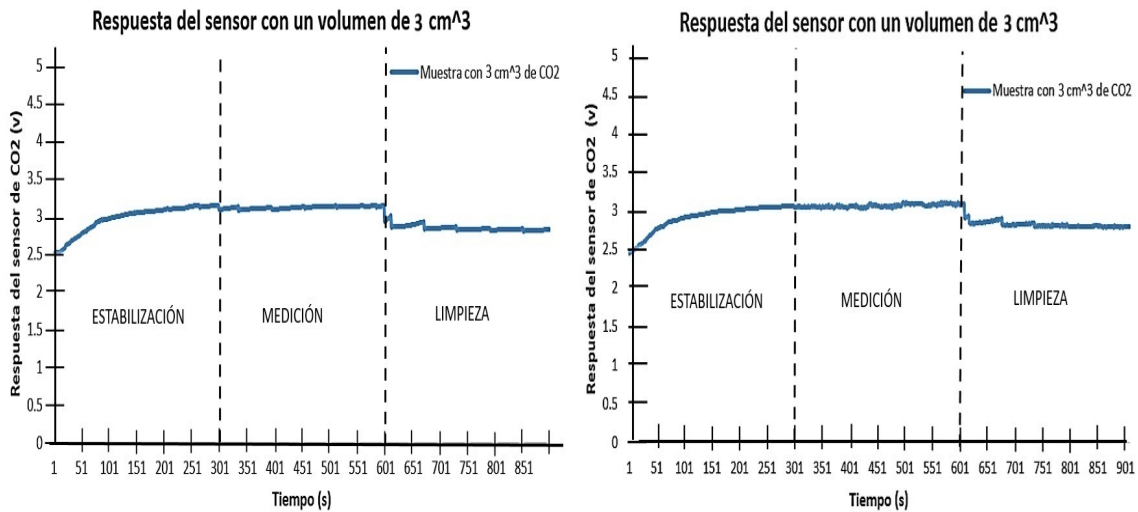
Como consecuencia de que en este método no se tomaron las precauciones necesarias para asegurar la integridad del volumen de la muestra, se observaron una serie de perturbaciones en las primeras mediciones. Las perturbaciones se pueden observar en la [Figura 4.6](#) donde el comportamiento del sensor no es constante, otro aspecto particularmente indeseable es que en la región de la gráfica que corresponde a la limpieza se manifiesta un pico prolongado, este comportamiento se puede asociar con la presencia de impurezas en la superficie activa del sensor.



**Figura 4.6: Corrida inicial para un volumen de  $3\text{ cm}^3$ .**

Para solucionar el problema anterior se utilizó la estrategia mostrada en la [Figura 3.15](#) con el objetivo de evitar fugas de la muestra gaseosa de  $\text{CO}_2$ .

Los resultados obtenidos después de ajustar el sistema se dan en la [Figura 4.7](#). Aquí se puede observar como el comportamiento de las respuestas presentan un patrón similar para el mismo volumen de  $\text{CO}_2$ .



**Figura 4.7: Respuesta de dos ciclos de medición con un volumen de  $3\text{ cm}^3$  de  $\text{CO}_2$ .**

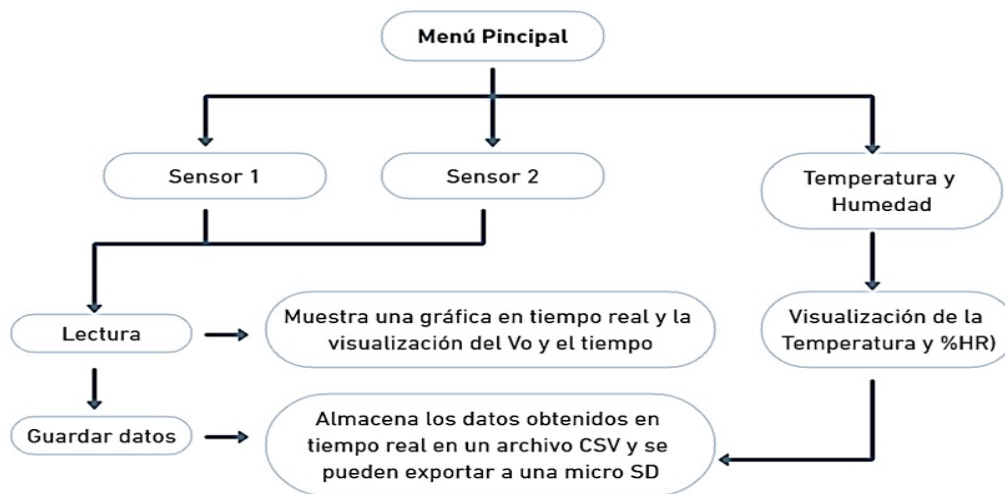
En general, en esta etapa de resultados se logró obtener una respuesta confiable para el sensor de dióxido de carbono, esto con la implementación de los circuitos electrónicos como el

Figura 3.16, sin ese ajuste de temperatura para las fases de estabilización, medición y limpieza el comportamiento sería inestable, es importante señalar que los datos son obtenidos desde la interacción con la interfaz gráfica, es decir, con el menú ya configurado para realizar las lecturas correspondientes.

#### 4.3.1 Demostración del menú de usuario

Con el objetivo de abordar la capacidad que debe tener nuestro sistema para monitorear y desplegar valores de las variables de interés, a continuación procederemos a mostrar un conjunto de resultados relacionados con una interfaz visual basada en el uso de una pantalla táctil de cristal líquido.

Se desarrolló un código escrito en C++ para el entorno de Arduino, con la finalidad de laborar el menú que tendrá contacto directo con la interacción del usuario-equipo, el cual despliega la información mostrada en la Figura 4.8.



**Figura 4.8: Diagrama de flujo del proceso que muestra los elementos generales del menú principal de comunicación visual en la pantalla táctil de cristal líquido.**

El sistema combina una pantalla táctil de cristal líquido, con las variables de salida de los sensores de dióxido de carbono y de humedad-temperatura para pines analógicos. Cuenta con seis funciones principales que hacen posible, la lectura mostrada en gráfica en tiempo real,

el registro y almacenamiento de datos de la misma forma en tiempo real, para visualizar el código completo del Menú véase la [Sección ANEXO C](#).

Las funciones mencionadas son las siguientes:

- LeerHumedad() y leerTemperatura(): Procesa los valores analógicos provenientes del sensor HMZ 433A1.
- DrawButton() y drawBackButton(): Se encarga de dibujar los botones en la pantalla táctil con colores y etiquetas personalizadas.
- DrawMainMenu(),drawSensorMenu(), drawTempHumMenu(): Diseña y muestra las interfaces de usuario, además cada menú está adaptado para seleccionar sensores, muestra y almacena datos.
- DrawGraph() y updateGraph(): Hace posible mostrar los datos del sensor mediante gráficos dinámicos y con la segunda función se hace la actualización de los datos y los desplaza para que se muestren de manera continua.
- Setup(): Inicia la pantalla y la tarjeta SD, además presenta el menú principal.
- Loop(): Hace posible que el usuario pueda interactuar con la pantalla táctil.

Una vista previa del menú cuando ya se ha compilado muestra en el bloque principal los botones que dan acceso a las funciones mostradas en el diagrama anterior, son tres botones para acceder a cada uno de los sensores ([Figura 4.9](#)). Y en cada uno se crearon funciones específicas, como el graficar el comportamiento del sensor de gas para el monitoreo, almacenar los datos en tiempo real hasta que se interrumpa la función, guardarlos en una micro SD con formato CSV compatible con Excel y el monitoreo y registro de la temperatura y humedad. El configurar la pantalla y observar el modo de uso se muestra a detalle en la [Sección ANEXO B](#).



**Figura 4.9: Fotografía que muestra los elementos visuales de la interfaz principal de la nariz electrónica.**

A partir de este resultado, se logró incorporar las funciones de registro y despliegue de datos, logrando obtener una base de datos con respecto a las muestras de dióxido de carbono y el porcentaje de humedad relativa en la celda de medición.

#### **4.4 DISEÑO MECÁNICO**

En el capítulo 3 se menciona que la nariz electrónica se compone de dos partes principales: la celda de medición de gas y el enclosure o carcasa. La celda de medición es un cilindro diseñado para almacenar el gas muestra, y en su interior se encuentran los sensores responsables de captar las características de dicho gas. Estos sensores son los encargados de medir diversos parámetros que permiten analizar la concentración de  $CO_2$  inyectada, la temperatura y humedad.

Por otro lado, el enclosure general agrupa todos los componentes electrónicos necesarios para el funcionamiento de la nariz electrónica, además de incluir la celda de medición. Esta carcasa no solo protege los circuitos y los sensores, sino que también organiza las conexiones de manera eficiente, facilitando su uso y mantenimiento. En conjunto, estas dos partes forman la estructura completa de la nariz electrónica (sin mencionar los aspectos electrónicos ni la pantalla táctil), permitiendo su correcto funcionamiento en distintas aplicaciones.

#### **4.4.1 Restricciones mecánicas para el diseño y manufactura del enclosure**

La siguiente etapa del proceso es la manufactura de las partes que componen la nariz electrónica, para lo cual se utilizó la tecnología de impresión 3D. Las restricciones que se deben tomar en cuenta son:

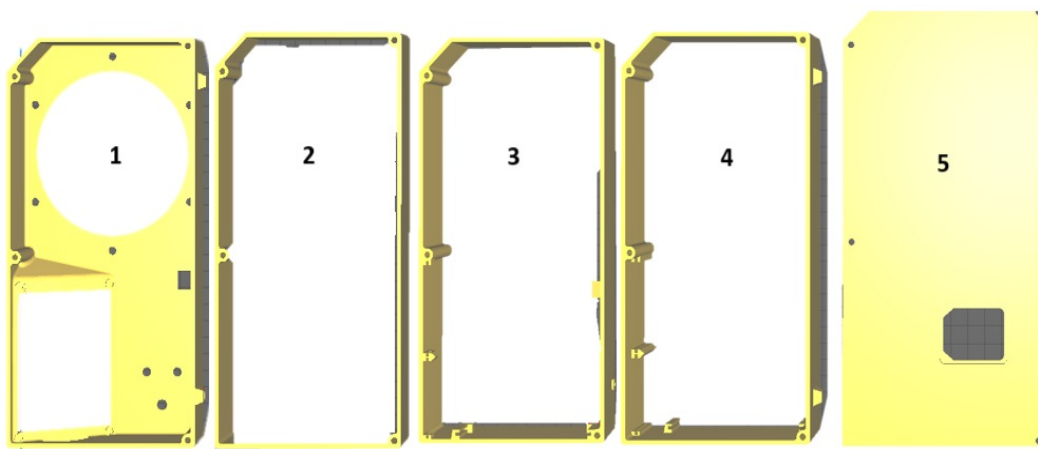
- Fácil de transportar
- Ligera
- Amigable con el usuario
- Integración de los circuitos electrónicos de forma sencilla
- Ensamble sencillo
- Espacio para cada pieza que integra la NE
- Espesor de las piezas adecuado para no fracturarse

El material elegido para esta etapa fue el filamento de Acrilonitrilo Butadieno Estireno, comúnmente conocido como ABS. Este material se seleccionó debido a sus características que lo hacen adecuado para los fines requeridos. El ABS es altamente resistente a los impactos, lo que garantiza la durabilidad de la celda de gas. Además, su baja flexibilidad y escasa absorción de humedad lo convierten en una opción ideal para mantener la integridad del sistema. Para mejorar aún más sus propiedades, se realizó un proceso de impermeabilización, para mejorar el aspecto estético de la celda y tapar aquellos desperfectos de la impresión.

Es importante tener en cuenta que el filamento de ABS es un material termoplástico, lo que significa que puede deformarse cuando se expone a temperaturas muy altas, pero una vez que se enfría lo suficiente, adquiere una gran dureza. Al realizar la impresión 3D, se debe prestar especial atención a la configuración de la temperatura y la velocidad de impresión, ya que estos dos factores deben estar bien equilibrados.

Si la impresión se realiza a una velocidad demasiado alta, el filamento puede no adherirse correctamente a la superficie de trabajo o entre las capas, lo que podría comprometer la

calidad de la pieza. Por otro lado, si la temperatura no es la adecuada, el ABS no se derretirá completamente, lo que puede provocar la aparición de fisuras o fracturas en la pieza final, afectando su integridad y resistencia. Por lo tanto, es esencial ajustar estos parámetros con precisión para garantizar un resultado óptimo en la fabricación de las partes con este material. El enclosure está compuesto por cinco partes principales (Figura 4.10).



**Figura 4.10: Seccionamiento del enclosure para impresión 3D.**

- La primera de ellas es la parte frontal, que corresponde a la caratula de la nariz electrónica. En esta sección se encuentran ubicados los elementos visuales destinados a la interacción con el usuario, proporcionando acceso a la información relevante del sistema.
- Las tres piezas que conforman el cuerpo brindan soporte y estructura al dispositivo.
- La quinta pieza es la tapa que cubre y protege el sistema en su totalidad.

Para el ensamblaje de todas estas partes, se requieren cuatro tornillos, los cuales se fabrican a partir de una varilla roscada, cortada a la medida para asegurar un ajuste adecuado. Este proceso garantizó la integridad estructural del enclosure y facilitó su montaje de manera precisa.

Para facilitar el proceso de apertura y cierre del equipo, se decidió incorporar imanes de neodimio en la tapa del equipo, que hará contacto directo con los tornillos de la cuarta pieza,

por lo cual no es necesario agregar imanes en esa parte (Figura 4.11). Esta solución permitió un ensamblaje rápido y seguro, brindando comodidad al usuario al manipular el dispositivo sin necesidad de herramientas adicionales.



**Figura 4.11: Tapa del enclosure desmontable.**

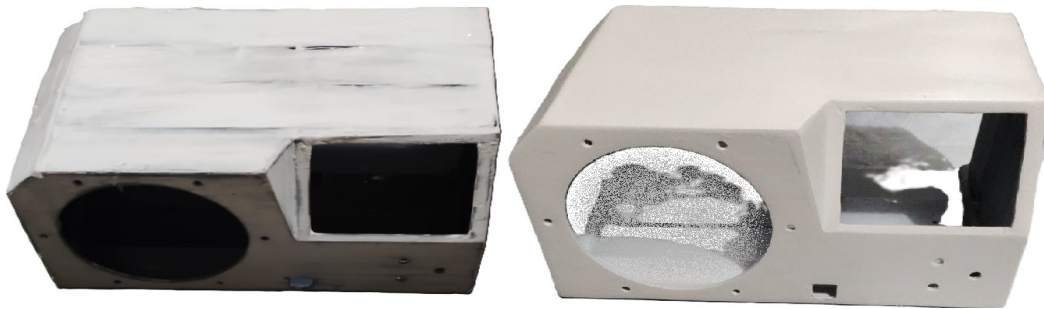
Además, se tomó en cuenta la ubicación estratégica de ciertos componentes importantes. En la tapa, se reservó el espacio necesario para integrar el interruptor de encendido/apagado (switch ON/OFF) de la nariz electrónica, así como para la válvula de salida de la celda de gas. Estos elementos fueron colocados de manera que se optimice tanto el acceso como la funcionalidad del equipo, sin comprometer su diseño ni el sellado.

Para la impresión de las piezas, se utilizó filamento PLA (ácido poliláctico), seleccionado por sus características ideales para los objetivos de este proyecto. El PLA, además de ser un material fácil de imprimir, ofrece la resistencia y estabilidad necesarias para garantizar la durabilidad del dispositivo.

Sin embargo, debido a que cada impresora 3D tiene ajustes propios y puede variar en su rendimiento, es posible que algunas impresiones no resulten perfectamente uniformes o con la calidad deseada. Para corregir estas imperfecciones y mejorar la estética de las piezas impresas, se les aplicó un tratamiento adicional. En este caso, se optó por aplicar un recubrimiento. Este material actúa como imprimación, proporcionando un acabado liso y uniforme a las piezas, mejorando no solo su apariencia, sino también su funcionalidad al eliminar irregularidades que podrían afectar el ensamblaje del equipo.

En la siguiente Figura 4.12 se puede observar el antes y después de realizar el tratamiento al

equipo y notar el acabado del equipo ya ensamblado, quitando las irregularidades y obteniendo una superficie más lisa.



**Figura 4.12: Vista del enclosure, antes y después del recubrimiento.**

A partir de estos resultados, es evidente que es necesario considerar todas las restricciones iniciales, porque ellas nos permiten ajustar el diseño mecánico del sistema, tomando en cuenta tanto aspectos mecánicos como estéticos. Pero, sobre todo permitiendo que el usuario al interactuar con el equipo lo haga de manera intuitiva.

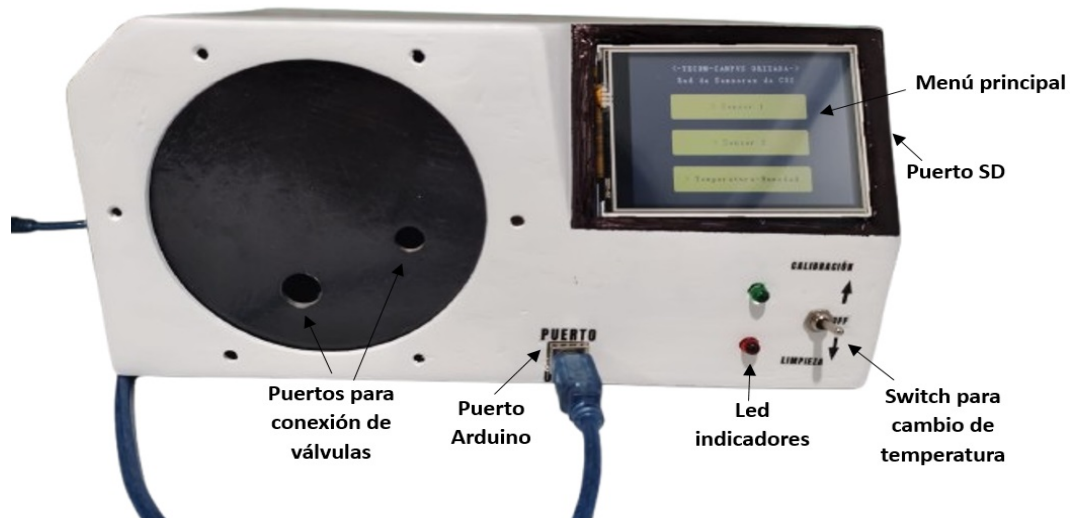
#### **4.5 Respuesta de la nariz electrónica para el monitoreo de muestras de dióxido de carbono**

Uno de los objetivos específicos del proyecto es crear un dispositivo que forme parte de la instrumentación de un invernadero vertical. Con este propósito, se abordaron aspectos clave, tales como la funcionalidad del dispositivo y la identificación de los requisitos necesarios para su implementación (Tabla 4.2). Como parte de la futura aplicación, se contempló la configuración del equipo, el despliegue de información (incluyendo un menú de usuario) y el registro de datos, para permitir su procesamiento según sea necesario.

**Tabla 4.2: Características específicas del enclosure.**

|  |       |
|--|-------|
| <b>Peso</b>  | 1 kg  |
| <b>Grados de inclinación para la pantalla táctil</b> | 30 °  |
| <b>Espesor de las paredes</b>                        | 0.8mm |

El resultado final de la nariz electrónica (Figura 4.13) fue un diseño funcional y transportable para poder integrarlo al invernadero vertical. Todos los elementos que se pueden manipular por el usuario quedan en la cara principal haciendo fácil la inyección y procesamiento de la muestra. En la Sección ANEXO B se muestra el manual de usuario para poder operar de manera correcta el equipo.



**Figura 4.13: Nariz electrónica para el monitoreo de  $CO_2$ , humedad y temperatura para la instrumentación de un invernadero vertical.**

El sistema desarrollado puede considerarse como un equipo listo para realizar las pruebas pertinentes, mostrando un funcionamiento adecuado en el menú principal de usuario, así como en el puerto para la memoria micro SD, lo que permite la extracción de los datos correspondientes de manera eficiente. Los indicadores LED cumplen su función de señalización, mostrando el estado operativo del sistema: el led verde indica la fase de estabilización, mientras que el led rojo señala la etapa de regeneración del sensor. En términos generales, el dispositivo se presenta como una solución confiable que cumple con las especificaciones y los objetivos establecidos en el proyecto.

## CONCLUSIONES

Con base a los resultados de este trabajo, podemos afirmar que se diseñaron y fabricaron circuitos electrónicos de acondicionamiento para los sensores de dióxido de carbono y humedad, logrando una medición estable y confiable de estas variables.

Asimismo se desarrolló un sistema de monitoreo que incorpora una interfaz de usuario intuitiva y de fácil operación gracias a la integración de una pantalla táctil. Este menú permite visualizar, registrar y almacenar la concentración de dióxido de carbono y el porcentaje de humedad relativa en la celda de medición, cumpliendo con las funciones específicas establecidas en los objetivos del proyecto.

Adicionalmente, podemos afirmar que de acuerdo con las restricciones de diseño establecidas para el funcionamiento de nuestro prototipo en un invernadero vertical, se logró integrar un sistema completo que resulta confiable y funcional.

Tomando en cuenta las afirmaciones anteriores, podemos señalar también que la hipótesis de trabajo que establecimos al principio, se valida satisfactoriamente.

## TRABAJO A FUTURO

La nariz electrónica fue desarrollada tomando como base investigaciones previas, lo que permitió orientar el diseño hacia la solución de una necesidad específica en el sector agroindustrial. No obstante, se considera que el prototipo actual presenta un potencial significativo para ser optimizado en diversos aspectos, lo que abre oportunidades para futuras mejoras y adaptaciones.

- Dado que va enfocado al crecimiento de especies vegetales y se requiere el monitoreo de diversas variables como:  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $C_2H_4$ , humedad y temperatura. En este proyecto se abarcó el monitoreo del  $CO_2$ , humedad-temperatura, para futuras mejoras se pueden tomar en cuenta las variables restantes.
- Como parte del punto anterior, se deberán agregar las funciones necesarias al código principal del Menú, para realizar la lectura de esos sensores.
- El cambio de temperaturas se realizada por medio de un switch, se puede considerar la manera de hacerlo de forma automática, de acuerdo a los tiempos que se definieron en el capítulo 3.
- En cuestión del enclosure, el diseño esta compuesto por piezas ensambladas lo cual genera cierto grado de desnivel entre ellas, se podría proponer un diseño basado en caras para disminuir el error entre piezas.

# PRODUCTOS ACADÉMICOS



## Diploma de la presentación del artículo

## CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

**AUTORES:** ABAD GALINDO GUADALUPE XOLOTZIN  
AGUILA RODRÍGUEZ GERARDO  
GONZÁLEZ SÁNCHEZ BLANCA ESTELA  
HERRERA AGUILAR IGANACIO  
ORTIZ CELISEO ARACELI

**TÍTULO:** DESARROLLO DE UNA NARIZ ELECTRÓNICA PARA EL MONITOREO DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO Y HUMEDAD EN UN INVERNADERO VERTICAL ENFOCADO AL CRECIMIENTO DE ESPECIES BIOLÓGICAS VEGETALES

**RAMA:** PROGRAMAS DE COMPUTACION

**TITULAR:** SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA -TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
(CON FUNDAMENTO EN EL ARTÍCULO 83 DE LA L.F.D.A. Y 46 DEL R.L.F.D.A.)

## Registro del software implementado en el menú de usuario

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. G. D. L. Cámara, *INVERNADEROS VERTICALES*, sep. de 2022. dirección: <https://www.linkedin.com/pulse/invernaderos-verticales-juan-gonz%C3%A1lez-de-la-c%C3%A1mara/?originalSubdomain=es>.
- [2] INTRAGRI, *Categorías de Artículos: Papel del Etileno en la Maduración de Frutos*, 2019. dirección: <https://www.intagri.com/articulos/poscosecha-comercializacion/%20https://www.intagri.com/articulos/frutales/razas-del-cultivo-de-aguacate%20https://www.intagri.com/articulos/frutales/>.
- [3] A. . Lara y G. Ortega, «¿De qué depende la maduración de los frutos?» *Ciencia UNAM*, págs. 1-12, 2021. dirección: <https://ciencia.unam.mx/>.
- [4] I. Moreno y J. Serracín, *Matriz de sensores: fundamento de la nariz electrónica*, 2016. dirección: [http://www.enose.nl/contact/..](http://www.enose.nl/contact/)
- [5] L. Galeano y M. Rodríguez, «Asignación Opción de Grado,» *MD*, jun. de 2020. dirección: <https://repository.uniminuto.edu/server/api/core/bitstreams/b07a6995-16d8-4d0e-b65d-385d55321c92/content>.
- [6] F. Descubre, *Aplicaciones de narices electrónicas en la industria frutícola*, 2015. dirección: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Una-nariz-electronica-mide-la-calidad-de-los-abonos-organicos-por-el-olor>.
- [7] L. Carvajal, G. Cucaita, C. Zuluaga y M. Quicazan, «Uso de una nariz electrónica y panel sensorial para la evaluación de la calidad de mora,» *Vitae*, vol. 19, S60-S62, 2012, ISSN: 0121-4004. dirección: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169823914012>.
- [8] M. C. Quicazán, A. C. Díaz y C. M. Zuluaga, «LA NARIZ ELECTRÓNICA, UNA NOVEDOSA HERRAMIENTA PARA EL CONTROL DE PROCESOS Y CALIDAD EN LA INDUSTRIA AGROALIMENTARIA,» *Revista de la facultad de química farmacéutica*, vol. 18, págs. 209-217, jun. de 2011, ISSN: 2145-2660.

- [9] R. Banerjee, B. Tudu, R. Bandyopadhyay y N. Bhattacharyya, «A review on combined odor and taste sensor systems,» *Journal of Food Engineering*, vol. 190, págs. 10-21, 2016, ISSN: 0260-8774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.06.001>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877416302060>.
- [10] R. Ordoñez-Araque, J. RODRÍGUEZ-VILLACRES y J. C. Urresto-Villegas, «Electronic Nose, Tongue and Eye: Their Usefulness for the Food Industry,» *Vitae*, 2020. dirección: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:231748107>.
- [11] R. D. Cruz, «Desarrollo de olfatos electrónicos como sensores para diabetes mellitus mediante el aliento del paciente,» *INGENET*, 2018.
- [12] A. V. Guamán, P. López y J. Torres-Tello, «Multivariate Discrimination Model for TNT and Gunpowder Using an Electronic Nose Prototype: A Proof of Concept,» en *International Conference on Information Technology & Systems*, 2019. dirección: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:86855070>.
- [13] K. A. Sudama, M. Rivai, D. Aulia y T. Mujiono, «Electronic Nose Based on Gas Sensor Array and Neural Network for Indoor Hydrogen Gas Control System,» *2022 1st International Conference on Information System & Information Technology (ICISIT)*, págs. 187-192, 2022. dirección: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:252113357>.
- [14] C. L. D. Villa, C. Lota, J. M. Banday et al., «Development of a Remote-Controlled Non-Nitrogen-Based IED Detecting Robot using an Electronic Nose System,» *2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, págs. 1-4, 2022. dirección: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:252165360>.
- [15] Florez, «Implementación de un sistema de olfato electrónico para la adquisición de volátiles provenientes de almendras de cacao seco operado mediante el uso de una interfaz gráfica en Labview,» *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, vol. 8, págs. 167-177, S1 sep. de 2021, ISSN: ISSN 2346-030X. DOI: [10.15649/2346030x.2422](https://doi.org/10.15649/2346030x.2422).

- [16] M. A. Subandri y R. Sarno, «Optimización de la matriz de sensores de nariz electrónica basada en datos de concentración de compuestos volátiles,» *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1201, 2019. dirección: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:195547370>.
- [17] N. B. y Abigail Wezelis y Lav R. Varshney y Rakesh Kumar, «Computación olfativa programable,» *IEEE Micro*, págs. 88-96, 2023. dirección: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:259178177>.
- [18] A. Elton, *Una nariz electrónica identifica maderas y puede combatir la extracción ilegal*, 2015. dirección: <https://agencia.fapesp.br/una-nariz-electronica-identifica-maderas-y-puede-combatir-la-extraccion-ilegal/20652>.
- [19] K. Persaud y G. Dodd, «Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose,» *Nature*, vol. 299, n.º 5881, págs. 352-355, sep. de 1982, ISSN: 0028-0836. DOI: [10.1038/299352a0](https://doi.org/10.1038/299352a0). dirección: <https://doi.org/10.1038/299352a0>.
- [20] O. Fimbres, *Principio de funcionamiento de los sensores electroquímicos Dräger, para detección de gases*. Mayo de 2018. dirección: <https://www.linkedin.com/pulse/principio-de-funcionamiento-los-sensores-dr%C3%A4eger-para-omar-fimbres/>.
- [21] R. R. Martínez Juan La Cruz Karen, «Importancia del control de variables ambientales en invernaderos para la producción de hortalizas,» 2020. dirección: [www.inia.cl](http://www.inia.cl).
- [22] Nutricontrol, *Cómo influye el dióxido de carbono (CO2) en el cultivo en invernadero*, abr. de 2020. dirección: <https://nutricontrol.com/es/como-influye-el-dioxido-de-carbono-co2-en-el-cultivo-en-invernadero/>.
- [23] Nutricontrol, *Cómo influye el dióxido de carbono (CO2) en el cultivo en invernadero*, ago. de 2020. dirección: <https://nutricontrol.com/es/la-humidificacion-como-tecnica-para-aumentar-la-humedad-relativa-y-disminuir-la-temperatura/>.

- [24] R. Guerrieri, S. Belmecheri, S. V. Ollinger et al., «Disentangling the role of photosynthesis and stomatal conductance on rising forest water-use efficiency,» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, n.º 34, págs. 16 909-16 914, 2019. DOI: [10.1073/pnas.1905912116](https://doi.org/10.1073/pnas.1905912116). eprint: <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.1905912116>. dirección: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1905912116>.
- [25] P. Group, *El efecto del dióxido de carbono en la vida vegetal*, abr. de 2022. dirección: <https://www.products.pcc.eu/es/blog/el-efecto-del-dioxido-de-carbono-en-la-vida-vegetal/>.
- [26] R. G. Francisco, *NORMA MEXICANA NMX-E-255-CNCP-2008, INVERNADEROS-DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN-ESPECIFICACIONES*, jun. de 2009. dirección: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5052108&fecha=08/07/2008#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5052108&fecha=08/07/2008#gsc.tab=0).
- [27] A. C. Manuel, *Mayor rendimiento en cultivo de hortalizas en invernadero*, mar. de 2023. dirección: [alvarado.manuel@inifap.gob.mx](mailto:alvarado.manuel@inifap.gob.mx).
- [28] Haebomn, *China construye la granja urbana más lata del mundo*, dic. de 2023. dirección: <https://slashpage.com/haebom/archive?tl=es&post=7xjqy1g2v7pr4m6vd54z>.
- [29] F. GROUP, *Technical Information for Carbon Dioxide Sensors*.
- [30] E. C. Thermo, *OMNIC ESPECTROFOTÓMETRO-GUÍA*, 2006.
- [31] SENASICA, «Estudio para determinar el impacto económico de FocR4T en México,» *Gobierno de México*, págs. 3-6, 2020. dirección: [gob.mx/senasica](http://gob.mx/senasica).
- [32] C. Ramírez, A. Tapia y P. Calvo, «EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE FRUTA DE BANANO DE ALTURA QUE SE PRODUCE EN EL CANTÓN DE TURRIALBA, COSTA RICA,» vol. 20, págs. 107-127, 2011, ISSN: 2215-2458. dirección: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66619992007>.
- [33] IPC-2221A, *Generic standard on printed board desing*, mayo de 2003. dirección: [www.ipc.org](http://www.ipc.org).

- [34] SP, *Humedad específica, relativa y absoluta*, 2024. dirección: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/humedad-relativa-especifica-absoluta/>.
- [35] GHITRON, *PRODUCT SPECIFICATIONS HMZ 433A1*. dirección: <https://agelectronica.lat/pdfs/textos/H/HMZ433A1.PDF>.
- [36] M. A. P. García, *Instrumentación electrónica*. 2014, ISBN: 978-84-283-3702-1. dirección: [https://www.google.com.mx/books/edition/Instrumentaci%C3%B3n\\_electr%C3%B3nica/Fb5tBQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=ecuaci%C3%B3n+de+steinhart-hart&pg=PA289&printsec=frontcover](https://www.google.com.mx/books/edition/Instrumentaci%C3%B3n_electr%C3%B3nica/Fb5tBQAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&dq=ecuaci%C3%B3n+de+steinhart-hart&pg=PA289&printsec=frontcover).

# ANEXO A: DATA SHEET DE LOS SENSORES

## ANEXO A.1: Sensor de gas para CO<sub>2</sub>

### TECHNICAL INFORMATION FOR TGS4161

#### 1. Basic Information and Specifications

##### 1-1 Features

- \* High selectivity to carbon dioxide
- \* Low humidity dependency
- \* Small size
- \* Low power consumption
- \* Long life

##### 1-2 Applications

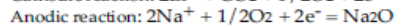
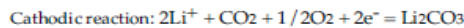
- \* Air quality control

##### 1-3 Structure

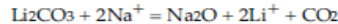
Figure 1 shows the structure of TGS4161. The CO<sub>2</sub> sensing element consists of a cation (Na<sup>+</sup>) solid electrolyte formed between two electrodes together with a printed heater (RuO<sub>2</sub>) substrate. The cathode (sensing element) consists of lithium carbonate and gold, while the anode (counter electrode) is made of gold. The anode is connected to sensor pin No.3 ("S(+)") while the cathode is connected to pin No.2 ("S(-)"). A RuO<sub>2</sub> heater connected to pins No.1 ("H") and No.4 ("H") heats the sensing element. Lead wires are made of Pt and are connected to nickel pins.

##### 1-4 Operation principle

When the sensor is exposed to CO<sub>2</sub> gas, the following electrochemical reaction occurs:



Overall chemical reaction:



As a result of the electrochemical reaction, electromotive force (EMF) would be generated according to Nernst's equation:

$$\text{EMF} = E_c - (R \times T) / (2F) \ln (P(\text{CO}_2))$$

where

P(CO<sub>2</sub>): Partial pressure of CO<sub>2</sub>,

E<sub>c</sub>: Constant value      R: Gas constant

T: Temperature (K)      F: Faraday constant

By monitoring the electromotive force (EMF) generated between the two electrodes, it is possible to measure CO<sub>2</sub>.

##### 1-5 Basic measuring circuit

Figure 2 shows the basic measuring circuit for TGS4161. The sensor requires that heater voltage (V<sub>H</sub>) be applied to the integrated heater in order to maintain the sensing element at the optimal temperature for sensing. The sensor's EMF should be

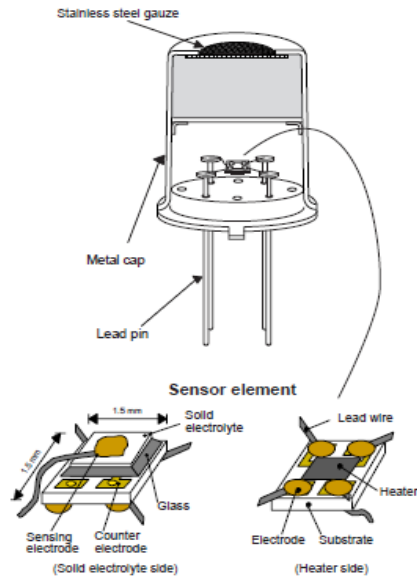


Fig. 1 - Sensor structure

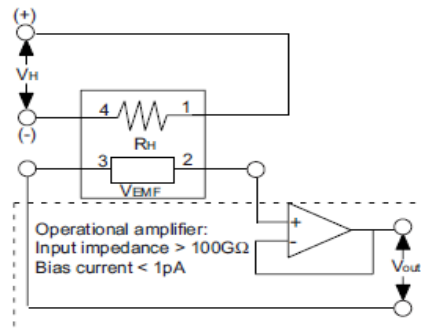


Fig. 2 - Basic measuring circuit

NOTE: Pins 1 and 4 must be connected as shown in the drawing because of the specific polarity of V<sub>H</sub>.

Revised 05/04

2

Figura A.14: Características del sensor

measured using an operational amplifier with high impedance (more than 100GΩ) and low bias current (less than 1 pA) such as Texas Instruments' model No. TLC 271. Since the solid electrolyte type sensor functions as a kind of battery, its absolute EMF value would drift using this basic circuit. However, the change of EMF value (ΔEMF) maintains a stable relationship with the changes in CO<sub>2</sub> concentration. Therefore, in order to obtain an accurate measurement of CO<sub>2</sub>, a special microprocessor for signal processing should be used with TGS4161. A special evaluation sensor module which performs the required signal processing (AM-4-4161) is available from Figaro. See *Technical Information of AM-4-4161* for further details.

1-6 Circuit & operating conditions

The ratings shown below should be maintained at all times to insure stable sensor performance:

| Item   | Specification   |
|--|---|
| Heater voltage (V <sub>H</sub> )                 | 5.0V ± 0.2V DC  |
| Heater resistance (R <sub>H</sub> ) - room temp. | 70±7Ω   |
| Heater current                                   | approx. 50mA  |
| Heater power consumption                         | approx. 250mW   |
| Operating conditions                             | -10°C ~ +50°C, 5 ~ 95%RH  |
| Storage conditions                               | -20°C ~ +60°C, 5 ~ 90%RH<br>(store in a moisture proof bag with silica gel) |
| Optimal detection concentration                  | 350 ~ 5,000ppm  |

1-7 Specifications NOTE 1

| Item                             | Specification   |
|----------------------------------|---|
| EMF in 350ppm of CO <sub>2</sub> | 220 ~ 490mV   |
| ΔEMF                             | EMF (350ppmCO <sub>2</sub> ) - EMF (3500ppm CO <sub>2</sub> ) |
|                                  | 44 ~ 72mV   |

**NOTE 1:** Sensitivity characteristics are obtained under the following standard test conditions:

(Standard test conditions)  
 Temperature and humidity: 20 ± 2°C, 65 ± 5% RH  
 Circuit conditions: V<sub>H</sub> = 5.0±0.05V DC  
 Preheating period: 12 hours or more under standard circuit conditions

1-8 Dimensions (see Fig. 3)

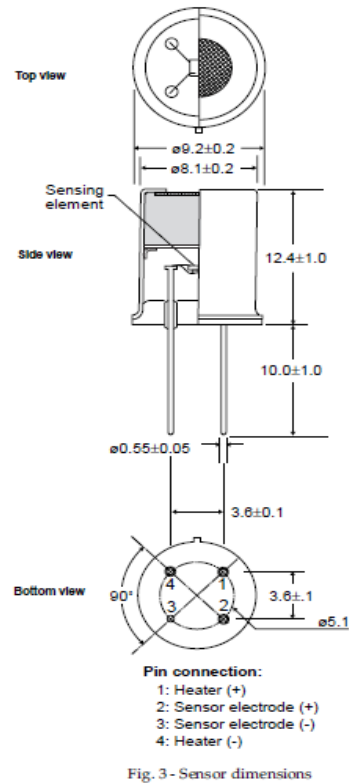


Fig. 3 - Sensor dimensions

**Mechanical Strength:**

The sensor shall have no abnormal findings in its structure and shall satisfy the above electrical specifications after the following performance tests:

- Withdrawal Force** - withstand force of 5kg in each (pin from base) direction
- Vibration** - frequency-5~400Hz, amplitude-10mm, repeating 15 min. sweep, duration-two hours, x-y-z direction
- Shock** - acceleration-100G, repeated 5 times, x-y-z direction

Figura A.15: Pinout del sensor

## ANEXO A.2: Sensor HMZ 433A1 para humedad y temperatura



### HMZ-433A1 Humidity module specifications

1. Application range :

The HMZ-433A1 module consist of an HCZ sensor and integrated circuit to provide a linear DC Voltage for 0-100%RH to enable easy user application of the HCZ sensor. They are specifically designed for use appliances and controllers.

| Feature                       | Application                                |
|-------------------------------|--|
| Wide humidity operation range | Air condition ,humidifier, Dehumidifier.   |
| Linear DC Output              | Humidity controller, Humidity transmitter. |
| Easy operation                | Hygrometer, Hygro-recorder.                |
| Long-term stability           | Copying machine.                           |
| Small and economical          | Clock ,Weather-forecast barometer.         |

2. Electrical characteristics :

2.1 Sensing element (Humidity) : HMZ-433A1 Humidity sensor " GHITRON HCZ sensor"

2.2 Supply Voltage(Vin) : 5VDC±5%

2.3 Current Consumption : 5mA max:(2mA avg.)

2.4 Operating Range

Temperature : 0 to 60°C

Humidity : 95%RH or less

2.5 Storage

Temperature : -20 to 70°C

Humidity : 95%RH or less

2.6 Humidity transmitting

Range : 20 to 90%RH

2.7 Accuracy :

Temperature : Resistance(1%) : 50±0.5KΩ(at 25±0.2°C)

Humidity : ±5%RH (at 25°C, 50%RH, Vin=5.00VDC)

2.8 Humidity Output 0~3.3V

Signal(Reference) : (Output Impedance approx:5KΩ)

| Humidity(%RH)     | 20   | 30   | 40   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Output Voltage(V) | 0.66 | 0.99 | 1.32 | 1.65 | 1.98 | 2.31 | 2.64 | 2.97 |

2.9 Temperature Output

Using thermistor 503 R(25°C)=50KΩ±1%,

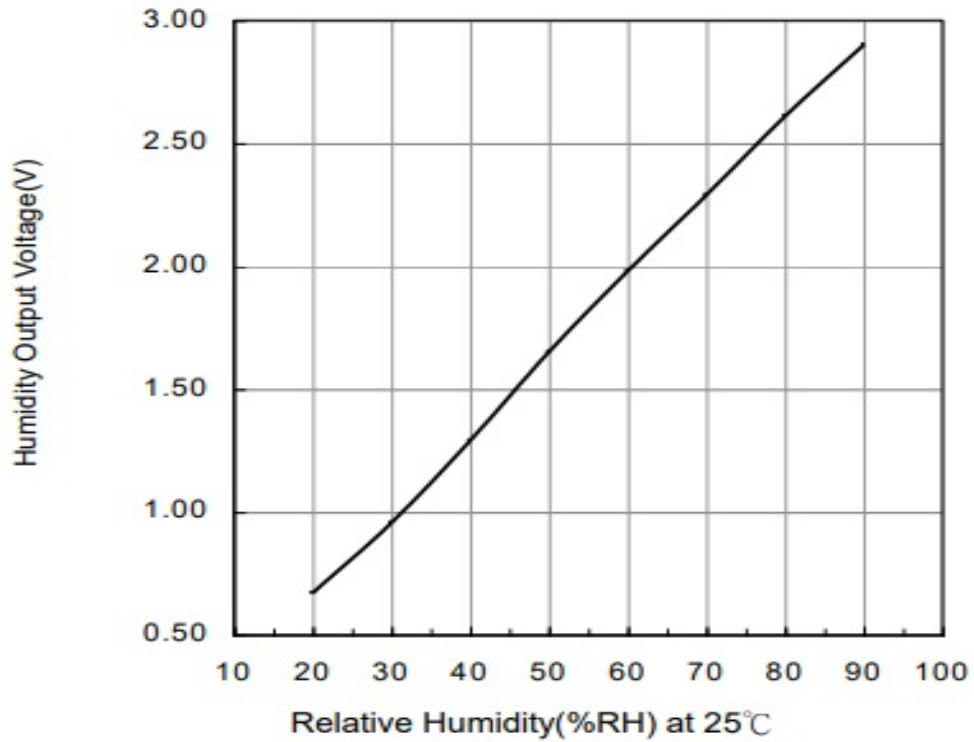
Signal(Reference) : B(25/85)=3950K±1%

|  |             |           |
|--|-------------|-----------|
| This document is the exclusive property of Ghitron and shall not be reproduced or copied or transformed to any other format without prior permission of Ghitron. 本資料為模範所有之財產，未經許可，不得複製、翻印或轉變成其他形式使用。 | Page 1 of 6 |           |
|  | App.No.     | EC#082001 |

Ghitron Technology

Figura A.16: Información relevante del sensor HMZ 433A1

HMZ-433A1 Humidity Output 0~3.3V characteristics



2.11 HMZ module Humidity Output 0~3.3V v.s Temperature characteristics :

|       | 10°C | 15°C | 20°C | 25°C | 30°C | 35°C | 40°C |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 20%RH | 0.75 | 0.72 | 0.69 | 0.66 | 0.62 | 0.59 | 0.55 |

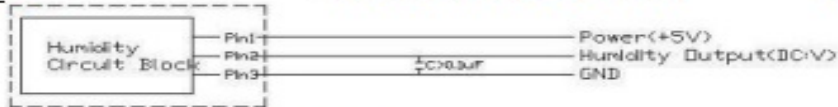
copied or transformed to any other format without prior permission of Ghitron. 本資料  
為模範專有之財產，未經許可，不得複製、翻印或轉變成其他形式使用。

App.No.

EC#082001

Ghitron Technology

Figura A.17: Comportamiento del sensor a temperatura ambiente



4.2 Pin4 Thermistor output (DC:V)



5. Order Form :

HMZ—433A1 is the module with 2317RJ-04 4 pins(pitch = 2.5 mm) of terminal Connector of voltage output for humidity and temperature output 50KΩ (at 25℃) -

| HMZ-433A1 Configure of definition. |  |
|------------------------------------|--|
| Input Voltage                      | 5V                                     |
| Humidity Output Voltage            | 0~3.3V                                 |
| Temperature Output                 | 50kΩ (at 25℃) - (*Note1*)              |
| Terminal Connector                 | 2317RJ-04 · 4pins · (Pitch = 2.5 mm) - |
| Accuracy                           | ±5%RH(at 25℃, 60%RH, Vin=5.00VDC)      |
| Sensing element (Humidity) :       | Humidity sensor " GHITRON HCZ sensor"  |
| Output Range :                     | 20~90%RH                               |

(\*Note1\*) Optional type

| Part_No.   | NTC Configure of definition. |
|------------|------------------------------|
| HMZ-433A1  | 50kΩ · SMD (Default type)    |
| HMZ-433A1N | NA                           |
| HMZ-433A1D | 50kΩ · DIP                   |

6. Reliability test :

| No. | ITEM                | METHOD   | REQUIREMENT  |
|-----|---------------------|--|--|
| 6.1 | Impact test         | To drop Module 3time at random on to a hard wooden plate from 1meter above high.             | No breakage, nor cracks. Should be electrically normal |
| 6.2 | Vibration test      | Vibration test in X-Y-Z axis for 30min.under 10-55Hz frequency, 1.5mm(10-55-10Hz) amplitude. | No breakage, nor cracks. Should be electrically normal |
| No. | ITEM                | METHOD   | REQUIREMENT  |
| 6.3 | Humidity resistance | 1000 hours@ 60℃, 90%RH .   | △%RH < ±5%RH   |

|  |             |           |
|--|-------------|-----------|
| This document is the exclusive property of Ghitron and shall not be reproduced or copied or transformed to any other format without prior permission of Ghitron. 本資料為機密所有之財產，未經許可，不得複製、翻印或轉變成其他形式使用。 | Page 5 of 6 |           |
|  | App.No.     | EC#082001 |

Ghitron Technology

Figura A.18: Especificaciones del sensor

## ANEXO A.3: Amplificador operacional TL084: Información más relevante



### TL084, TL084A, TL084B

General purpose JFET quad operational amplifiers

Datasheet — production data

#### Features

- Wide common-mode (up to  $V_{CC}^+$ ) and differential voltage range
- Low input bias and offset current
- Output short-circuit protection
- High input impedance JFET input stage
- Internal frequency compensation
- Latch up free operation
- High slew rate: 16 V/ $\mu$ s (typical)

#### Description

The TL084, TL084A, and TL084B are high-speed, JFET input, quad operational amplifiers incorporating well matched, high voltage JFET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient.

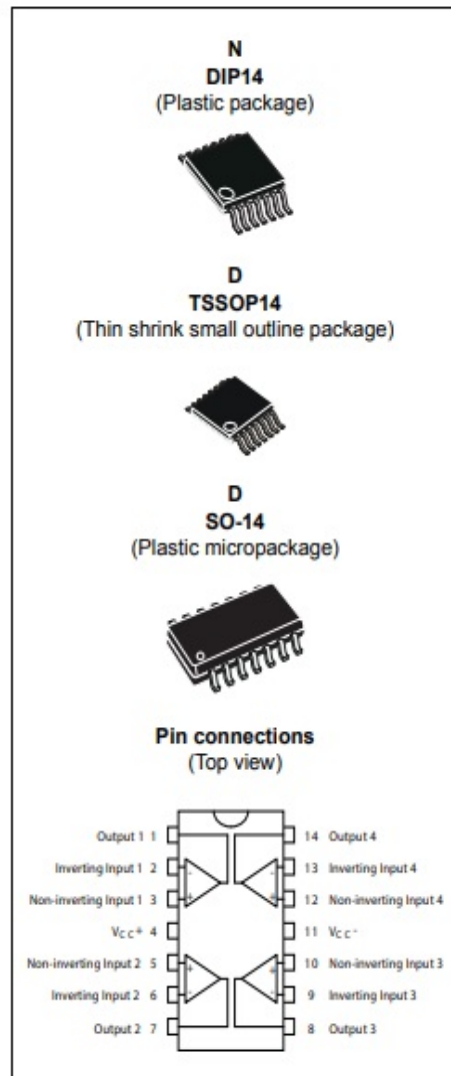


Figura A.19: Información general del sensor

## 2 Absolute maximum ratings and operating conditions

Table 1. Absolute maximum ratings

| Symbol     | Parameter   | Value       | Unit |
|------------|---|-------------|------|
| $V_{CC}$   | Supply voltage <sup>(1)</sup>                                       | ±18         | V    |
| $V_{in}$   | Input voltage <sup>(2)</sup>  | ±15         |      |
| $V_{id}$   | Differential input voltage <sup>(3)</sup>                           | ±30         |      |
| $R_{thja}$ | Thermal resistance junction to ambient <sup>(4)(5)</sup>            |             | °C/W |
|            | DIP14   | 80          |      |
|            | TSSOP14   | 100         |      |
| $R_{thjc}$ | Thermal resistance junction to case <sup>(4)(5)</sup>               |             | °C/W |
|            | DIP14   | 33          |      |
|            | TSSOP14   | 32          |      |
| $P_{tot}$  | Power dissipation   | 680         | mW   |
|            | Output short-circuit duration <sup>(6)</sup>                        | Infinite    |      |
| $T_{oper}$ | Operating free-air temperature range:<br>for TL084I/TL084AI/TL084BI | -40 to +105 | °C   |
|            | Operating free-air temperature range:<br>for TL084C/TL084AC/TL084BC | 0 to +70    |      |
| $T_{stg}$  | Storage temperature range   | -65 to +150 |      |
| ESD        | HBM: human body model <sup>(7)</sup>                                | 1000        | V    |
|            | MM: machine model <sup>(8)</sup>                                    | 150         |      |
|            | CDM: charged device model <sup>(9)</sup>                            | 1500        |      |

- All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages where the zero reference level is the midpoint between  $V_{CC+}$  and  $V_{CC-}$ .
- The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
- Differential voltages are the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
- Short-circuits can cause excessive heating and destructive dissipation.
- $R_{th}$  are typical values.
- The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.
- Human body model: 100 pF discharged through a 1.5 kΩ resistor between two pins of the device, done for all couples of pin combinations with other pins floating.
- Machine model: a 200 pF cap is charged to the specified voltage, then discharged directly between two pins of the device with no external series resistor (internal resistor < 5 Ω), done for all couples of pin combinations with other pins floating.
- Charged device model: all pins plus package are charged together to the specified voltage and then discharged directly to the ground.

Figura A.20: Características más relevantes

### 3 Electrical characteristics

Table 3.  $V_{CC} = \pm 15\text{ V}$ ,  $T_{amb} = +25\text{ }^\circ\text{C}$  (unless otherwise specified)

| Symbol                   | Parameter   | TL084I/AI/AC/BI/BC   |             |                              | TL084C               |            |            | Unit                         |
|--------------------------|---|----------------------|-------------|------------------------------|----------------------|------------|------------|------------------------------|
|                          |   | Min.                 | Typ.        | Max.                         | Min.                 | Typ.       | Max.       |                              |
| $V_{io}$                 | Input offset voltage ( $R_S = 50\ \Omega$ )<br>$T_{amb} = +25\text{ }^\circ\text{C}$ TL084<br>$T_{amb} = +25\text{ }^\circ\text{C}$ TL084A<br>$T_{amb} = +25\text{ }^\circ\text{C}$ TL084B<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ TL084<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ TL084A<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ TL084B |                      | 3<br>3<br>1 | 10<br>6<br>3<br>13<br>7<br>5 |                      | 3          | 10         | mV                           |
| $\Delta V_{io}/\Delta T$ | Input offset voltage drift  |                      | 10          |                              |                      | 10         |            | $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| $I_{io}$                 | Input offset current<br>$T_{amb} = +25\text{ }^\circ\text{C}$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$  |                      | 5           | 100<br>4                     |                      | 5          | 100<br>4   | pA<br>nA                     |
| $I_{ib}$                 | Input bias current <sup>(1)</sup><br>$T_{amb} = +25\text{ }^\circ\text{C}$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$   |                      | 20          | 200<br>20                    |                      | 30         | 200<br>20  | pA<br>nA                     |
| $A_{vd}$                 | Large signal voltage gain ( $R_L = 2\text{ k}\Omega$ , $V_o = \pm 10\text{ V}$ )<br>$T_{amb} = +25\text{ }^\circ\text{C}$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$  | 50<br>25             | 200         |                              | 25<br>15             | 200        |            | V/mV                         |
| SVR                      | Supply voltage rejection ratio ( $R_S = 50\ \Omega$ )<br>$T_{amb} = +25\text{ }^\circ\text{C}$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$   | 80<br>80             | 86          |                              | 70<br>70             | 86         |            | dB                           |
| $I_{CC}$                 | Supply current, no load<br>$T_{amb} = +25\text{ }^\circ\text{C}$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$   |                      | 1.4         | 2.5<br>2.5                   |                      | 1.4        | 2.5<br>2.5 | mA                           |
| $V_{icm}$                | Input common mode voltage range   | $\pm 11$             | +15<br>-12  |                              | $\pm 11$             | +15<br>-12 |            | V                            |
| CMR                      | Common mode rejection ratio ( $R_S = 50\ \Omega$ )<br>$T_{amb} = +25\text{ }^\circ\text{C}$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$  | 80<br>80             | 86          |                              | 70<br>70             | 86         |            | dB                           |
| $I_{os}$                 | Output short-circuit current<br>$T_{amb} = +25\text{ }^\circ\text{C}$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$  | 10<br>10             | 40          | 60<br>60                     | 10<br>10             | 40<br>60   | 60<br>60   | mA                           |
| $\pm V_{opp}$            | Output voltage swing<br>$T_{amb} = +25\text{ }^\circ\text{C}$ $R_L = 2\text{ k}\Omega$<br>$R_L = 10\text{ k}\Omega$<br>$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ $R_L = 2\text{ k}\Omega$<br>$R_L = 10\text{ k}\Omega$  | 10<br>12<br>10<br>12 | 12<br>13.5  |                              | 10<br>12<br>10<br>12 | 12<br>13.5 |            | V                            |
| SR                       | Slew rate<br>$V_{in} = 10\text{ V}$ , $R_L = 2\text{ k}\Omega$ , $C_L = 100\text{ pF}$ , unity gain   | 8                    | 16          |                              | 8                    | 16         |            | V/ $\mu\text{s}$             |

Figura A.21: Características eléctricas

## ANEXO B: MANUALES DE OPERACIÓN

### ANEXO B.1: Configuración y Manejo de la Interfaz Gráfica mediante la Pantalla LCD Shield Arduino 3.5 TFT

Uno de los puntos más importantes es que el usuario tenga contacto directo con las mediciones que se desean obtener, para lo cual es necesario una interfaz gráfica que le permita seleccionar esas acciones.

En primera instancia, es fundamental comprender la idea principal de la interfaz, la cual es mostrar el comportamiento de los sensores TGS 4161 para la detección de  $CO_2$ , así como los factores de temperatura y la humedad, debido a su interdependencia.

La pantalla principal presenta tres botones: Sensor 1, Sensor 2 y Temperatura-Humedad (Figura B.22). Para que el código se ejecute correctamente, es necesario contar con una micro SD ya que el programa se ejecuta empezando por el reconocimiento del medio de almacenamiento, en caso de no colocar la SD el programa no se ejecutará y mandará un error al usuario.

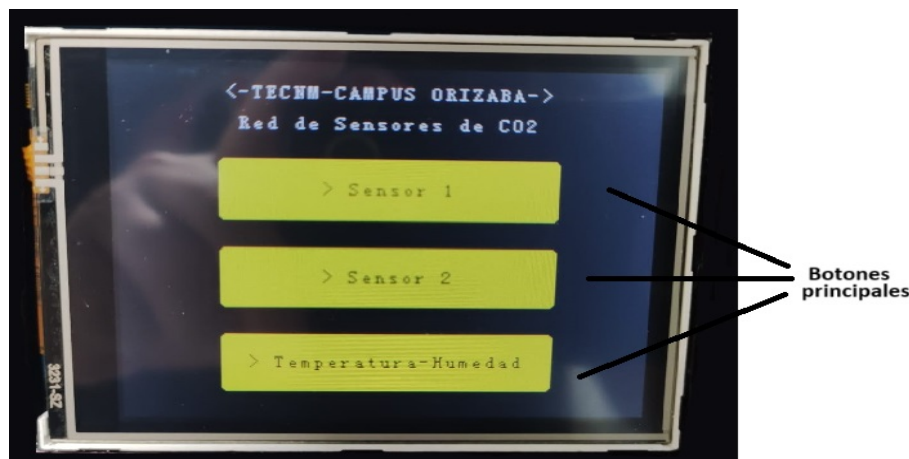
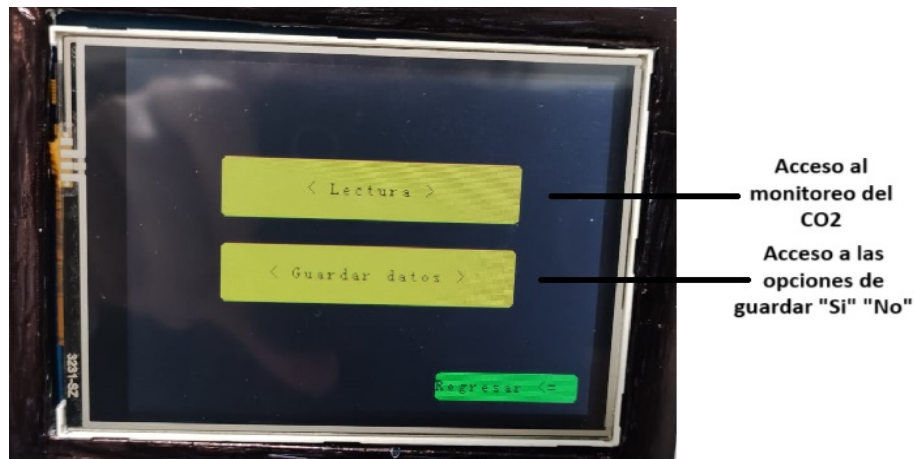


Figura B.22: Pantalla principal

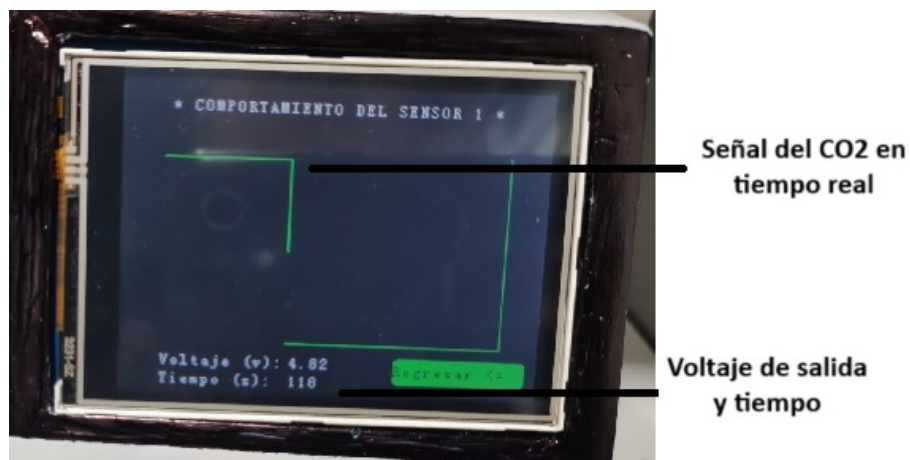
Al acceder al "Sensor 1." "Sensor 2", se muestra un segundo menú con las opciones "Lectura" "Guardar datos"(Figura B.23). Al seleccionar "Lectura", se puede observar la gráfica en tiempo

real del comportamiento del sensor, la cual estará censando los niveles de  $CO_2$  en el ambiente correspondiente.



**Figura B.23: Menú secundario**

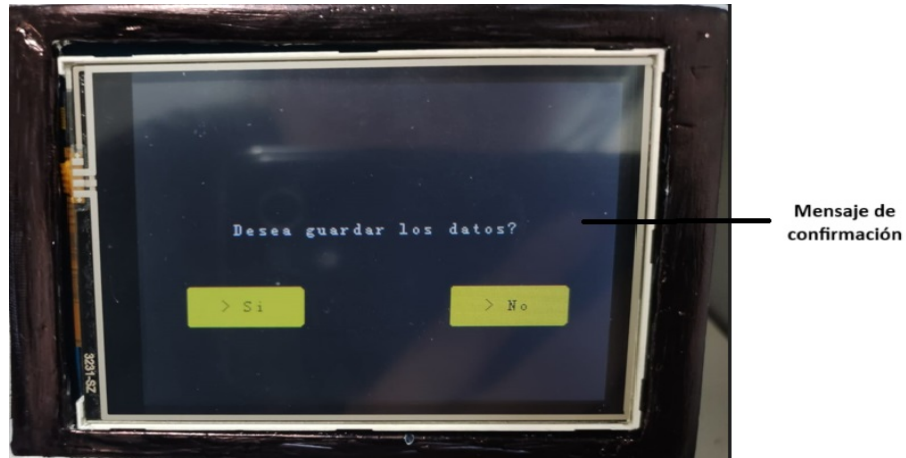
En la pantalla del Sensor 1 o del Sensor 2, se puede observar la gráfica del TGS-4161, en la parte inferior izquierda se muestra el dato exacto y el tiempo que se mantiene monitorizando. Una vez que la gráfica termina la pantalla, vuelve al inicio pero borrando el dato anterior.



**Figura B.24: Lectura**

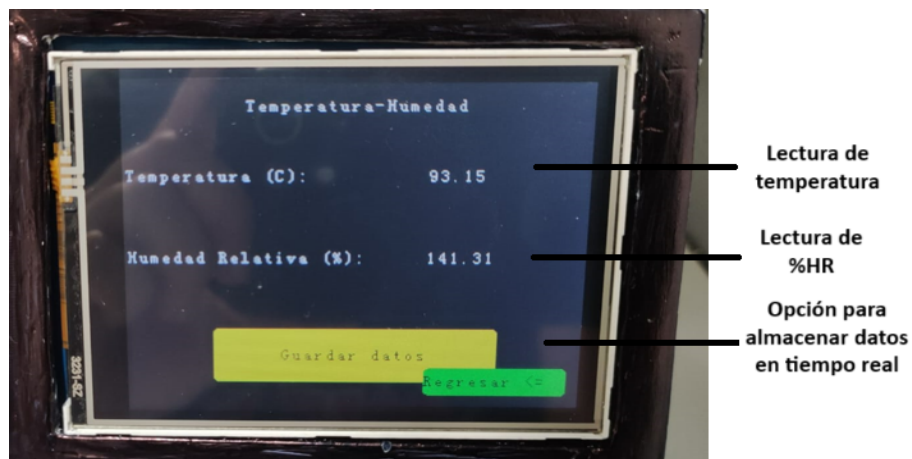
Cuando se está observando el comportamiento del sensor y se desea regresar, se ofrece la opción de guardar los datos, los cuales se almacenan en la micro SD. Además muestra un mensaje de confirmación "Datos guardados" cuando los datos ya se han almacenado, en caso de

que exista un error también muestra un mensaje.



**Figura B.25: Almacenamiento de datos**

Para el caso de los datos de "Temperatura y humedad", se muestran de la siguiente manera en la pantalla (Figura B.26), además que también se pueden almacenar los datos.



**Figura B.26: Muestra de las variables de temperatura y humedad, en tiempo real**

Uno de los objetivos es obtener una base de datos en formato CSV, que contiene el tiempo (segundos), la señal de salida (voltaje), temperatura (°C) y la humedad relativa del medio ambiente. La forma de almacenar datos es en dos partes, genera un archivo con los datos de voltaje del sensor de gas y otro archivo con los datos de temperatura y humedad respectivamente.

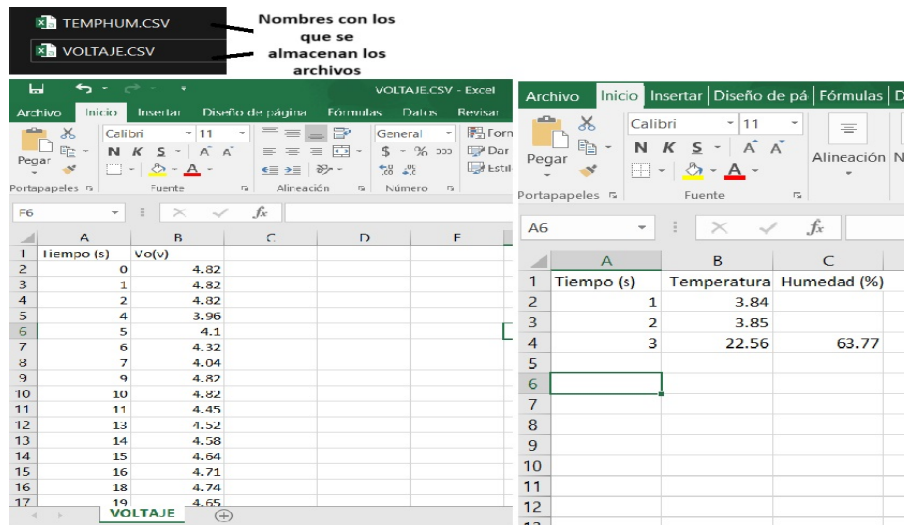


Figura B.27: Muestra de los archivos CSV para voltajes y humedad-temperatura

## ANEXO B.2: Manual de usuario para la nariz electrónica

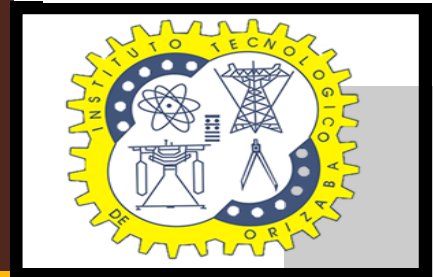
MANUAL DE USUARIO



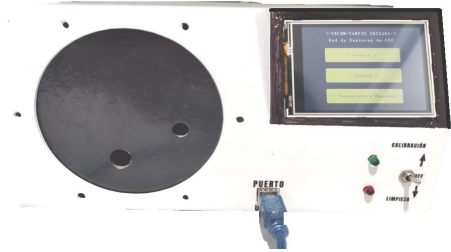
**NARIZ ELECTRÓNICA PARA EL MONITOREO DE LA CONCENTRACIÓN DE  
DIÓXIDO DE CARBONO Y HUMEDAD EN UN INVERNADERO VERTICAL  
ENFOCADO AL CRECIMIENTO DE ESPECIES BIOLÓGICAS VEGETALES**

Dirección: Ote. 9, Emiliano Zapata, 94320  
Orizaba, Ve r.  
Teléfono: 272 110 5360

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
CAMPUS-ORIZABA**



**Nariz electrónica para el monitoreo de la  
concentración de dióxido de carbono y  
humedad en un invernadero vertical enfocado  
al crecimiento de especies biológicas  
vegetales**



**LABORATORIO DE SENSORES E INTERFACES MULTIMODALES**

Encargado de laboratorio: Dr. Gerardo Águila Rodríguez

Escrito por: IQ. Guadalupe Xolotzin Abad Galindo

## INTRODUCCIÓN

---

Este manual de usuario guía al lector en la correcta operación de la nariz electrónica. Primero, se describen las medidas de seguridad más importantes, las partes que la componen, y posteriormente se detallan los pasos para su uso adecuado en la medición de CO<sub>2</sub>, humedad y temperatura. Siguiendo estas instrucciones, el usuario podrá monitorear los parámetros antes mencionados de manera eficiente.

### Objetivo

Mostrar al usuario cómo funciona la nariz electrónica para que pueda ser operada de manera correcta.

### Requerimientos

Para comenzar con el monitoreo es necesario que se cuente con:

Computadora.

Muestra de CO<sub>2</sub> que se desee monitorear.

Bomba de limpieza.

Cable tipo USB-B

## MEDIDAS DE SEGURIDAD

---

1. Uso de componentes aprobados: Utiliza componentes electrónicos que cumplan con las normativas de seguridad y estén diseñados para las especificaciones del proyecto.

2. Manejo de los sensores de gas y humedad: Los sensores empleados, están diseñados específicamente para el tipo de gas que se menciona (CO<sub>2</sub>) y %HR.

3. Desconexión de energía: Recordar siempre desconectar la fuente de alimentación antes de realizar algún cambio en el circuito para evitar descargas electrónicas.

4. Supervisión continua: Mantener bajo observación el circuito durante su funcionamiento en caso de observar algún posible riesgo o comportamiento anómalo.

5. Este sistema está diseñado para ser seguro, de fácil uso y acceso, clasificando como un entorno con baja exposición a riesgos.

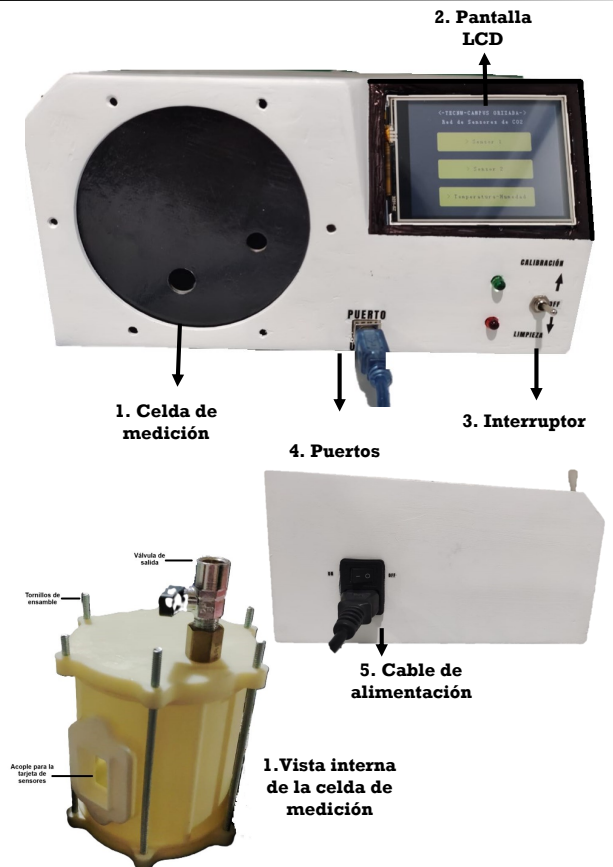
6. Carga correcta del gas muestra: El sensor que se encarga de monitorear la concentración está específicamente seleccionado para el dióxido de carbono.

## CONOCE EL EQUIPO

Las partes fundamentales que integran la nariz electrónica son:

- 1. Celda de medición:** La celda es la encargada de almacenar el gas muestra, dentro contiene un sensor TGS 4161 y un HMZ 433A1 que son los encargados de reconocer la muestra de interés y monitorear temperatura y humedad respectivamente. Cuenta con 2 válvulas en la parte frontal, una permite la inyección del gas y la otra la conexión de la bomba para purgar el sistema. En la parte trasera, se encuentra la válvula de salida para que el aire circule y limpie el equipo.
- 2. Pantalla LCD:** El equipo cuenta con una pantalla LCD TFT SHIEL de 3.2 in, la cual funciona con Arduino Mega 2560. En la pantalla, el usuario observará un menú para acceder el monitoreo en tiempo real del gas muestra, la temperatura y humedad respectivamente.
- 3. Interruptor:** Cuenta con un switch para hacer el cambio de corriente, ya sea que se encuentre en "medición" o "limpieza". Así como el interruptor para encender el equipo.
- 4. Puertos:** Se colocó un puerto USB-B y al costado un acceso para conectar una micro USB para extraer datos.
- 5. Cable de alimentación:** Cuenta con un cable de alimentación de CA de 3 clavijas con un interruptor para apagar y encender el equipo sin la necesidad de desconectarlo.

## DIAGRAMA DE PIEZAS



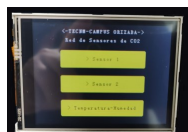
## COMO USAR EL EQUIPO



Conecte la fuente de alimentación para encender el sistema y cargue el código de funcionamiento.



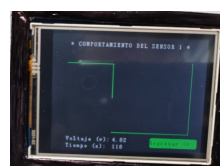
Coloque el interruptor en modo "Calibración" para que el sensor de gas empiece a estabilizarse (aproximadamente 10 min antes de cargar la muestra).



Indique en la pantalla el sensor a usar para comenzar con el monitoreo.



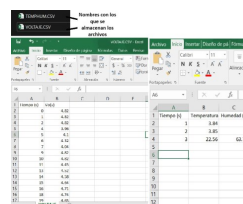
Con la ayuda de una jeringa comercial, extraiga la muestra de interés e inyéctela en la válvula correspondiente.



En seguida se comenzará a recibir la lectura del sensor y se observará en la pantalla el comportamiento.



Cuando el usuario desee interrumpir la lectura, deberá bajar el interruptor a la posición de "Limpieza" y se deberá conectar la bomba de limpieza en la válvula correspondiente.



Almacene los datos en caso de que se desee y extraiga la micro SD.



Una vez pasado 5 min de limpieza, puede colocar el interruptor en OFF o nuevamente en calibración si se desea correr otra muestra.

## **ANEXO C: PROGRAMACIÓN PRINCIPAL**

**ANEXO C.1: Código principal para el desarrollo del menú de usuario a través de la pantalla de cristal líquido**

```

include <UTFT.h>
#include <URTouch.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <math.h>

// Configuración de la pantalla y el touch
UTFT myGLCD(ILI9341_16, 38, 39, 40, 41);
URTouch myTouch(6, 5, 4, 3, 2);

// Incluir las fuentes de la librería UTFT
extern uint8_t SmallFont[];
extern uint8_t BigFont[];
extern uint8_t SevenSegNumFont[];

// Definición de los botones
#define BUTTON_X      60
#define BUTTON_Y      60
#define BUTTON_WIDTH  200
#define BUTTON_HEIGHT 40
#define BUTTON_SPACING 20
// Definición del botón de "Regresar"
#define BACK_BUTTON_WIDTH 100
#define BACK_BUTTON_HEIGHT 20
#define BACK_BUTTON_X (myGLCD.getDisplayXSize() - BACK_BUTTON_WIDTH - 10)
#define BACK_BUTTON_Y (myGLCD.getDisplayYSize() - BACK_BUTTON_HEIGHT - 10)
// Botón de "Guardar datos" en la pantalla de Temperatura-Humedad
#define TEMP_HUM_SAVE_BUTTON_WIDTH 50
#define TEMP_HUM_SAVE_BUTTON_HEIGHT 100
#define TEMP_HUM_SAVE_BUTTON_X 30
#define TEMP_HUM_SAVE_BUTTON_Y BACK_BUTTON_Y
// Botones de confirmación de guardado de datos
#define CONFIRM_BUTTON_WIDTH 80
#define CONFIRM_BUTTON_HEIGHT 30
#define CONFIRM_BUTTON_X 30
#define CONFIRM_BUTTON_Y 150
#define CANCEL_BUTTON_X (myGLCD.getDisplayXSize() - CONFIRM_BUTTON_X -
CONFIRM_BUTTON_WIDTH)
// Pin de chip select para la tarjeta SD
#define SD_CS_PIN 53
enum Screen {
    MAIN_MENU,
    SENSOR_1_MENU,
    SENSOR_2_MENU,
    SENSOR_3_MENU,

```

```

    SENSOR_1_GRAPH,
    SENSOR_2_GRAPH,
    SENSOR_3_GRAPH,
    CONFIRMATION_SCREEN,
    MESSAGE_SCREEN,
    TEMP_HUM_MENU
};

Screen currentScreen = MAIN_MENU;
bool saveData = false;
File dataFile;

// Matrices para almacenar datos del gráfico
const int graphWidth = 260;
float voltageData[graphWidth];
int dataIndex = 0;
unsigned long startTime = 0;

// Pines analógicos para la humedad y temperatura
const int pinHumedad = A2;
const int pinTemperatura = A3;

// Constante de referencia de resistencia para el termistor
const float resistenciaReferencia = 54.0;

// Función para leer la humedad
float leerHumedad(int pin) {
    // Leer el valor analógico del pin de humedad
    int valorAnalogico = analogRead(pin);

    // Calcular la humedad relativa usando la ecuación común
    float humedad = ((valorAnalogico * (5.0 / 3.3)) / 10.24);
    return humedad;
}

// Función para leer la temperatura
float leerTemperatura(int pin) {
    // Leer el valor analógico del pin A3 que corresponde a temperatura
    int valorAnalogico = analogRead(pin);
    // Calcular var2
    int var2 = 1024 - valorAnalogico;
    // Calcular la resistencia
    float resistencia = (resistenciaReferencia * var2) / (1024.0 - var2);
    // Calcular Ln_Resist
    float lnResist = log(resistencia);

```

```

    // Calcular Ln_Resist^3
    float lnResist3 = lnResist * lnResist * lnResist;
    // Calcular la temperatura en Celsius usando la ecuación proporcionada
    float tempK = 1.0 / (0.00237531 + 0.00024632 * lnResist + 0.00000028 *
lnResist3);
    float temperaturaC = tempK - 273.15;
    return temperaturaC;
}

void drawButton(int x, int y, int width, int height, const char *label) {
    myGLCD.setColor(255,255,0); // Color azul para el botón
    myGLCD.fillRoundRect(x, y, x + width, y + height);
    myGLCD.setColor(0,0,0); // Color blanco para el texto
    myGLCD.setBackColor(255,255,0);
    int textX = x + (width - myGLCD.getFontXsize() * strlen(label)) / 2;
    int textY = y + (height - myGLCD.getFontYsize()) / 2;
    myGLCD.print(label, textX, textY);
}

void drawBackButton() {
    myGLCD.setColor(0, 255, 0); // Color rojo para el botón de regresar
    myGLCD.fillRoundRect(BACK_BUTTON_X, BACK_BUTTON_Y, BACK_BUTTON_X +
BACK_BUTTON_WIDTH, BACK_BUTTON_Y + BACK_BUTTON_HEIGHT);
    myGLCD.setColor(0,0,0); // Color blanco para el texto
    myGLCD.setBackColor(0, 255, 0);
    int textX = BACK_BUTTON_X + (BACK_BUTTON_WIDTH - myGLCD.getFontXsize() *
12) / 5;
    int textY = BACK_BUTTON_Y + (BACK_BUTTON_HEIGHT - myGLCD.getFontYsize()) /
2;
    myGLCD.print("Regresar <=", textX, textY);
}

void drawMainMenu() {
    myGLCD.clrScr();
    myGLCD.setColor(255, 255, 255); // Color blanco para el texto
    myGLCD.setBackColor(0,0, 0); // Fondo negro
    myGLCD.print("<-TECNM-CAMPUS ORIZABA->", CENTER, 10);
    myGLCD.print("Red de Sensores de CO2", CENTER, 30);

    // Botones
    drawButton(BUTTON_X, BUTTON_Y, BUTTON_WIDTH, BUTTON_HEIGHT, "> Sensor 1");
    drawButton(BUTTON_X, BUTTON_Y + BUTTON_HEIGHT + BUTTON_SPACING,
BUTTON_WIDTH, BUTTON_HEIGHT, "> Sensor 2");
    drawButton(BUTTON_X, BUTTON_Y + 2 * (BUTTON_HEIGHT + BUTTON_SPACING),
BUTTON_WIDTH, BUTTON_HEIGHT, "> Temperatura-Humedad");
}

```

```

}

void drawSensorMenu() {
    myGLCD.clrScr();
    drawButton(BUTTON_X, BUTTON_Y, BUTTON_WIDTH, BUTTON_HEIGHT, "< Lectura
>");
    drawButton(BUTTON_X, BUTTON_Y + BUTTON_HEIGHT + BUTTON_SPACING,
BUTTON_WIDTH, BUTTON_HEIGHT, "< Guardar datos >");
    drawBackButton();
}

void drawTempHumMenu() {
    myGLCD.clrScr();
    // Títulos principales
    myGLCD.setColor(255, 255, 255); // Color blanco para el texto
    myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0); // Fondo negro
    myGLCD.print("Temperatura-Humedad", CENTER, 10);
    // Leyendas de temperatura y humedad
    myGLCD.print("Temperatura (C): ", LEFT, 60);
    myGLCD.print("Humedad Relativa (%): ", LEFT, 120);
    // Botón de guardar datos
    drawButton(BUTTON_X, BUTTON_Y + 2 * (BUTTON_HEIGHT + BUTTON_SPACING),
BUTTON_WIDTH, BUTTON_HEIGHT, "Guardar datos");
    // Botón de regresar
    drawBackButton();
}

void drawGraph(const char* title) {
    myGLCD.clrScr();
    myGLCD.setColor(255, 255, 255);
    myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0);
    myGLCD.print(title, CENTER, 10);

    // Contorno de la gráfica recuadro
    myGLCD.setColor(0, 255, 0);
    int graphX = 30, graphY = 50, graphHeight = 150;
    myGLCD.drawRect(graphX, graphY, graphX + graphWidth, graphY +
graphHeight);

    // Dibujar la leyenda del voltaje
    myGLCD.setColor(255, 255, 255); // Color blanco para el texto del voltaje
    myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0); // Fondo negro
    myGLCD.print("Voltaje (v): ", graphX, graphY + graphHeight + 10);

    // Dibujar la leyenda del tiempo

```

```

myGLCD.print("Tiempo (s): ", graphX, graphY + graphHeight + 25);

drawBackButton(); // Añadir botón de regresar en la gráfica
}

void updateGraph(float voltage, unsigned long seconds) {
    int graphX = 30, graphY = 50, graphHeight = 150;

    // Desplazar los datos
    for (int i = 0; i < graphWidth - 1; i++) {
        int y1 = graphY + graphHeight - (voltageData[i] / 5.0 * graphHeight);
        int y2 = graphY + graphHeight - (voltageData[i + 1] / 5.0 *
graphHeight);
        myGLCD.setColor(0, 0, 0); // Color negro para borrar la línea anterior
        myGLCD.drawLine(graphX + i, graphY, graphX + i, graphY + graphHeight);
        myGLCD.setColor(0, 255, 0); // Color verde para la nueva línea
        myGLCD.drawLine(graphX + i, y1, graphX + i + 1, y2);
    }
    // Actualizar el valor de voltaje
    myGLCD.setColor(255, 255, 255); // Color blanco para el texto del voltaje
    myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0); // Fondo negro
    myGLCD.printNumF(voltage, 2, 130, 210);

    // Actualizar el valor del tiempo
    myGLCD.printNumI(seconds, 130, 225);
}

void drawConfirmationScreen() {
    myGLCD.clrScr();
    myGLCD.setColor(255, 255, 255); // Blanco
    myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0); // Negro
    myGLCD.print("Desea guardar los datos?", CENTER, 100);

    drawButton(CONFIRM_BUTTON_X, CONFIRM_BUTTON_Y, CONFIRM_BUTTON_WIDTH,
CONFIRM_BUTTON_HEIGHT, "> Si");
    drawButton(CANCEL_BUTTON_X, CONFIRM_BUTTON_Y, CONFIRM_BUTTON_WIDTH,
CONFIRM_BUTTON_HEIGHT, "> No");
}

void drawMessageScreen(const char *message) {
    myGLCD.clrScr();
    myGLCD.setColor(255, 255, 255); // Blanco
    myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0); // Negro
    myGLCD.print(message, CENTER, 100);
    delay(2000); // Mostrar el mensaje durante 2 segundos
    currentScreen = MAIN_MENU;
}

```

```

    drawMainMenu();
}

void setup() {
    myGLCD.InitLCD();
    myGLCD.setFont(SmallFont);
    myTouch.InitTouch();
    myTouch.setPrecision(PREC_MEDIUM);

    // Inicializar la tarjeta SD
    if (!SD.begin(SD_CS_PIN)) {
        drawMessageScreen("Error al inicializar la SD");
        return;
    }
    drawMainMenu();
}

void loop() {
    if (myTouch.dataAvailable()) {
        myTouch.read();
        int x = myTouch.getX();
        int y = myTouch.getY();

        switch (currentScreen) {
            case MAIN_MENU:
                if (x >= BUTTON_X && x <= BUTTON_X + BUTTON_WIDTH) {
                    if (y >= BUTTON_Y && y <= BUTTON_Y + BUTTON_HEIGHT) {
                        currentScreen = SENSOR_1_MENU;
                        drawSensorMenu();
                    } else if (y >= BUTTON_Y + BUTTON_HEIGHT + BUTTON_SPACING && y <=
BUTTON_Y + 2 * BUTTON_HEIGHT + BUTTON_SPACING) {
                        currentScreen = SENSOR_2_MENU;
                        drawSensorMenu();
                    } else if (y >= BUTTON_Y + 2 * (BUTTON_HEIGHT + BUTTON_SPACING) &&
y <= BUTTON_Y + 3 * BUTTON_HEIGHT + 2 * BUTTON_SPACING) {
                        currentScreen = TEMP_HUM_MENU;
                        drawTempHumMenu();
                    }
                }
                break;
            case SENSOR_1_MENU:
            case SENSOR_2_MENU:
            case SENSOR_3_MENU:
                if (x >= BUTTON_X && x <= BUTTON_X + BUTTON_WIDTH) {
                    if (y >= BUTTON_Y && y <= BUTTON_Y + BUTTON_HEIGHT) {

```

```

        if (currentScreen == SENSOR_1_MENU) {
            currentScreen = SENSOR_1_GRAPH;
            drawGraph("* COMPORTAMIENTO DEL SENSOR 1 *");
            startTime = millis();
        } else if (currentScreen == SENSOR_2_MENU) {
            currentScreen = SENSOR_2_GRAPH;
            drawGraph("* COMPORTAMIENTO DEL SENSOR 2 *");
            startTime = millis();
        }
    } else if (y >= BUTTON_Y + BUTTON_HEIGHT + BUTTON_SPACING && y <=
BUTTON_Y + 2 * BUTTON_HEIGHT + BUTTON_SPACING) {
        currentScreen = CONFIRMATION_SCREEN;
        drawConfirmationScreen();
    }
    } else if (x >= BACK_BUTTON_X && x <= BACK_BUTTON_X +
BACK_BUTTON_WIDTH && y >= BACK_BUTTON_Y && y <= BACK_BUTTON_Y +
BACK_BUTTON_HEIGHT) {
        currentScreen = MAIN_MENU;
        drawMainMenu();
    }
    break;

    case TEMP_HUM_MENU:
        if (x >= BUTTON_X && x <= BUTTON_X + BUTTON_WIDTH && y >= BUTTON_Y +
2 * (BUTTON_HEIGHT + BUTTON_SPACING) && y <= BUTTON_Y + 3 * BUTTON_HEIGHT +
2 * BUTTON_SPACING) {
            currentScreen = CONFIRMATION_SCREEN;
            drawConfirmationScreen();
        } else if (x >= BACK_BUTTON_X && x <= BACK_BUTTON_X +
BACK_BUTTON_WIDTH && y >= BACK_BUTTON_Y && y <= BACK_BUTTON_Y +
BACK_BUTTON_HEIGHT) {
            currentScreen = MAIN_MENU;
            drawMainMenu();
        }
        break;

    case SENSOR_1_GRAPH:
    case SENSOR_2_GRAPH:
    case SENSOR_3_GRAPH:
        if (x >= BACK_BUTTON_X && x <= BACK_BUTTON_X + BACK_BUTTON_WIDTH &&
y >= BACK_BUTTON_Y && y <= BACK_BUTTON_Y + BACK_BUTTON_HEIGHT) {
            if (currentScreen == SENSOR_1_GRAPH) {
                currentScreen = SENSOR_1_MENU;
            } else if (currentScreen == SENSOR_2_GRAPH) {
                currentScreen = SENSOR_2_MENU;
            }
        }
    }
}

```

```

    } else if (currentScreen == SENSOR_3_GRAPH) {
        currentScreen = SENSOR_3_MENU;
    }
    drawSensorMenu();
}
break;

case CONFIRMATION_SCREEN:
    if (x >= CONFIRM_BUTTON_X && x <= CONFIRM_BUTTON_X +
CONFIRM_BUTTON_WIDTH && y >= CONFIRM_BUTTON_Y && y <= CONFIRM_BUTTON_Y +
CONFIRM_BUTTON_HEIGHT) {
        saveData = true;
        currentScreen = MESSAGE_SCREEN;
        drawMessageScreen("Datos guardados!");
    } else if (x >= CANCEL_BUTTON_X && x <= CANCEL_BUTTON_X +
CONFIRM_BUTTON_WIDTH && y >= CONFIRM_BUTTON_Y && y <= CONFIRM_BUTTON_Y +
CONFIRM_BUTTON_HEIGHT) {
        saveData = false;
        currentScreen = MESSAGE_SCREEN;
        drawMessageScreen("Guardado cancelado");
    }
    break;

default:
    break;
}
}

if (currentScreen == SENSOR_1_GRAPH || currentScreen == SENSOR_2_GRAPH ||
currentScreen == SENSOR_3_GRAPH) {
    unsigned long currentTime = millis();
    unsigned long elapsedTime = (currentTime - startTime) / 1000;

    int sensorPin = (currentScreen == SENSOR_1_GRAPH) ? A0 : A1; // Define
el pin del sensor correspondiente
    float voltage = analogRead(sensorPin) * (5.0 / 1023.0) - 0.18;

    updateGraph(voltage, elapsedTime);
    voltageData[dataIndex] = voltage;

    dataIndex = (dataIndex + 1) % graphWidth; //Esta línea hace que la
gráfica avance

    if (saveData) {
        String filename = "voltaje.csv";

```

```

    dataFile = SD.open(filename.c_str(), FILE_WRITE);
    if (dataFile) {
        dataFile.print(elapsedTime);
        dataFile.print(",");
        dataFile.println(voltage);
        dataFile.close();
    } else {
        drawMessageScreen("Error al abrir archivo");
    }
}
delay(1000); // Retardo de 1 segundo entre lecturas
}

if (currentScreen == TEMP_HUM_MENU) {
    float temperatura = leerTemperatura(pinTemperatura);
    float humedad = leerHumedad(pinHumedad);

    // Borrar las áreas de los valores anteriores
    myGLCD.setColor(0, 0, 0);
    myGLCD.fillRect(210, 60, 310, 80);
    myGLCD.fillRect(230, 120, 330, 140);

    // Actualizar los valores de temperatura y humedad
    myGLCD.setColor(255, 255, 255); // Blanco
    myGLCD.setBackgroundColor(0, 0, 0); // Negro
    myGLCD.printNumF(temperatura, 2, 210, 60);
    myGLCD.printNumF(humedad, 2, 210, 120);

    if (saveData) {
        String filename = "temphum.csv";
        dataFile = SD.open(filename.c_str(), FILE_WRITE);
        if (dataFile) {
            dataFile.print(temperatura);
            dataFile.print(",");
            dataFile.println(humedad);
            dataFile.close();
            saveData = false; // Resetear el indicador de guardar datos después
de guardar
        } else {
            drawMessageScreen("Error al abrir archivo");
        }
    }
    delay(1000); // Retardo de 1 segundo entre actualizaciones
}
}
}

```