



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Facultad de Ingeniería
y Ciencias
Ingeniería Electrónica

Monografía de Trabajo de Grado

“Desarrollo y Validación de un Anemómetro de Filamento de Grafeno Inducido por Láser a escala milimétrica para Aplicaciones de Monitoreo”.

***Manuel Francisco Castillo Vallejo
Juan Esteban Libreros Bedoya***

***Director
Dr. Sammy Perdomo***

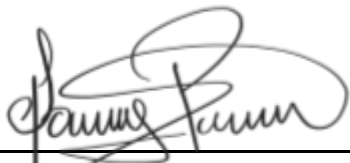
***Co - Director
Dr. Andrés Jaramillo Botero***

Nota de Aceptación

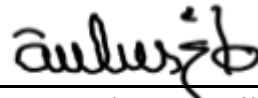
Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Dr. Hernán Camilo Rocha Niño
Decano Facultad de Ingeniería y Ciencias

Dr. Luis Eduardo Tobón
Director Carrera Ingeniería Electrónica



Dr. Sammy Perdomo Director
Trabajo de Grado



Dr. Andrés Jaramillo
Co-Director Trabajo de Grado

Dra. Natalia Polo Moreno
Jurado 1

Dr. Luis E. Tobón
Jurado 2

Santiago de Cali, 08 de Mayo de 2026

Señores
Pontificia Universidad Javeriana –
Cali Dr. Hernán Camilo Rocha Niño
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Ciudad

Cordial saludo.

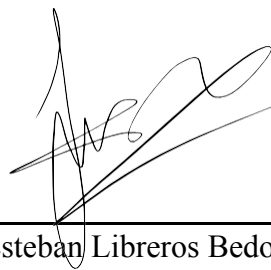
Por medio de la presente nos permitimos presentarle el Trabajo de Grado titulado “*Desarrollo y Validación de un Anemómetro de Filamento de Grafeno Inducido por Láser a escala milimétrica para Aplicaciones de Monitoreo*”.

Esperamos que este trabajo reúna todos los requisitos académicos, cumpla el propósito para el cual fue creado y sirva de apoyo para futuros proyectos relacionados con la materia.

Atentamente,



Manuel Francisco Castillo Vallejo



Juan Esteban Liberos Bedoya

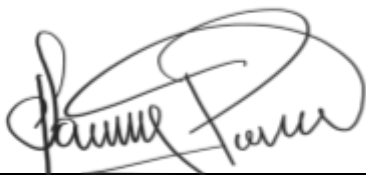
Santiago de Cali, 08 de Mayo de 2026

Señores
Pontificia Universidad Javeriana –
Cali Dr. Hernán Camilo Rocha Niño
Decano
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Ciudad

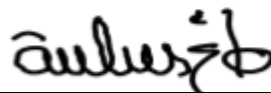
Cordial Saludo.

Certificamos que el presente Trabajo de Grado titulado “*Desarrollo y Validación de un Anemómetro de Filamento de Grafeno Inducido por Láser a escala milimétrica para Aplicaciones de Monitoreo*”, realizado por Manuel Francisco Castillo y Juan Esteban Libreros, estudiantes de Ingeniería Electrónica, se encuentra terminado y puede ser presentado para su sustentación.

Atentamente,



Dr. Sammy A. Perdomo
Director Trabajo de Grado



Dr. Andrés Jaramillo
Co-Director Trabajo de Grado

AGRADECIMIENTOS

- Manuel Francisco Castillo Vallejo

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia y amigos cercanos, cuyo apoyo emocional y valiosos consejos fueron fundamentales para transitar esta etapa académica y culminar este proyecto. En especial, agradezco a mi padre, el Dr. Juan Manuel Castillo García, por su amor incondicional, su confianza y su respaldo constante.

Extiendo también mi gratitud al director de este trabajo de grado, el Dr. Sammy A. Perdomo, por su guía, dedicación y compromiso a lo largo de este proceso, que representó la culminación de mi formación como Ingeniero Electrónico.

Adicionalmente, agradezco a la Pontificia Universidad Javeriana, al Instituto Ómicas y al Dr. Andrés Jaramillo, por hacer posible el desarrollo de este proyecto, brindando los espacios, recursos y herramientas necesarias para su adecuada ejecución.

Por último, agradezco a la vida y a su ser por darme esta oportunidad.

- Juan Esteban Libreros Bedoya

Agradezco primeramente a Dios y a la vida por permitirme culminar esta etapa académica, brindándome la fortaleza y el entusiasmo necesarios para superar cada reto del camino.

A mis padres, por su amor incondicional, por ser ejemplo constante de esfuerzo y perseverancia, y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. A mi familia, por su apoyo emocional y por estar presentes de manera silenciosa pero firme durante todo este proceso.

Expreso mi sincero agradecimiento a mi director de trabajo de grado, Sammy Perdomo, por su guía académica, por compartir sus conocimientos con paciencia y dedicación, y por impulsar mi pensamiento crítico y técnico. Su orientación fue fundamental para el desarrollo riguroso y profesional de este proyecto.

Agradezco también al Instituto de Investigación Ómicas de la Pontificia Universidad Javeriana Cali por facilitar los espacios, equipos y materiales necesarios para la ejecución experimental del sistema. Cada prueba realizada y cada avance alcanzado fue posible gracias a su infraestructura y apoyo técnico.

Finalmente, a todos quienes, de manera directa o indirecta, contribuyeron a que esta investigación se hiciera realidad: gracias por formar parte de este logro.

GLOSARIO

Símbolos

ΔT Representa el cambio o diferencia de temperatura entre dos estados de un sistema.

Q Calor absorbido o liberado.

C_p Capacidad calorífica específica.

$\frac{dV}{dt}$ Derivada de V respecto a t.

V_{i+1} Valor de V en el instante siguiente.

V_i Valor de V en el instante actual.

Δt Intervalo de tiempo entre dos muestras consecutivas.

Acrónimos y Abreviaturas

GEI - Gases de efecto invernadero.

IEEE - The Institute of Electrical and Electronic Engineers.

IoT - Internet of Things.

LIG - Laser-Induced Graphene.

TRL - Technology Readiness Level

PCB - Printed Circuit Board.

ADC- Convertidor análogo a digital.

GO - Graphene Oxide.

MUX - Multiplexer.

Transistor NPN - Negativo-Positivo-Negativo.

TIA - Transimpedance Amplifier.

VCC - Common Collector Voltage.

VEE - Voltage at the Common Emitter.

GND - Ground.

Puerto USB - Universal Serial Bus.

SAMD21 - "SAM" Smart ARM Microcontroller.

RESUMEN

Una oportunidad latente para la aplicación de sistemas electrónicos se encuentra en la ganadería y la agricultura de precisión, donde la recolección continua de variables físicas ambientales resulta fundamental para la toma de decisiones. Entre estas variables, el estudio del viento y su comportamiento espacial —en términos de presencia, dirección y velocidad— constituye un parámetro crítico para el análisis microclimático y la optimización de procesos productivos.

No obstante, la medición del flujo de aire continúa representando un desafío tecnológico cuando se requieren dispositivos adaptados a entornos abiertos y distribuidos, con especificaciones estrictas de bajo consumo energético, alta escalabilidad, dimensiones físicas no invasivas (peso y tamaño reducidos), facilidad de integración electrónica y métodos de adquisición de datos simples y robustos. Adicionalmente, estos sistemas deben operar de forma autónoma y confiable, minimizando la necesidad de mantenimiento e intervención humana.

Los anemómetros comerciales disponibles en el mercado no satisfacen simultáneamente estos requerimientos, ya que suelen ser costosos, voluminosos y dependientes de componentes mecánicos, lo que limita su miniaturización, portabilidad y aplicación en sistemas integrados de monitoreo ambiental en tiempo real. Estas limitaciones evidencian la necesidad de desarrollar soluciones alternativas.

En respuesta a esta problemática, el presente trabajo de grado aborda el diseño, desarrollo y validación de un anemómetro sin partes móviles a escala milimétrica, basado en un arreglo de ocho filamentos de óxido de grafeno inducido por láser (LIG), distribuidos geométricamente en tres sectores independientes para la adquisición de información en múltiples direcciones.

El principio de funcionamiento de la solución propuesta se fundamenta en el efecto Joule, mediante el cual resistencias calefactadas GO experimentan variaciones térmicas al interactuar con el flujo de aire. Dichas variaciones se traducen en cambios medibles de voltaje, los cuales son adquiridos mediante un sistema de acondicionamiento analógico y conversión analógico-digital. El procesamiento de múltiples registros promediados permite inferir de manera confiable la presencia, dirección y magnitud del flujo de aire.

A diferencia de los anemómetros convencionales, el sistema desarrollado se caracteriza por la ausencia de partes móviles, bajo peso, dimensiones físicas reducidas y bajo costo de fabricación, además del uso de una tecnología emergente de alta sensibilidad como el grafeno inducido por láser. Estas características posicionan al prototipo como una alternativa viable para aplicaciones portátiles y sistemas de monitoreo distribuido.

Adicionalmente, la fabricación de los sensores LIG en el laboratorio del Instituto iÓmicas constituye un aporte relevante al aprovechamiento de este material en el desarrollo de dispositivos funcionales. Si bien el LIG ha sido ampliamente estudiado en sensores de gases y temperatura, su implementación en un anemómetro térmico representa una aplicación innovadora que amplía su campo de uso y abre nuevas posibilidades para el estudio de fenómenos físicos y el desarrollo de futuros prototipos de monitoreo.

Los resultados experimentales evidenciaron una respuesta diferencial clara entre los sensores del arreglo ante variaciones en la dirección y magnitud del flujo de aire. La relación entre la señal eléctrica adquirida y la velocidad del viento mostró un comportamiento aproximadamente lineal dentro del rango experimental, validado mediante ajustes por mínimos cuadrados. Asimismo, el sistema presentó una repetibilidad relativa adecuada entre mediciones consecutivas, con desviaciones atribuibles principalmente a variaciones en la fabricación de los filamentos LIG, efectos térmicos del sustrato y uso continuo.

Las pruebas se realizaron en un entorno controlado, lo que constituye la principal limitación del estudio, dado que el desempeño del sistema aún no ha sido validado bajo condiciones reales de campo, donde variables ambientales adicionales como humedad, turbulencia y fluctuaciones térmicas pueden afectar la respuesta del sensor.

En conjunto, los resultados confirman la viabilidad de los sensores LIG para aplicaciones de monitoreo ambiental en tiempo real, destacando su potencial de integración en tecnologías portátiles de bajo costo y dimensiones reducidas. No obstante, como retos persistentes se identifican la mejora en la reproducibilidad entre sensores, con el fin de reducir la necesidad de calibraciones individuales, la optimización del consumo energético, y el establecimiento de un protocolo de estabilización del LIG que permita retardar su oxidación frente al ambiente y minimizar fluctuaciones en las mediciones a largo plazo.

Palabras clave: Óxido de grafeno inducido por láser, anemómetro sin partes móviles, sensores termorresistivos, monitoreo ambiental, efecto Joule.

ABSTRACT

A latent opportunity for the application of electronic systems lies in precision livestock farming and agriculture, where the continuous acquisition of environmental physical variables is essential for informed decision-making. Among these variables, the study of wind and its spatial behavior—in terms of presence, direction, and velocity—constitutes a critical parameter for microclimatic analysis and the optimization of productive processes.

Nevertheless, airflow measurement continues to represent a technological challenge when devices are required to operate in open and distributed environments, under strict specifications such as low power consumption, high scalability, non-invasive physical dimensions (reduced size and weight), ease of electronic integration, and simple yet robust data acquisition methods. Additionally, these systems must operate autonomously and reliably, minimizing the need for maintenance and human intervention.

Commercially available anemometers do not simultaneously meet these requirements, as they are typically costly, bulky, and dependent on mechanical components. These characteristics limit their miniaturization, portability, and applicability in integrated real-time environmental monitoring systems, thereby highlighting the need for alternative solutions.

In response to this challenge, this undergraduate thesis addresses the design, development, and validation of a millimeter-scale, non-mechanical anemometer based on an array of eight LIG filaments, geometrically distributed into three independent sectors for multidirectional data acquisition.

The operating principle of the proposed solution is based on the Joule effect, whereby heated graphene oxide resistors undergo thermal variations when interacting with airflow. These variations translate into measurable voltage changes, which are acquired through an analog signal conditioning stage and analog-to-digital conversion. The processing of multiple averaged records enables reliable inference of the presence, direction, and magnitude of the airflow.

Unlike conventional anemometers, the developed system is characterized by the absence of moving parts, low weight, reduced physical dimensions, and low manufacturing cost, in addition to the use of an emerging high-sensitivity technology such as laser-induced graphene. These features position the prototype as a viable alternative for portable applications and distributed monitoring systems.

Furthermore, the fabrication of the LIG sensors in the laboratories of the iÓmicas Institute represents a relevant contribution to the practical exploitation of this material in functional device development. While LIG has been extensively studied in gas and temperature sensors, its implementation in a thermal anemometer constitutes an innovative application that expands its field of use and opens new possibilities for the study of physical phenomena and the development of future monitoring prototypes.

Experimental results demonstrated a clear differential response among the sensors in the array when subjected to variations in airflow direction and magnitude. The relationship between the acquired electrical signal and wind velocity exhibited an approximately linear behavior within the experimental range, validated through least-squares fitting. Additionally, the system showed adequate relative repeatability between consecutive measurements, with deviations mainly attributed to variations in LIG filament fabrication, thermal effects of the substrate, and continuous operation.

The experiments were conducted in a controlled environment, which constitutes the main limitation of the study, as the system's performance has not yet been validated under real field conditions, where additional environmental variables such as humidity, turbulence, and thermal fluctuations may influence sensor response.

Overall, the results confirm the feasibility of LIG-based sensors for real-time environmental monitoring applications, highlighting their potential integration into low-cost, portable technologies with reduced physical dimensions. However, persistent challenges include improving sensor-to-sensor reproducibility to reduce the need for individual calibration, optimizing power consumption, and establishing a stabilization protocol for LIG to delay environmental oxidation and minimize long-term measurement fluctuations.

Keywords: Laser-induced graphene oxide, Non-mechanical anemometer, Thermo-resistive sensors, Environmental monitoring, Joule effect.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción.....	17
2. Planteamiento del Problema.....	19
3. Justificación	24
3.1. Alcances.....	24
3.2. Pregunta de Investigación.....	26
4. Objetivos	
4.1. Objetivo General.....	27
4.2. Objetivos Específicos.....	27
5. Marco de Referencia.....	28
5.1. Áreas Temáticas.....	28
5.2. Marco Teórico.....	29
5.3. Estado del Arte.....	33
6. Materiales y Métodos.....	37
6.1. Metodología.....	37
6.2. Implementación del grafeno inducido por láser (LIG).....	37
6.3. Desarrollo del Sistema.....	42
6.3.1. Sensores de óxido de grafeno.....	43
6.3.2. Componentes Electrónicos.....	56
6.3.3. Adquisición de Señales.....	62
6.3.4. Procesamiento de los datos.....	66
6.3.5. Placa de Circuito Impreso.....	74
6.3.6. Representación de los datos.....	77
7. Resultados y Discusión.....	81
7.1. Resultados.....	81
7.2. Caracterización Cuantitativa del Sistema.....	106
7.3. Discusiones.....	111
8. Conclusiones.....	113
9. Recomendaciones.....	115
10. Anexos.....	117
Anexo 1 – Diagrama de Subsistemas	117

<i>Anexo 2 – Diseño esquemático del circuito</i>	117
<i>11. Bibliografía</i>	118

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Estación meteorológica compacta GMX200 (Fuente [7])	20
1. Anemómetro ultrasónico 3D. (Fuente [8])	20
1. Anemómetro portátil con parte móvil. (Fuente [9])	21
1. Anemómetro con partes móviles, cazoletas. (Fuente [10])	21
1. Anemómetro de sonda térmica. (Fuente [11])	22
1. Anemómetro de Veleta magnética. (Fuente [12])	23
5.2. Estructura molecular del grafeno (Fuente [18]).	30
5.2. Estructura molecular de óxido de grafeno (Fuente [20]).	30
5.3. Micro calentador en cama térmica (Fuente [22]).	34
5.3. Sensor de estructura diferencial (Fuente [27]).	34
5.3. Micro-Anemómetro de cuatro hilos con forma de doble cruz (Fuente [28]).	35
5.3. LIG estructura porosa. (Fuente [29]).	36
6.2. Trazado superficial de óxido de grafeno	38
6.2. Estructura porosa del material	39
6.2. Vista Transversal LIG.	40
6.2. Espectrograma Raman LIG	41
6.3.1. Propuesta de diseño de forma serpenteante	49
6.3.1. Propuesta de diseño geométrico	50
6.3.1. Propuesta de diseño de líneas rectas.	50
6.3.1. Propuesta de diseño final.	51
6.3.1. Diseño del arreglo de resistencias	52
6.3.1. Resistencia Impresas bajo una película de poliimida	53
6.3.1. Nuevo arreglo de resistencias	54
6.3.2. Representación esquemática de conexiones, transistor bipolar NPN	56
6.3.2. Pinout del Arduino Nano 33 IoT	57
6.3.2. Diagrama de conexión amplificador Transimpedancia	59
6.3.2. Diagrama de conexión amplificador Inversor	61
6.3.3. Visualización de datos en Arduino IDE	63
6.3.4. Visualización de datos en formato .txt.	67
6.3.4. Perspectiva Superior del modelo en TinkerCad	69
6.3.4. Perspectiva Inferior del modelo en TinkerCad	69

6.3.4. Figura impresa y equipada	70
6.3.4. Datos de las Magnitudes relacionadas Sensor 1	73
6.3.4. Gráfica de Ajuste Lineal Sensor 1	73
6.3.4. Estadísticas del sistema Matemático sensor 1	74
6.3.5. Diseño esquemático del circuito	75
6.3.5. Diseño en la placa física	77
6.3.6. Interfaz de usuario	77
6.3.6. Sección de Identificación de presencia de viento	78
6.3.6. Sección de Visualización de la magnitud del viento	78
6.3.6. Sección de Resultados por sector	79
7.1. Gráfica de los datos; Sensor sin presencia de viento	82
7.1. Gráfica de presencia de viento a diferentes voltajes	83
7.1. Señales filtradas	84
7.1. Gráfica de la Derivada Instantánea sin viento	85
7.1. Estadísticas de la señal	85
7.1. Gráfica de la Derivada Instantánea con viento	86
7.1. Estadísticas de la señal	86
7.1. Variabilidad en respuesta del sensor uno	88
7.1. Variabilidad en respuesta del sensor ocho	89
7.1. Variabilidad en respuesta del sensor siete	90
7.1. Variabilidad en respuesta del sensor dos	91
7.1. Variabilidad en respuesta del sensor seis	92
7.1. Variabilidad en respuesta del sensor tres	93
7.1. Variabilidad en respuesta del sensor cuatro	94
7.1. Variabilidad en respuesta del sensor cinco.	95
7.1. Modelado del comportamiento del sistema	97
7.1. Prototipo totalmente soldado	98
7.1. Registro del peso del sistema	99
7.1. Visualización datos en 0V.	100
7.1. Sección de presencia de viento a 0V	101
7.1. Dirección del viento	101
7.1. Dirección de viento a 15V	102
7.1. Dirección de viento a 9V	103

7.1. Registro de magnitudes del sensor 5 en 0V	104
7.1. Registro de magnitudes del sensor 5 en 9V	105
7.1. Registro de magnitudes del sensor 5 en 12V	105
7.1. Registro de magnitudes del sensor 5 en 15V	105

ÍNDICE DE CUADROS

3.1.1. Nivel de maduración tecnológica según el entorno teórico. (Fuente [15]).	25
6.3.1. Valores de resistencia a diferentes longitudes.	52
6.3.1. Valores de temperatura alcanzada.. . . .	56
6.3.4. Valores registrados con el anemómetro digital.. . . .	71
7.1. Magnitud de viento referenciada Sector 3.	104
7.2. Valores de sensibilidad por Sensor, Sector y Promedio.	107
7.2. Especificaciones técnicas del prototipo de anemómetro.	110
7.3. Contraste de características de los anemómetros.	111

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el desarrollo de sensores precisos, compactos y adaptables representa una necesidad clave para el avance de aplicaciones de monitoreo ambiental, automatización inteligente y dispositivos portátiles. Particularmente, la medición del flujo de aire —en términos de dirección y velocidad— exige soluciones cada vez más miniaturizadas y robustas, capaces de operar en entornos complejos con bajo consumo energético, mínima dependencia de componentes mecánicos y posibilidad de integración en sistemas “wearables” [1]. Sin embargo, el mercado actual presenta una disponibilidad limitada de anemómetros que combinen alta sensibilidad, bajo costo y dimensiones reducidas a escala milimétrica, lo que plantea una oportunidad para el desarrollo de dispositivos innovadores que respondan a estas demandas.

Con el fin de dar respuesta a las limitaciones identificadas en el desarrollo de anemómetros miniaturizados, diversas investigaciones recientes han explorado alternativas basadas en nanomateriales y técnicas de microfabricación para el desarrollo de sensores ambientales avanzados. Se destacan los estudios sobre microcalentadores flexibles obtenidos mediante escritura láser y sensores diferenciales con óxido de grafeno orientados a la medición de variables como humedad y temperatura [2]. Asimismo, las aplicaciones emergentes del LIG han demostrado su viabilidad en el diseño de sensores flexibles de gases y temperatura, resaltando su bajo costo, reproducibilidad y compatibilidad con procesos de fabricación a gran escala [3]. Estos avances ponen de relieve el potencial del grafeno y del LIG en la construcción de dispositivos sensibles, económicos y adaptables, sin embargo, aún no se ha explorado su aplicación en el diseño de anemómetros miniaturizados, lo que constituye la brecha que motiva el presente proyecto.

Ante este panorama, el presente proyecto plantea el diseño y validación de un anemómetro, construido a partir de las tecnologías mencionadas. El principio de funcionamiento se fundamenta en el efecto Joule, mediante el cual resistencias calefactadas basadas en GO responden a variaciones térmicas producidas por el paso del flujo de aire. El objetivo general de este trabajo consiste en diseñar y validar un sistema electrónico basado en este principio, capaz de medir el flujo de aire mediante un dispositivo compacto, sensible y de bajo costo.

La metodología aplicada se desarrolló bajo un enfoque de ingeniería práctica, estructurada en seis subsistemas interdependientes. Este esquema modular permitió abordar de manera ordenada cada etapa del proyecto, facilitando su validación experimental y la comprensión integral del sistema. En cuanto a los fundamentos teóricos, el proyecto se sustenta en la aplicación del efecto Joule como principio de funcionamiento, el empleo del grafeno inducido por láser como material sensor, y los conceptos de adquisición de señales analógicas, junto con técnicas de filtrado y procesamiento de datos que permiten convertir magnitudes físicas en parámetros eléctricos.

Finalmente, este documento se organiza en nueve capítulos. El Capítulo 1 presenta la descripción general del proyecto. El Capítulo 2 expone el planteamiento del problema, seguido del Capítulo 3 con la justificación y los alcances. El Capítulo 4 desarrolla los objetivos del trabajo, mientras que el Capítulo 5 aborda el marco teórico y referencial. El Capítulo 6 describe la metodología empleada y el proceso de implementación técnica. El Capítulo 7 detalla los resultados obtenidos y su análisis, y los Capítulos 8 y 9 contienen las conclusiones y recomendaciones derivadas de la evaluación del sistema.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las actividades humanas han desencadenado un incremento sostenido en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, lo cual ha acelerado el calentamiento global y el cambio climático, generando impactos negativos en los ecosistemas, el clima y las comunidades humanas alrededor del mundo. Desde 1880, las emisiones de GEI han seguido una tendencia al alza, elevando la temperatura media global en más de 1,4 °C. Este aumento ha sido especialmente drástico desde 1970, intensificándose hasta la actualidad. [4].

En este contexto, el monitoreo ambiental de variables como el flujo de aire, la temperatura y la humedad se vuelve fundamental para comprender y mitigar los efectos adversos del cambio climático. En este orden de ideas, la implementación de sistemas de monitoreo ambiental no solo proporciona información en tiempo real sobre las condiciones del entorno, sino que también permite a los actores involucrados anticipar eventos extremos y adaptar sus estrategias de manejo de manera oportuna [5]. Además, el seguimiento continuo de estas variables facilita la identificación de patrones y tendencias asociadas al cambio climático, contribuyendo a la toma de decisiones informadas tanto a corto como a largo plazo. De este modo, el monitoreo ambiental emerge como una herramienta clave para fortalecer la resiliencia y la sostenibilidad de las actividades humanas frente a la variabilidad y por supuesto, a los riesgos ambientales actuales y futuros.

La problemática expuesta evidencia la urgencia de contar con herramientas tecnológicas capaces de brindar información confiable y oportuna sobre las condiciones ambientales, lo que supone un desafío tanto en términos de desarrollo como de selección de dispositivos apropiados. Un ejemplo actual es el proyecto realizado por iÓmicas, “PhenoAgro” es una estación IoT para el análisis y caracterización de cultivos a partir de la medición en tiempo real de variables críticas como la temperatura, la humedad, el pH del suelo, los nutrientes, especialmente, la velocidad y dirección del viento. Sistemas como “PhenoAgro” permiten a los agricultores mejorar la toma de decisiones sobre el manejo de los cultivos, nutrición, riego, cosecha, al proporcionar información georreferenciada y de alta resolución sobre el entorno. Estos sistemas de monitoreo hacen posible la supervisión y la correlación de variables ambientales con la productividad y el estado fisiológico de los cultivos, demostrando el impacto tangible que el monitoreo ambiental tiene sobre la eficiencia, sostenibilidad y sustentabilidad de la agricultura moderna. [6].

Bajo esta perspectiva, y atendiendo a la importancia de fundamentar técnicamente la toma de decisiones, se procedió a realizar una revisión exhaustiva de los anemómetros comerciales disponibles en el mercado, clasificándolos conforme a su tecnología de funcionamiento. Esta aproximación metodológica permitió analizar de manera comparativa las ventajas, limitaciones y pertinencia de cada alternativa frente a los requerimientos específicos del

sistema propuesto, garantizando así un proceso de selección basado en criterios objetivos y alineado con las exigencias actuales de monitoreo ambiental.

- *Tecnología Ultrasónica*

GMX200 Compact Weather Station: Estación meteorológica de alta precisión que utiliza tecnología ultrasónica para medir la velocidad y dirección del viento sin partes móviles, lo que la hace ideal para condiciones exigentes y de bajo mantenimiento. [7].



Figura 1. Estación meteorológica compacta GMX200.

Fuente: Tomado de [7].

FST200-209 3D: Sensor de diseño avanzado para medir la velocidad y dirección del viento en tres dimensiones, empleando tecnología ultrasónica sin partes móviles. Gracias a este principio de funcionamiento, el dispositivo ofrece alta precisión, rápida respuesta y un mantenimiento prácticamente nulo. Su diseño permite captar variaciones del viento desde múltiples ángulos, facilitando la integración en sistemas de monitoreo avanzado. [8].

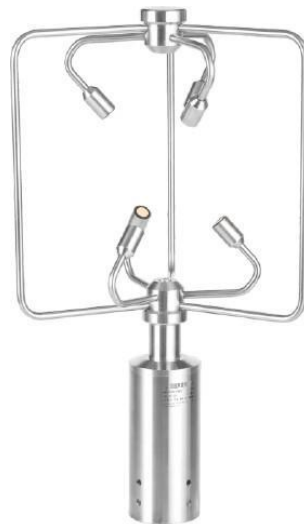


Figura 2. Anemómetro ultrasónico 3D.

Fuente: Tomado de [8].

- *Tecnología Mecánica (Con partes móviles)*

AM81 Portable Anemometer: Es un dispositivo compacto diseñado para medir de forma rápida y precisa la velocidad del aire en distintos entornos. Utiliza una rueda alada que detecta el flujo de aire y lo traduce en valores que pueden visualizarse en m/s y km/h. Adicionalmente incluye varias funciones extra como incorporar medición de temperatura ambiente, funciones de valor máximo y promedio en una pantalla digital de fácil lectura. [9].



*Figura 3. Anemómetro portátil con parte móvil.
Fuente: Tomado de [9].*

Anemómetro de cazoletas PCE-A420: Es un dispositivo portátil diseñado para medir la velocidad del viento mediante un sistema de cucharas giratorias, lo que le permite obtener lecturas precisas sin necesidad de orientar el sensor en una dirección específica. Su diseño compacto facilita su uso en distintas aplicaciones de campo, mientras que su pantalla digital y funciones de registro simplifican la visualización y almacenamiento de datos. Su funcionamiento mecánico ofrece una solución fiable y de fácil mantenimiento para el monitoreo de condiciones ambientales. [10].



Figura 4. Anemómetro con partes móviles, cazoletas.
Fuente: Tomado de [10].

- *Tecnología térmica*

El anemómetro de sonda térmica **PCE-HWA 30** utiliza un hilo caliente para medir la velocidad del viento, lo que permite un diseño compacto, con dimensiones de $70 \times 194 \times 35$ mm y un peso de 400 g. Su sonda telescópica de 740 mm, equipada con un cabezal giratorio, facilita la colocación óptima del sensor y permite realizar mediciones precisas en un rango de 0,3 a 30 m/s. El dispositivo cuenta con una batería recargable de 1000 mAh, lo que lo hace ideal para uso móvil. [11].



Figura 5. Anemómetro de sonda térmica.
Fuente: Tomado de [11].

El **anemómetro térmico Testo 405i**: Dispositivo portátil que emplea un sensor de hilo caliente para medir la velocidad del aire, el caudal y la temperatura. Su sonda telescópica de hasta 400 mm facilita la realización de mediciones en conductos y espacios de difícil acceso. Con un peso de 130 gramos y unas dimensiones de $200 \times 30 \times 41$ mm, destaca por ser ligero y compacto en comparación con otros anemómetros comerciales. [12].

- *Tecnología magnética*

PCE-WV A: Es un sensor de dirección de viento de principio magnético, diseñado para aplicaciones industriales y meteorológicas. Gracias a su medición magnética, elimina el desgaste mecánico y garantiza una larga vida útil sin necesidad de mantenimiento frecuente. Fabricado en aluminio y plástico técnico de alta resistencia, el sensor cuenta con un peso aproximado de 170 g. [13].



Figura 6. Anemómetro de Veleta magnética.
Fuente: Tomado de [13].

No obstante, al evaluar cada una de las propuestas se identificaron diversas incompatibilidades con los requerimientos generales del sistema. Las dimensiones, el peso y, sobre todo, el precio de los anemómetros comerciales analizados resultaron inadecuados para la aplicación prevista. En particular, se exige que el dispositivo no supere un tamaño a escala milimétrica y que su peso sea inferior a 100 gramos, lo cual llevó al descarte de las opciones investigadas.

Así, al identificar y analizar las limitaciones de los prototipos comerciales, planteamos la oportunidad de concebir, diseñar y evaluar un nuevo prototipo capaz de captar y sensar las características específicas del flujo gaseoso emitido. Ante este desafío, la innovación basada en el uso del grafeno inducido por láser surge como una alternativa prometedora. La capacidad del LIG para fabricar sensores térmicos, abre nuevas posibilidades para la miniaturización, la eficiencia y la viabilidad económica de estos sistemas, contribuyendo así al avance del monitoreo ambiental en un escenario de crisis climática global.

En síntesis, se destaca la necesidad de desarrollar un prototipo capaz de sensar las propiedades fundamentales del flujo de aire, procurando minimizar las dimensiones físicas del dispositivo y potencializando su implementación en diversos campos relacionados con el monitoreo de variables ambientales atribuidas al flujo de gases, todo ello a un precio inferior al de los dispositivos existentes en el mercado. Este proyecto se llevó a cabo en colaboración entre el *Instituto Ómicas* y la *Pontificia Universidad Javeriana de Cali*.

- *De esta manera, se espera que el sistema propuesto contribuya de forma significativa al avance de las tecnologías de monitoreo ambiental de bajo costo y tamaño milimétrico, con potencial de aplicación tanto en la agricultura de precisión como en el monitoreo climático, e incluso en el seguimiento de variables biológicas propias de la ganadería de precisión.*

JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de sensores ambientales que combinen alta precisión, bajo consumo energético y posibilidad de miniaturización se ha convertido en una necesidad creciente en campos como la agricultura de precisión, la investigación ambiental y la automatización industrial. Entre las variables críticas se encuentra el flujo de aire, cuya medición tradicionalmente ha dependido de anemómetros de gran tamaño o con partes móviles, limitando su aplicación en escenarios de monitoreo discreto, intensivo o en espacios reducidos.

Frente a este panorama, el presente proyecto propone el diseño y validación de un prototipo de anemómetro innovador, basado en un sistema electrónico compacto y en el uso de materiales emergentes. En particular, se emplea óxido de grafeno inducido por láser como material sensor en una arquitectura de tecnología térmica. Esta elección aporta ventajas sustanciales en términos de miniaturización, sensibilidad y facilidad de integración con sistemas electrónicos, al tiempo que reduce la dependencia de componentes mecánicos susceptibles al desgaste y a la pérdida de precisión.

Desde el punto de vista científico, el proyecto se fundamenta en principios físicos sólidos, como el efecto Joule y la disipación térmica controlada, los cuales explican el funcionamiento de los sensores térmicos. La incorporación del grafeno y sus derivados refuerza la pertinencia del desarrollo, dado su alto desempeño en conductividad térmica y eléctrica, cualidades que abren la puerta a diseños más eficientes, reproducibles y adaptables a diversas aplicaciones.

En un contexto global marcado por el cambio climático y la necesidad de monitoreo ambiental preciso, la propuesta adquiere relevancia adicional. Tecnologías como la aquí desarrollada representan herramientas clave para la toma de decisiones informadas y la implementación de prácticas sostenibles en sectores estratégicos como la agricultura, la gestión de recursos naturales y la investigación científica. Asimismo, al fomentar soluciones de bajo costo y alta eficiencia, se facilita la adopción de sistemas avanzados de monitoreo en comunidades y sectores productivos con recursos limitados, ampliando el alcance y el impacto social de la innovación tecnológica.

3.1. Alcances

El presente proyecto se centra en el diseño y evaluación de un prototipo como prueba de concepto, basado en un sistema electrónico con anemómetro sin partes móviles a escala milimétrica, desarrollado a partir de filamentos de óxido de grafeno inducido por láser. El trabajo contempla su implementación en un entorno controlado, de modo que el prototipo cumpla con los requisitos básicos de funcionamiento y demuestre su potencial para aplicaciones futuras en escenarios reales.

La calidad y pertinencia de este desarrollo se evalúan a partir de la capacidad del sistema para operar en un entorno representativo, es decir, en condiciones externas, adquiriendo variables físicas y expresándose mediante un modelo matemático confiable. Bajo este enfoque, el proyecto busca alcanzar un nivel de madurez tecnológica TRL 6, correspondiente a un sistema integrado y probado en un entorno operativo relevante, en el cual todos los componentes interactúan de manera conjunta y validada. [14].

TRL 9	Entorno real
TRL 8	
TRL 7	
TRL 6	Entorno de simulación
TRL 5	
TRL 4	Entorno de laboratorio
TRL 3	
TRL 2	
TRL 1	

Cuadro 1. Nivel de maduración tecnológica según el entorno teórico.

Fuente: Tomado de [15].

Este alcance establece un límite claro: el proyecto no pretende entregar un dispositivo comercial terminado, sino validar experimentalmente un prototipo funcional que sienta las bases para futuras fases de optimización, escalamiento y aplicación práctica en sectores como el monitoreo ambiental, la agricultura de precisión y la automatización industrial.

● Especificaciones del sensor

El prototipo de anemómetro diseñado en este proyecto debe cumplir con un conjunto de especificaciones técnicas que garanticen su desempeño, confiabilidad y adecuación al entorno de aplicación:

Sensibilidad: El dispositivo se calibró para alcanzar un nivel de sensibilidad que le permita detectar variaciones mínimas en la dirección y velocidad del flujo de aire. De acuerdo con el procedimiento realizado en la sección **6.3.4 Procesamiento de los Datos** y su posterior cálculo en la sección **7.2. Caracterización Cuantitativa del Sensor**, se obtuvo una sensibilidad de 0.0098 (V·s/m), valor que respalda la capacidad del sistema para captar cambios sutiles en las variables de interés y asegurar mediciones confiables.

Dependencia de temperatura: El sensor debe funcionar de manera estable en un intervalo de temperaturas comprendido entre la condición ambiente (26 °C) y la temperatura máxima registrada en el filamento (91 °C), correspondiente a un gradiente de 65 °C.

Consumo energético: El sistema de recolección de señales, incluyendo el arreglo de resistencias que funciona como anemómetro, está alimentado por un voltaje máximo de 5 V. A su vez, el prototipo opera en un rango de corriente entre 32 mA y 120 mA, por lo que su consumo energético se encuentra entre *160 mW* y *600 mW*.

Tamaño y dimensiones: El diseño busca mantener un formato a miliescala, flexible y de peso reducido, con un límite inferior a 100 gramos, en concordancia con los objetivos específicos planteados.

3.2 Pregunta de investigación

- **"¿Cómo diseñar y desarrollar un sistema electrónico a dimensiones milimétricas, basado en sensores de óxido de grafeno, capaz de predecir la dirección y velocidad del viento para aplicaciones de monitoreo ambiental, considerando las variables térmicas relevantes y utilizando como principio de funcionamiento la disipación de calor entre dos puntos del sensor?"**

4.1 Objetivo General.

- **“Diseñar y validar un sistema electrónico, a escala milimétrica y sin partes móviles, basado en un anemómetro de filamento de grafeno inducido por láser, capaz de determinar la dirección y la velocidad de un flujo de aire mediante la aplicación del efecto Joule”.**

4.2 Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general satisfactoriamente, hemos propuesto los siguientes objetivos puntuales.

- Fundamentar teóricamente el concepto del prototipo como anemómetro, su pertinencia como solución al problema planteado y el principio de funcionamiento basado en el efecto Joule.
- Diseñar el sistema electrónico del anemómetro, incluyendo el modelado de los sensores en software AutoCad, la definición de los subsistemas y la determinación de los parámetros eléctricos de operación.
- Fabricar el elemento sensor mediante la impresión láser inducida de óxido de grafeno sobre película de poliimida, e integrar el prototipo físico en un montaje funcional.
- Desarrollar e implementar la electrónica de adquisición y procesamiento de datos, consolidada en un circuito impreso (PCB) y con una interfaz de usuario intuitiva.
- Validar experimentalmente el desempeño del sistema bajo condiciones controladas de flujo de aire y evaluar su capacidad para determinar la dirección y velocidad del mismo.

5.1. Área Temáticas.

Las áreas temáticas del proyecto fueron seleccionadas con base en la taxonomía de la IEEE. [16]. Se presentan a continuación:

- Circuits and systems - Circuits - Operational amplifiers.
- Circuits and systems - Circuits - Analog circuits - Analog processing circuits.
- Circuits and systems - Circuits - Bipolar transistor circuits - BiCMOS integrated circuits.
- Circuits and systems - Circuits - Circuit noise.
- Circuits and systems - Circuits - Digital signal processors.
- Circuits and systems - Circuits - Integrated circuits - Microprocessors.
- Circuits and systems - Filtering - Filters - Digital filters.
- Components, packaging, and manufacturing technology - Component architectures.
- Engineering - Design engineering - Design tools.
- Engineering - Environmental engineering.
- Geoscience and remote sensing - Environmental factors - Biosphere.
- Instrumentation and measurement - Measurement - Fluid flow measurement.
- Lasers and electrooptics - Lasers - Chemical lasers.
- Materials, elements, and compounds - Atoms - Carbon - Graphene.
- Sensors - Chemical and biological sensors - Gas detectors - Amperometric sensors.

5.2. Marco Teórico.

A continuación, establecimos una serie de fundamentos teóricos que permiten comprender tanto el principio de funcionamiento como la implementación de la arquitectura electrónica que lo soporta al prototipo.

- **Efecto Joule.**

El efecto Joule describe el fenómeno físico mediante el cual la energía eléctrica se transforma en energía térmica al circular corriente a través de un material resistivo. En este proceso, el calor generado es proporcional al cuadrado de la corriente, a la resistencia y al tiempo de conducción. [17].

El efecto Joule lo podemos expresar mediante la siguiente relación:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

Ecuación 1. Calor generado - Efecto Joule.

Q = Cantidad de calor generado en julios.

I = Corriente eléctrica que pasa a través de la resistencia .

R = Valor de la resistencia de ohmios.

t = Tiempo en el fluye la corriente en segundos.

Este principio constituye la base fundamental del funcionamiento del sistema desarrollado. Las resistencias fabricadas se calientan al ser atravesadas por corriente, y el flujo de aire modifica dicho calentamiento a través de un proceso de enfriamiento convectivo. La disipación térmica registrada en las resistencias se traduce en variaciones de voltaje, que posteriormente pueden ser digitalizadas y analizadas. De esta forma, el efecto Joule permite convertir un fenómeno físico en una señal medible y procesable, capaz de reflejar la presencia, magnitud y dirección del viento una vez los datos son modelados e interpretados.

- **Grafeno.**

El grafeno es un nanomaterial compuesto por una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal bidimensional. Sus excepcionales propiedades de conductividad térmica y eléctrica, junto con su flexibilidad y resistencia mecánica, lo convierten en un material altamente atractivo para aplicaciones en sensores y dispositivos electrónicos. [18].

2D

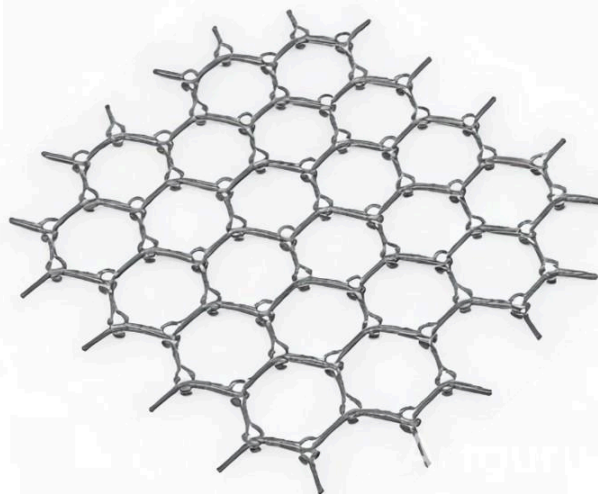


Figura 7. Estructura molecular del grafeno.

Fuente: Tomado de [18].

Bajo el contexto de desarrollo de un concepto de prototipo, se decidió emplear óxido de grafeno inducido por láser, obtenido a partir de la reducción del óxido de grafeno sobre un sustrato de poliimida. Este material conserva gran parte de las propiedades eléctricas y térmicas del grafeno, a la vez que ofrece ventajas en términos de fabricación económica, escalabilidad y compatibilidad con técnicas de microfabricación. [19].

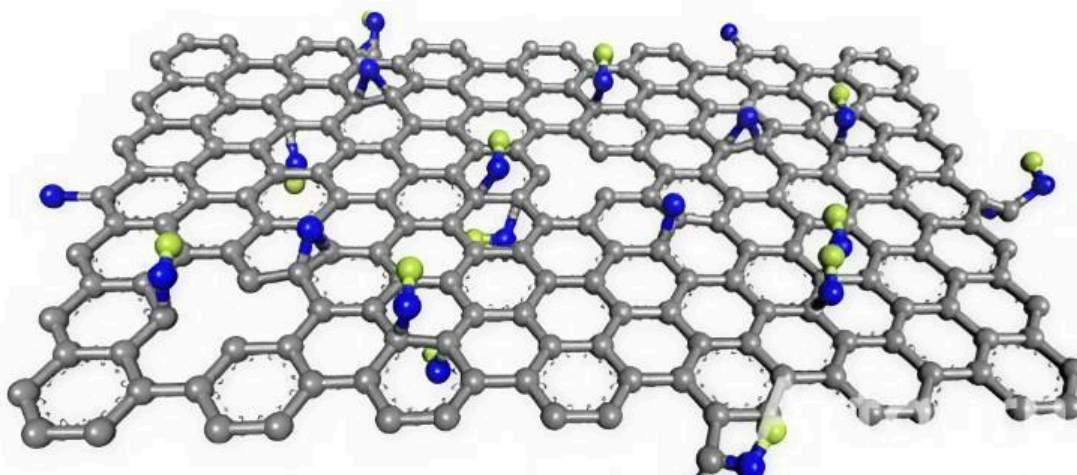


Figura 8. Estructura molecular de óxido de grafeno.

Fuente: Tomado de [20].

La principal diferencia estructural entre el grafeno y el óxido de grafeno radica en la pureza de la red de carbono y la presencia de grupos funcionales oxigenados. En la red de grafeno puro, cada átomo de carbono se une a tres vecinos mediante enlaces covalentes sp^2 , generando una estructura altamente ordenada y conductora. En contraste, el óxido de grafeno se deriva de la oxidación parcial de esta misma red, incorporando grupos funcionales como hidroxilos ($-OH$), epóxidos ($-O-$) y carboxilos ($-COOH$) en su superficie y bordes. Estas inclusiones rompen la continuidad de la hibridación sp^2 y crean regiones con hibridación sp^3 , disminuyendo la conductividad eléctrica y térmica, pero aumentando la reactividad química y la compatibilidad con otros materiales. [20].

Esta modificación estructural explica por qué el óxido de grafeno inducido por láser resulta un material versátil para el desarrollo de sensores, ya que combina propiedades eléctricas del grafeno con una mayor facilidad de procesamiento y adherencia a distintos sustratos. [21]. De esta forma, el óxido de grafeno no solo se convierte en la base material del sensor, sino que también posibilita la implementación práctica de un anemómetro compacto, reproducible y con un consumo energético competitivo.

- **Microcalentadores.**

Los microcalentadores son dispositivos diseñados para generar y disipar calor en escalas reducidas, empleando materiales con propiedades resistivas adecuadas. Tradicionalmente, se han implementado con metales como el níquel, el platino o el cromo; sin embargo, el grafeno y sus variaciones ofrecen una alternativa más versátil, innovadora e incluso económica. [22].

En este contexto, los filamentos de óxido de grafeno actúan como microcalentadores. Su diseño en geometrías específicas permite optimizar la disipación térmica y aumentar la sensibilidad del sistema al flujo de aire. El principio de microcalentamiento, apoyado en el efecto Joule, constituye así el núcleo del proceso de detección del anemómetro.

- **Adquisición de señales.**

La adquisición de señales constituye el proceso mediante el cual se capturan y transforman variables físicas en información eléctrica susceptible de análisis y procesamiento. En el caso del proyecto, esta etapa es esencial para convertir las variaciones de voltaje generadas por el efecto Joule en datos digitales que permitan inferir la dirección y magnitud del flujo de aire [23].

Un sistema de adquisición típico está conformado por sensores o transductores, un convertidor analógico-digital (ADC) y un módulo de procesamiento. En este orden de ideas, las resistencias de GO actúan como transductores, cuya respuesta eléctrica cambia en función del calentamiento y enfriamiento ocasionado por el paso del aire. Dichas variaciones de voltaje, de carácter analógico, son registradas y digitalizadas a través del ADC incorporado en el microcontrolador, lo cual posibilita su análisis mediante herramientas de software como Python, MATLAB y OriginLab.

La adecuada adquisición de señales garantiza la precisión y fidelidad de los datos, permitiendo establecer comparaciones confiables entre los distintos sensores calefactados y facilitando la identificación de patrones diferenciales asociados al flujo de aire. Sin este proceso, las variaciones físicas del sistema quedarían limitadas a cambios eléctricos imperceptibles o poco manejables, imposibilitando su posterior procesamiento digital y representación en resultados cuantificables.

- **Multiplexor.**

El multiplexor (MUX) es un dispositivo electrónico digital que permite seleccionar una de varias señales de entrada y dirigirla a una única línea de salida, reduciendo la complejidad del cableado y optimizando el uso de recursos de hardware. Existen una vasta variedad de multiplexores según la tarea y el número de señales de entrada y salida que se planteen. [24].

En el desarrollo del sistema, el multiplexor desempeña un papel clave al gestionar el arreglo de resistencias. Este dispositivo permite seleccionar, mediante un control digital, cuál de las resistencias será activada y medida en un instante dado, evitando que se generen interferencias térmicas al encender varios sensores simultáneamente. De esta manera, se logra un sistema de adquisición ordenado y eficiente, en el cual el convertidor A/D del microcontrolador recibe señales limpias provenientes de un único canal a la vez. El empleo del multiplexor, junto con transistores de conmutación, no solo optimizó el uso de pines disponibles en el microcontrolador, sino que también garantizó la escalabilidad del prototipo, permitiendo que este diseño pueda ampliarse en futuras versiones sin incrementar de manera significativa la complejidad del hardware.

- **Ruido Eléctrico**

El ruido eléctrico corresponde a toda interferencia no deseada que se superpone a la señal útil y degrada la calidad de la información adquirida. En sistemas de sensado como el desarrollado, el ruido puede provenir de diversas fuentes: agitación térmica de los componentes, variaciones de temperatura, inestabilidad en la alimentación del circuito o incluso del propio entorno experimental. [25].

Durante la adquisición de los valores de voltaje generados por las resistencias LIG, el ruido eléctrico estuvo presente de manera significativa debido a la naturaleza de las señales, caracterizadas por variaciones de baja magnitud y alta sensibilidad a perturbaciones externas. Esta condición hizo evidente que, sin un tratamiento adecuado, los registros podían contener fluctuaciones que no corresponden al comportamiento real del sensor frente al flujo de aire, dificultando la identificación de patrones útiles para el análisis.

En este sentido, comprender la presencia del ruido eléctrico y sus posibles orígenes resultó fundamental para implementar estrategias de mitigación. Entre las medidas empleadas incluimos el uso de filtrado posterior a la adquisición de datos, lo que permitió conservar la información relevante del sistema y mejorar la relación señal-ruido. Así, el estudio del ruido

no solo tuvo un papel teórico, sino también práctico al ser indispensable para garantizar la confiabilidad de los resultados experimentales obtenidos.

- **Filtrado de la señal**

El filtrado de señales constituye un proceso fundamental en sistemas de adquisición y procesamiento de datos, ya que permite suprimir componentes no deseadas en el espectro de la señal y conservar la información relevante para el análisis. En términos generales, los filtros pueden implementarse empleando circuitos eléctricos analógicos o mediante técnicas de procesamiento digital que actúan sobre los datos adquiridos. [26].

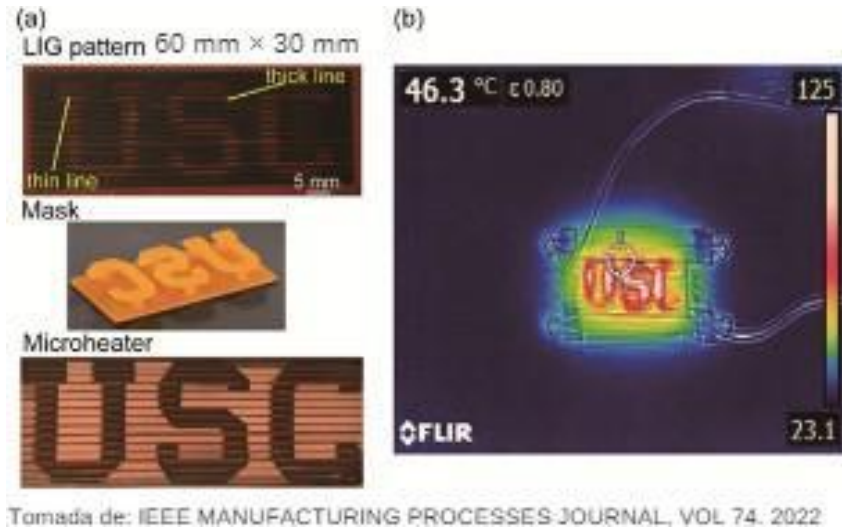
En lo práctico, el filtrado resultó indispensable debido a la presencia de ruido eléctrico que acompañaba a las señales registradas. Dado que las variaciones de voltaje generadas por las resistencias calefactadas eran de baja magnitud, incluso pequeñas perturbaciones podrían alterar la fidelidad de los datos. Para mitigar este efecto, recurrimos principalmente al filtrado digital posterior a la adquisición, lo que permitió eliminar fluctuaciones de alta frecuencia que no corresponden al fenómeno físico bajo estudio.

5.3. Estado del Arte.

A continuación, enumeramos los estudios y trabajos académicos que sirvieron como base para la concepción y ejecución del presente proyecto de grado.

- **“Fabrication of a flexible microheat with tunable heating capabilities by direct laser writing and selective electrodeposition”**

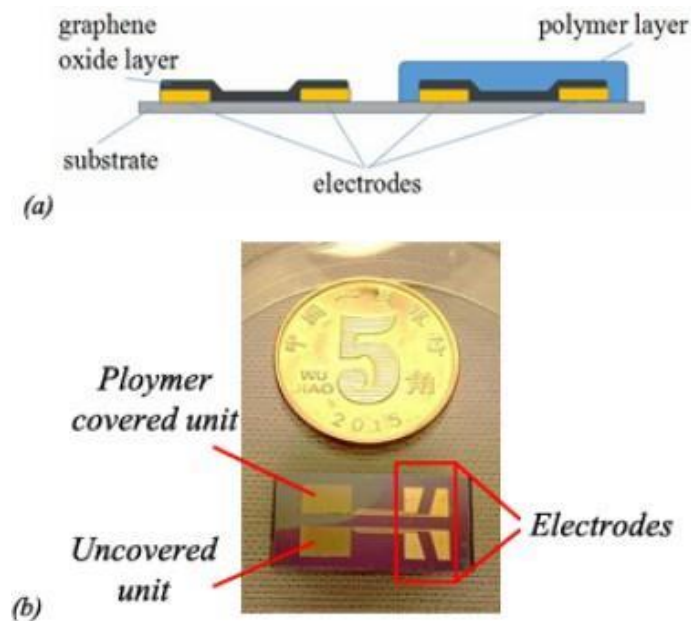
La primera fuente describe el novedoso desarrollo de un microcalentador flexible utilizando técnicas avanzadas de escritura láser directa y electrodeposición selectiva, de esta manera los investigadores lograron patentar un dispositivo adaptativo a la aplicación. Este microcalentador se caracteriza por su capacidad de ajustar la temperatura de manera precisa según sea necesario, lo cual es crucial para aplicaciones en dispositivos portátiles y electrónicos flexibles. La investigación detalla los procesos de fabricación, la estructura del microcalentador y sus capacidades de calentamiento ajustable, demostrando su eficacia y potencial para diversas aplicaciones tecnológicas. [22].



*Figura 9. Micro Calentador en cama térmica.
Fuente: Tomado de [22].*

- **“Differential Structure With Graphene Oxide for Both Humidity and Temperature Sensing”**

El artículo presenta un sensor innovador que utiliza una estructura diferencial entre ambas terminales con óxido de grafeno para medir tanto la humedad como la temperatura. El sensor se destaca por su alta sensibilidad y precisión, lo que lo hace ideal para aplicaciones en ambientes donde es crucial monitorear ambos parámetros, de igual forma, sus dimensiones a escala milimétrica, 8 mm x 15 mm. La investigación demuestra cómo el uso de óxido de grafeno mejora la capacidad de detección y la estabilidad del sensor, ofreciendo una solución eficiente y flexible para el monitoreo ambiental. [27].



*Figura 10. Sensor de estructura diferencial.
Fuente: Tomado de [27].*

- **“A four-wire micro anemometer in double cross shape with high mechanical stability for high sensitive air flow”**

El estudio presenta el diseño, simulación y validación experimental de un microanemómetro de cuatro hilos calefactados dispuestos en una configuración de doble cruz, desarrollado para la medición precisa de la dirección del flujo de aire con alta sensibilidad y estabilidad mecánica. El sensor se construye sobre un sustrato de silicio, donde los hilos metálicos actúan como elementos sensibles al flujo térmico inducido por el viento. Mediante simulaciones térmicas, se demuestra que cada hilo responde diferencialmente ante cambios en la dirección del viento, generando patrones de temperatura con comportamiento senoidal. Estos resultados fueron validados experimentalmente en un túnel de viento, donde se observó una alta correlación entre las simulaciones y las mediciones reales, confirmando la capacidad del diseño para inferir con precisión tanto la presencia como la dirección del flujo de aire. [28].

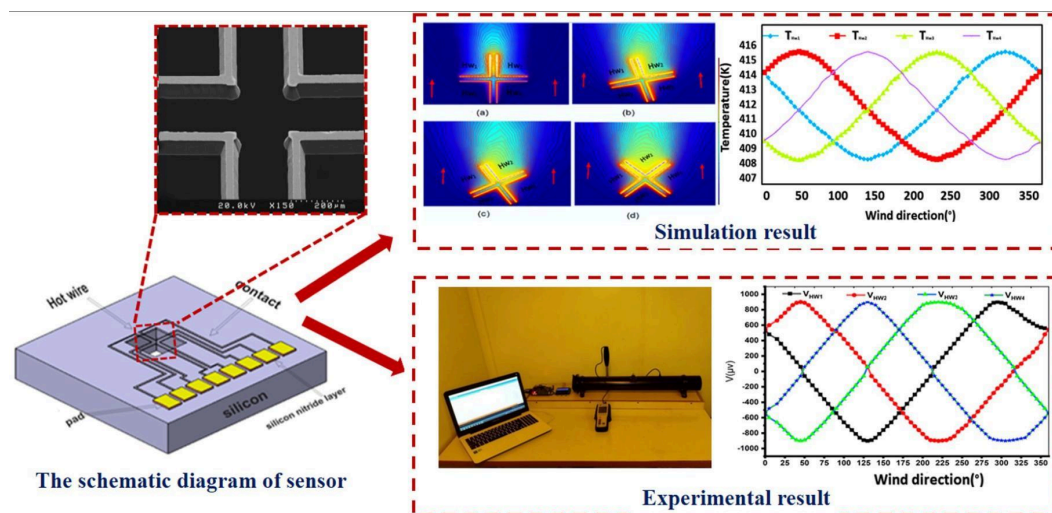
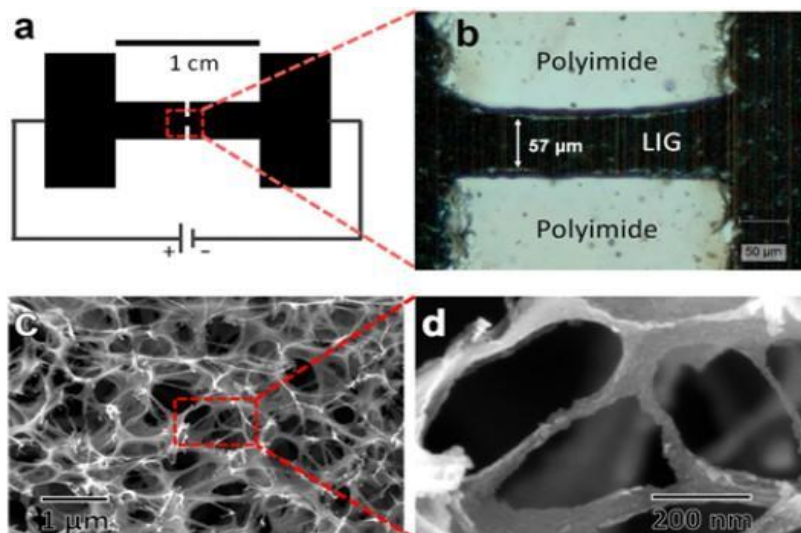


Figura 11. Micro-anemómetro de cuatro hilos con forma de doble cruz.

Fuente: Tomado de [28].

- **“Laser-Induced Graphene for Flexible and Embeddable Gas Sensors”**

El cuarto artículo sintetiza una innovadora técnica para fabricar sensores de gas flexibles y embebibles utilizando grafeno inducido por láser. Este método aprovecha la capacidad del láser para transformar sustratos de polímeros en grafeno altamente conductor, al emplear grafeno resulta sencillo la creación de sensores flexibles, con alta resistencia eléctrica y de bajo costo. Estos sensores son capaces de detectar una amplia gama de gases y pueden integrarse fácilmente en diversos dispositivos y materiales. El escrito destaca cómo esta tecnología prometedora tiene el potencial de revolucionar el campo de los sensores de gas, abriendo nuevas posibilidades en aplicaciones como monitoreo ambiental, seguridad industrial y dispositivos portátiles. [29].



*Figura 12. LIG estructura porosa.
Fuente: Tomado de [29].*

MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Metodología

La metodología que adoptamos en este proyecto se fundamentó en un enfoque aplicado de ingeniería, orientado al desarrollo y validación de un prototipo funcional. Para ello, hemos estructurado el trabajo en distintas secciones, dentro de las cuales se describen los materiales empleados, su función dentro del sistema, el procedimiento seguido para su implementación y los datos obtenidos en cada etapa. Este enfoque permitió organizar el desarrollo de manera progresiva y garantizar la trazabilidad entre el diseño, la experimentación y los resultados alcanzados.

6.2. Implementación del grafeno inducido por láser (LIG)

Para la elaboración de los sensores de grafeno utilizamos la técnica de grafeno inducido por láser. Este método de exfoliación química permite transformar de manera controlada la superficie de un polímero en grafeno poroso y conductor, obteniendo un material con propiedades similares al grafeno producido mediante exfoliación mecánica, óxido de grafeno. El proceso lo llevamos a cabo utilizando una impresora láser MUSE 3D disponible en el instituto Ómicas, la cual está equipada con un láser de CO₂ de 45 W y una longitud de onda de 10.6 μm.

El sustrato que hemos seleccionado fue una lámina de poliimida de 125 μm de espesor aproximadamente, la cual fue previamente limpiada con alcohol etílico y sometida a un tratamiento térmico en horno a 180 °C durante 15 minutos para eliminar impurezas y mejorar la adhesión.

La inducción de grafeno sobre la superficie del polímero se logró aplicando los siguientes parámetros: 10 % de la potencia máxima del láser, equivalente a 4.5 W, además de una velocidad de barrido de 15 cm/s. El correcto ajuste de estas condiciones favorece la carbonización superficial sin dañar el sustrato. [30].

Tras este procedimiento, se obtuvieron sensores de óxido de grafeno de alta calidad, los cuales fueron posteriormente caracterizados estructuralmente mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

El análisis microscópico permite evaluar la morfología superficial, la uniformidad y la integridad de las estructuras obtenidas por el proceso. Este tipo de caracterización es ampliamente utilizado en el estudio de nanomateriales, como se evidencia en investigaciones previas con nanopartículas de sílice y poliestireno, donde la SEM ha permitido determinar la forma, el tamaño y la distribución de las partículas con gran precisión. En el caso particular de los sensores desarrollados en este proyecto, el presente tipo de microscopía fue fundamental para confirmar la formación de una red porosa de GO, condición esencial para garantizar tanto su conductividad como su sensibilidad ante flujos de aire. [31].

A continuación, presentamos los planos de micrografías resultantes de este análisis.

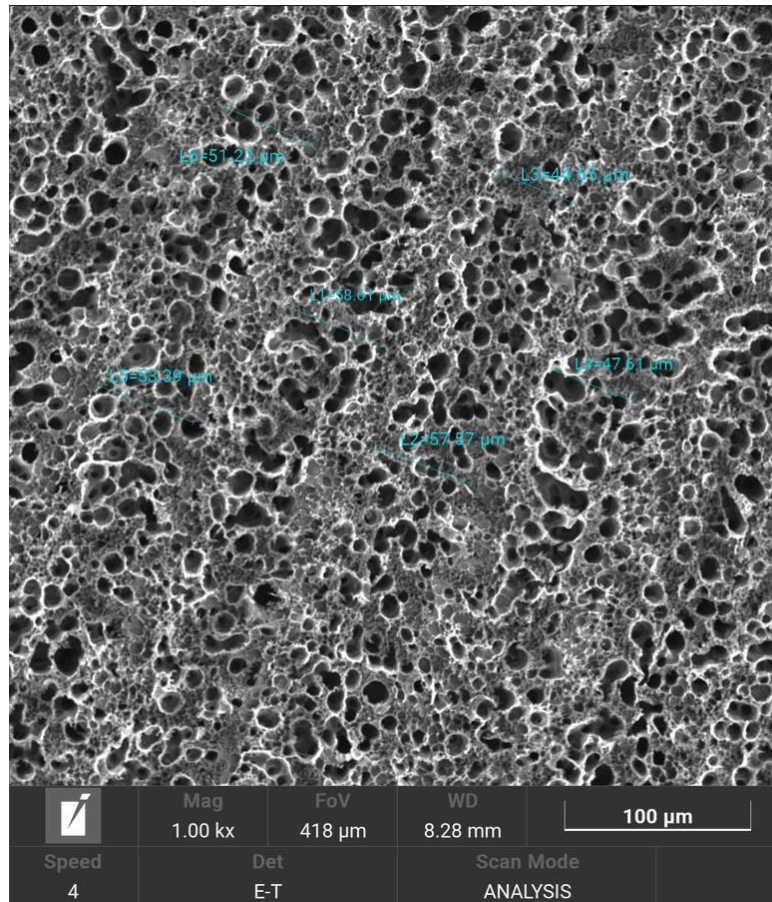


Figura 13. Trazado superficial del óxido de grafeno.

Fuente: Desarrollado en el Instituto iÓmicas.

A la escala de 1000 aumentos o magnificación, es posible observar con claridad la morfología superficial característica del material, la cual se caracteriza por una distribución homogénea de poros de diferentes tamaños, consecuencia directa del proceso de carbonización inducida por el láser sobre la poliimida. Las mediciones mostradas en color celeste en la imagen (L1, L2, etc.) corresponden a anchos de características estructurales, que varían entre aproximadamente 44 y 58 μm, reflejando la variabilidad natural del proceso y proporcionando datos fundamentales para la caracterización dimensional del material.

Los resultados confirman que la tecnología LIG permite generar estructuras con patrones bien definidos, morfología controlada y porosidad uniforme, factores esenciales para garantizar el desempeño, la reproducibilidad y la sensibilidad de los sensores desarrollados.

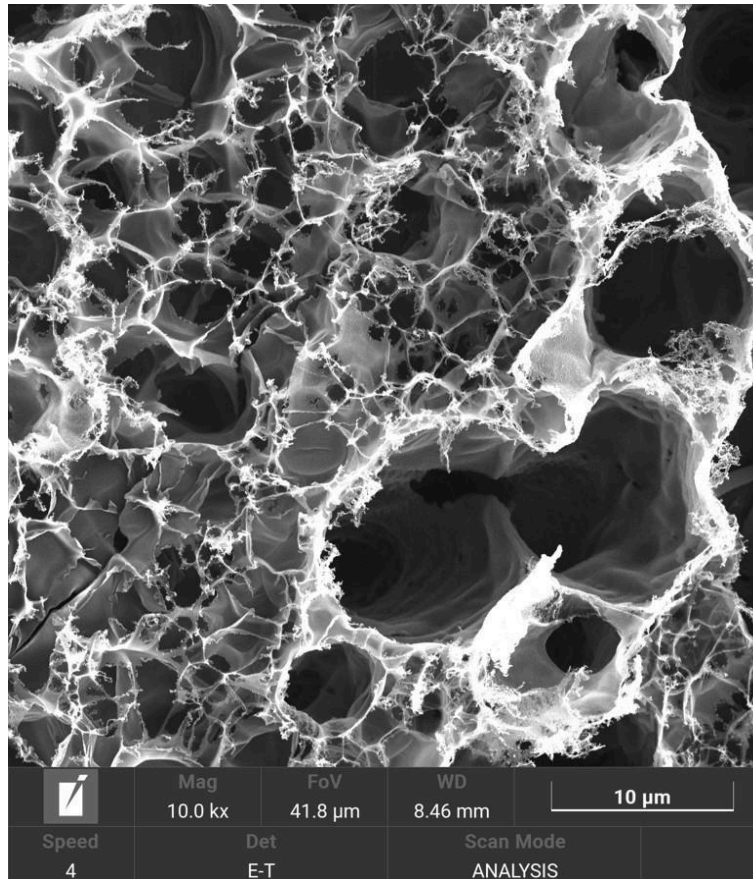


Figura 14. Estructura porosa del material.
Fuente: Desarrollado en el Instituto iÓmicas.

A una magnificación de 10 000 \times , se distingue con gran claridad la estructura porosa del material, conformada por cavidades de distintos tamaños y formas distribuidas de manera heterogénea sobre la superficie. A esta escala se aprecia la naturaleza tridimensional de la red de óxido de grafeno, incluyendo la conectividad de los poros, los bordes y los límites generados durante el proceso de escaneo láser.

Como gran observación, este tipo de morfología es altamente favorable para aplicaciones de sensado, ya que facilita el transporte de cargas y la interacción con fenómenos físicos del entorno. La abundante presencia de poros y canales bien definidos sugiere que el proceso de fabricación permitió un control adecuado sobre la formación de la red del material, contribuyendo a mejorar las propiedades eléctricas y la sensibilidad del sensor.

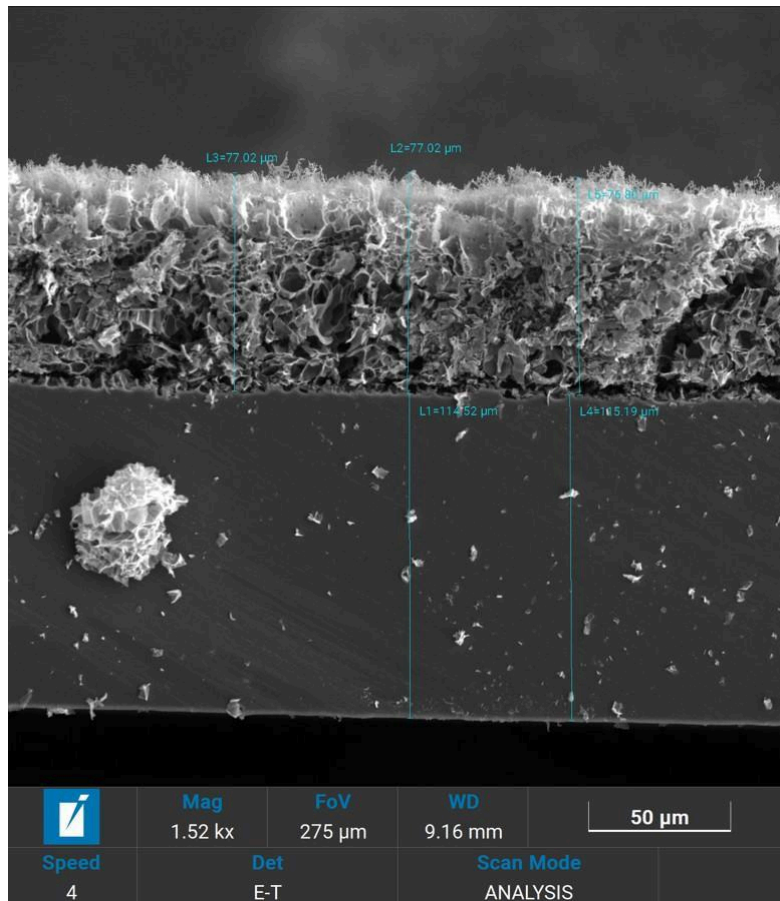


Figura 15. Vista Transversal LIG.

Fuente: Desarrollado en el Instituto iÓmicas.

La micrografía de corte transversal, obtenida a una magnificación de 1,500×, permite distinguir con precisión las diferentes capas del material. En la parte inferior se observa la película de poliimida, que actúa como sustrato, mientras que en la superficie se identifica la capa de óxido de grafeno formada por el proceso de inducción láser. Las mediciones realizadas evidencian que el sustrato de poliimida presenta un espesor aproximado de 115 μm (L1 y L4), mientras que la capa de óxido de grafeno alcanza un espesor cercano a 77 μm (L2, L3 y L5). Esta caracterización dimensional resulta fundamental para correlacionar la estructura multicapa del material con sus propiedades eléctricas y funcionales, directamente relacionadas con el desempeño y la sensibilidad de los sensores desarrollados.

- *Caracterización del material mediante la espectroscopia Raman*

La espectroscopía Raman es una técnica de análisis no destructiva que permite estudiar la estructura interna de los materiales de manera rápida y confiable. Consiste en iluminar la muestra con un láser y registrar cómo la luz se dispersa tras interactuar con los átomos. El espectro resultante actúa como una “huella digital” del material, ya que refleja información sobre su orden estructural, defectos y composición química. En el caso del grafeno, esta técnica es especialmente útil porque permite determinar si la red de carbono está bien formada, identificar defectos en la estructura y estimar el número de capas presentes, aspectos clave para optimizar su desempeño en aplicaciones de sensado. [32].

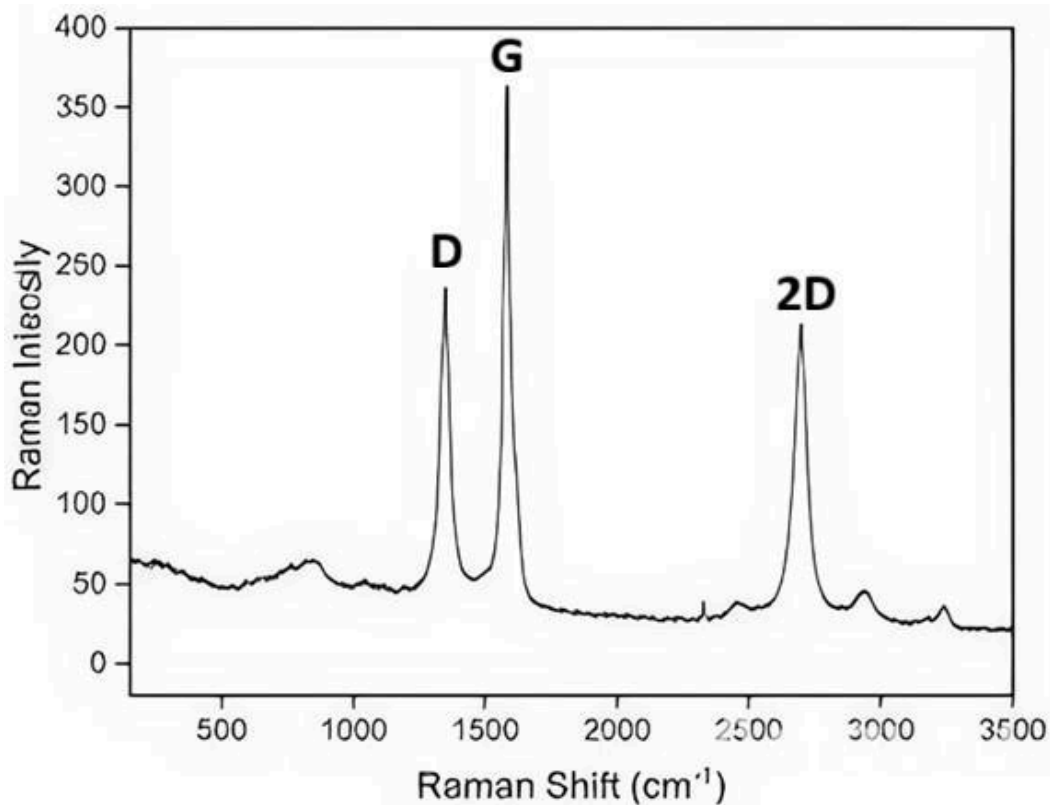


Figura 16. Espectroscopía Raman LIG.
Fuente: Desarrollado en el Instituto iÓmicas.

La figura No. 16 nos muestra un espectro Raman característico de GO inducido por láser, en el que se identifican tres picos principales:

- Pico D ($\sim 1350 \text{ cm}^{-1}$):
 Asociado a defectos estructurales y desorden en la red de carbono. Su intensidad es un indicador de la cantidad de defectos o el grado de desorden en el material.
- Pico G ($\sim 1580 \text{ cm}^{-1}$):
 Corresponde a la vibración del modo “E_{2g}” de los átomos de carbono en el plano hexagonal. Es típico de materiales gráfiticos y su presencia confirma la existencia de dominios gráfiticos bien desarrollados.
- Pico 2D ($\sim 2700 \text{ cm}^{-1}$):
 Banda de segundo orden del pico D, cuya presencia no requiere defectos. Su forma, intensidad y anchura proporcionan información sobre el número de capas: un 2D intenso y simétrico indica grafeno de pocas capas, mientras que un 2D más ancho y menos intenso corresponde a un mayor número de capas.

En el caso analizado, se observa un **pico D** prominente, con una intensidad aproximada de 240 unidades Raman, lo que confirma la presencia de defectos en la red de carbono, algo esperado en materiales obtenidos por LIG y que favorece la actividad superficial del sensor. Por su parte, **el pico G** alcanza una intensidad cercana a 370, confirmando la generación de regiones gráficas ordenadas y, por tanto, un material adecuado para la conducción eléctrica. Finalmente, **el pico 2D**, menos intenso que **el pico G** pero de ancho comparable, sugiere la presencia de pocas a múltiples capas de grafeno, en concordancia con lo reportado en la literatura para grafeno inducido por láser.

6.3. Desarrollo del Sistema

El presente proyecto de grado alcanza un nivel de elaboración significativo, ya que integra diversos procesos electrónicos, matemáticos y logísticos que, en conjunto, permiten la construcción de un prototipo inicial funcional. No obstante, abordar el sistema únicamente como una unidad global puede generar dificultades al momento de modificar parámetros específicos o incorporar mejoras.

Para superar esta limitación, hemos estructurado el prototipo en seis subsistemas, lo cual facilita el análisis individual de cada componente, al tiempo que permite comprender de manera más clara la interacción entre ellos. Esta estrategia de diseño no solo contribuyó a una mejor organización conceptual, sino que también resultó fundamental durante la etapa de implementación y evaluación: permitió identificar con rapidez el origen de posibles fallos, así como modificar o perfeccionar partes específicas sin comprometer el resto de la estructura.

En este contexto, presentamos a continuación el diagrama de subsistemas, el cual resume la organización del sistema y establece la base para la descripción detallada de cada uno de ellos.

Anexo 1. Diagrama de Subsistemas.

Como se aprecia en el Anexo, los seis subsistemas: *Sensores*, *Compuestos Electrónicos*, *Adquisición de datos*, *Procesamiento de los datos*, *Placa de Circuito Impreso* y *Visualización de los datos* son descritos mediante dos bloques. El primero indica la relación y función respecto al sistema, la segunda sección presenta como fue llevado a cabo su funcionamiento, así como las herramientas empleadas.

Ahora que se evidenció cómo está constituido el proyecto, se da inicio a la descripción de la metodología de cada subsistema.

6.3.1. Sensores de Óxido de Grafeno

- *Cálculo del valor de resistencia.*

El diseño de las resistencias sensores comenzó con la estimación de la energía disipada en el óxido de grafeno al ser atravesado por corriente, empleando la **“Ecuación 1. Calor generado - Efecto Joule.”**. Para este análisis consideraremos valores de referencia de 60Ω de resistencia, $5V$ de alimentación, resultando en una corriente de 83 mA al emplear la ley de ohm.

$$V = 5V, R = 60\Omega$$

$$I = \frac{V}{R}$$

Ecuación 2. Ecuación Ley de Ohm.

$$\frac{5V}{60\Omega} = 0.0833A \approx 83 \text{ mA}$$

Siguiendo con la temática, evaluamos dos escenarios: Aplicación de corriente durante 1 segundo y durante 60 segundos. En el primer caso, el calor generado fue:

$$Q = (83 \text{ mA})^2 \cdot 60\Omega \cdot 1s$$

$$Q = (0.006889) \cdot 60$$

$$Q \approx 0.413 \text{ J}$$

Mientras que, al extender el tiempo a 60 segundos:

$$Q = (83 \text{ mA})^2 \cdot 60\Omega \cdot 60s$$

$$Q = (0.006889) \cdot 3600$$

$$Q = 24.8 \text{ J}$$

Estos resultados muestran que el tiempo de aplicación de la corriente es determinante en la energía disipada por el sensor. Para un intervalo de un segundo, el aporte energético es reducido, mientras que al extender el tiempo de excitación a 60 segundos se alcanza un nivel considerablemente mayor, suficiente para inducir un cambio térmico efectivo en el material. Este incremento energético se traduce en una modificación de la respuesta eléctrica del sensor frente al flujo de aire. De este modo, se confirma que el calentamiento por efecto Joule constituye la base física del funcionamiento del sistema desarrollado.

Por otra parte, la relación geométrica de la resistencia eléctrica se describe mediante la Ecuación 2:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Ecuación 3. Ecuación general de la resistencia eléctrica.

ρ = Resistividad del material.

L = Longitud del conductor.

A = Área de la sección transversal.

El área transversal de las resistencias la calculamos a partir del espesor del LIG medido mediante microscopía electrónica de barrido (77 μm) y del ancho mínimo de impresión definido por la impresora láser (0.6 mm):

$$\begin{aligned} A_{\text{Transversal}} &= (t \cdot w) \\ A_{\text{Transversal}} &= (77 \mu\text{m}) \cdot (0.6\text{mm}) \\ A_{\text{Transversal}} &= (77 \cdot 10^{-6} \text{m}) \cdot (0.6 \cdot 10^{-3} \text{m}) \\ A_{\text{Transversal}} &= (4.62 \cdot 10^{-8} \text{m}^2) \end{aligned}$$

La resistividad del óxido de grafeno inducido por láser (ρ) presenta una alta variabilidad en función de las condiciones de fabricación, tales como la potencia del láser, la velocidad de escaneo, la atmósfera de procesamiento y el tipo de sustrato empleado. En la literatura se reportan valores de resistividad que abarcan varios órdenes de magnitud, típicamente entre 10^{-5} y $1 \Omega \cdot \text{m}$ para materiales del tipo LIG. [33], [34].

En el presente trabajo se adopta un valor de resistividad de $2.1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$, seleccionado como una referencia de diseño coherente con los rangos reportados y con el comportamiento eléctrico observado experimentalmente en los filamentos fabricados. Dado que la resistividad del LIG no constituye un parámetro intrínseco del material, sino que depende fuertemente del proceso de fabricación, este valor se emplea exclusivamente con fines de modelado geométrico y estimación eléctrica, y no como una constante material estricta.

A partir de esta resistividad y del área transversal calculada para el filamento, se asumió inicialmente un valor de resistencia de 60Ω para estimar la longitud efectiva del sensor mediante la relación geométrica de la resistencia. Sustituyendo los valores en la ecuación, se obtiene una longitud teórica.

$$60 \Omega = (2.1 \cdot 10^{-3} \Omega m) \cdot \frac{L}{(4.62 \cdot 10^{-8} m^2)}$$

$$L_{Teórico} = \frac{(60 \Omega) \cdot (4.62 \cdot 10^{-8} m^2)}{(2.1 \cdot 10^{-3} m \cdot \Omega)}$$

$$L_{Teórico} = 1.32 mm$$

Posteriormente, tomando como referencia el valor promedio experimental de resistencia de los sensores fabricados, correspondiente a 73 Ω , se realizó nuevamente el cálculo:

$$73 \Omega = (2.1 \cdot 10^{-3} \Omega m) \cdot \frac{L}{(4.62 \cdot 10^{-8} m^2)}$$

$$L_{Experimental} = \frac{(73 \Omega) \cdot (4.62 \cdot 10^{-8} m^2)}{(2.1 \cdot 10^{-3} m \cdot \Omega)}$$

$$L_{Experimental} = 1.61 mm$$

Este resultado presenta una concordancia prácticamente exacta con la longitud real implementada en el diseño del sensor, correspondiente a aproximadamente 1.60 mm. Lo anterior valida el modelo geométrico utilizado y demuestra coherencia entre el dimensionamiento teórico, la resistividad estimada y la fabricación práctica de los sensores de óxido de grafeno.

- Coeficiente de variación de temperatura.

Con el fin de cuantificar la magnitud térmica efectiva inducida por el efecto Joule y su relación con el flujo de aire incidente, se define la diferencia de temperatura del sistema como la variación entre la temperatura final promedio alcanzada por el sensor y la temperatura ambiente de referencia. Esta diferencia representa la magnitud térmica efectiva disponible para el proceso de sensado, dado que es el gradiente térmico el que gobierna la disipación de calor hacia el entorno bajo condiciones de flujo de aire.

La diferencia de temperatura se expresa como:

$$\Delta T = T_f - T_0$$

Ecuación 4. Ecuación general diferencial de temperatura.

T_f = Temperatura promedio máxima alcanzada.

T_0 = Temperatura ambiente.

Este parámetro se emplea como variable ajustada para analizar la respuesta térmica del sistema frente a diferentes condiciones de excitación eléctrica y flujo de aire, permitiendo una comparación coherente entre sensores y escenarios experimentales.

$$\Delta T = 91 \text{ C}^\circ - 26 \text{ C}^\circ$$

Al convertir a Kelvin para fines de consistencia en cálculos termodinámicos:

$$\begin{aligned}\Delta T &= (91 + 273.15) - (26 + 273.15) \\ \Delta T &= 65 \text{ K}\end{aligned}$$

- Calor específico.

Con el objetivo de contextualizar el orden de magnitud de los fenómenos térmicos involucrados, consideramos de manera exploratoria el uso de propiedades térmicas reportadas para grafeno puro, tales como capacidad calorífica y densidad, únicamente como un escenario idealizado. Esta aproximación no pretende describir el comportamiento real del sensor, dado que el LIG presenta una microestructura porosa y fuertemente dependiente del proceso de fabricación y del sustrato.

Utilizamos este caso límite con el fin de evidenciar que la adopción de parámetros correspondientes a grafeno ideal conduce a discrepancias significativas, lo que justifica la necesidad de una caracterización experimental directa del sistema y la imposibilidad de establecer un modelo térmico cerrado sin datos específicos del material LIG utilizado.

La energía requerida para calentar un material se calcula usando la ecuación general del calor específico:

$$Q = C_p \cdot m \cdot \Delta T$$

Ecuación 5. Ecuación general de calor específico.

A temperatura ambiente, la capacidad calorífica específica del grafeno es aproximadamente 0.70 J/gK. Esta propiedad ha sido documentada en la literatura especializada. [35].

$$C_p = 0.70 \text{ J/gK}$$

Para hallar la masa del grafeno correspondiente a un área pequeña del material, se utilizó una regla de tres, considerando la densidad superficial:

$$1 \text{ m}^2 = 0.77 \cdot 10^{-3} \text{ g}$$

El área de la sección considerada es:

$$A = (4.62 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2)$$

Aplicando la regla de tres:

$$m = \frac{(4.62 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2) \cdot (0.77 \cdot 10^{-3} \text{ g})}{1 \text{ m}^2}$$

$$m = 3.70 \cdot 10^{-11} \text{ g}$$

Una vez estimada la masa efectiva del filamento de LIG y definida la diferencia de temperatura inducida por el efecto Joule, se procede a calcular la energía térmica almacenada en el sensor mediante la Ecuación No. 5. Este cálculo permite obtener una estimación de la energía mínima requerida para elevar la temperatura del material bajo condiciones de operación, asumiendo un régimen cuasi-estacionario y un comportamiento térmico homogéneo del filamento.

$$Q = (0.70 \text{ J/gK}) \cdot (3.70 \cdot 10^{-11} \text{ g}) \cdot (65\text{K})$$

$$Q = 1.68 \cdot 10^{-9} \text{ J}$$

$$Q = 1.68 \text{ nJ}$$

El valor obtenido corresponde al orden de magnitud de la energía térmica involucrada en el proceso de sensado, y resulta coherente con la escala micrométrica del dispositivo y su bajo consumo energético, reforzando la viabilidad del principio de funcionamiento basado en el efecto Joule.

Cabe resaltar que el material LIG empleado en este trabajo fue caracterizado mediante espectroscopía Raman y microscopía electrónica de barrido, lo que permitió confirmar su naturaleza porosa y heterogénea, así como la presencia de dominios grafiticos desordenados y una estructura tridimensional característica del grafeno inducido por láser. Estas evidencias experimentales corroboran que las propiedades térmicas del LIG difieren significativamente de las del grafeno puro ideal, tanto en capacidad calorífica efectiva como en densidad y mecanismos de disipación térmica.

En este sentido, el uso de parámetros reportados para grafeno puro debe interpretarse únicamente como una aproximación de orden de magnitud, empleada con fines de contextualización ingenieril, no como una representación fiel del comportamiento térmico del sensor.

- Potencia Disipada.

Es importante contextualizar que la energía requerida para calentar los sensores puede ser representada en términos de potencia eléctrica, considerando el tiempo en que dicha energía se suministra. Esto nos permite estimar de manera práctica cuánta potencia se debe disipar durante el precalentamiento de los sensores o durante la conmutación rápida, asegurando que cada sensor alcance la temperatura adecuada para obtener mediciones precisas.

La potencia se calcula usando la relación:

$$P = \frac{Q}{t}$$

Ecuación 6. Ecuación general potencia disipada.

Donde Q es la energía necesaria para calentar una sección de óxido de grafeno de una sola capa y t es el tiempo de aplicación.

Durante el precalentamiento (5 segundos por sensor):

$$P_{\text{Precalentamiento}} = \frac{(1.68 \cdot 10^{-9})}{5}$$

$$P_{\text{Precalentamiento}} = 3.38 \cdot 10^{-10} \text{ W}$$

$$P_{\text{Precalentamiento}} \approx 0.336 \text{ nW}$$

Durante la conmutación rápida (0.5 segundos por sensor):

$$P_{Conmutación} = \frac{(1.68 \cdot 10^{-9})}{0.5}$$
$$P_{Conmutación} = 3.38 \cdot 10^{-9} W$$
$$P_{Conmutación} \approx 3.36 nW$$

Estos valores permiten estimar la potencia teórica necesaria para calentar los sensores en los tiempos definidos, sirviendo como referencia para el diseño y control del sistema de adquisición de datos.

- *Diseño de las Resistencias en AutoCad.*

Una vez obtenidos los resultados teóricos a partir de las ecuaciones planteadas, iniciamos el proceso de diseño de las resistencias. Para ello empleamos el software AutoCAD, ampliamente utilizado en ingeniería, arquitectura y diseño industrial para la creación de modelos en 2D y 3D.

Esta herramienta resultó especialmente adecuada debido a varias razones: en primer lugar, permite trabajar con la precisión y el nivel de detalle requeridos en la escala milimétrica, condición esencial para el diseño de los trazos de óxido de grafeno. En segundo lugar, su facilidad de edición posibilita adaptar un modelo básico de resistencia a configuraciones más complejas, incorporando distintas geometrías sin pérdida de exactitud. Finalmente, AutoCAD ofrece compatibilidad directa con la impresora MUSE 3D, lo cual elimina la necesidad de recurrir a programas intermedios y reduce significativamente el tiempo de preparación para la fabricación de los sensores.

La metodología de diseño de las resistencias la estructuramos en tres etapas principales: i) elaboración de propuestas iniciales, ii) evaluación del valor de la resistencia, y iii) diseño final escalado.

En la primera etapa se generaron distintas propuestas de geometría y distribución del trazo resistivo, considerando los requerimientos básicos de fabricación y operación: la longitud total de cada resistencia no debía superar los 3 cm, mientras que el ancho del trazo de óxido de grafeno debía mantenerse en 0.6 mm.

Posteriormente, los diseños fueron refinados a escala milimétrica hasta converger en la configuración final, que cumplió con los criterios establecidos y sirvió como base para la fase de fabricación. A continuación, presentamos las propuestas elaboradas y el diseño definitivo obtenido.

La primera propuesta se describe como un conjunto de patrones de líneas paralelas interconectadas, lo que indica un diseño optimizado para distribuir corriente de manera uniforme. El sensor se planeó con una estructura de una resistencia calefactora o de radiador, debido a que pensamos en una manera en la que el flujo de aire pase por más de dos puntos del sensor, permitiendo obtener un registro más acertado de la variable.

El diseño fue descartado por su “gran tamaño”, así como su elevado valor de resistencia. Del mismo modo, el sensor significaba un reto a la hora de escalar un arreglo de varios sensores, afectando directamente la propiedad del sistema de ser compacto.

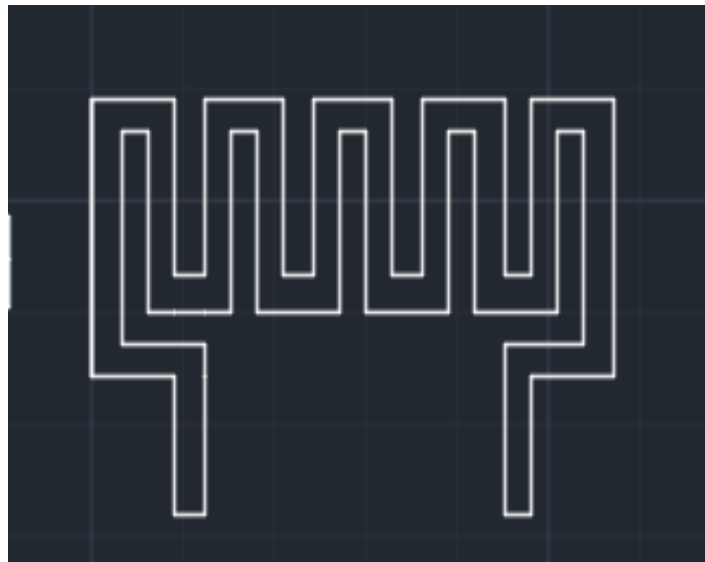


Figura 17. Propuesta de diseño de forma serpenteante.

Fuente: Elaboración propia.

La segunda idea se expresa como una versión optimizada de la primera, pasando de cinco curvas a solo dos. Este cambio se vio reflejado en la reducción del valor de la resistencia a 120 ohm, así como en la reducción de su longitud a menos de un centímetro, 0.78 cm. Sin embargo, al ser más rigurosos con el diseño del sensor se identifica una dificultad en las terminales del mismo. Al ser tan cortas se dificulta la conexión con los cables que harán pasar la corriente por la estructura. Siendo limitada la propuesta por lo práctico.

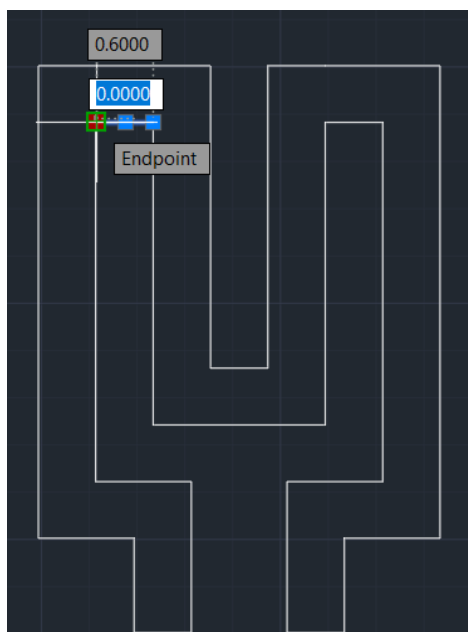


Figura 18. Propuesta de diseño geométrico.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de los desaciertos anteriores modificamos la resistencia a una con una forma mucho más sencilla, una estructura con líneas rectas y esquinas definidas. Alargando el espacio designado a la conexión de las terminales, así como dejando un espacio entre ellas de 0.6 mm. Concretamente el área expuesta al flujo del viento es el rectángulo de la parte superior, dimensionado a 0.6 mm de grosor y 1.8 mm de largo.

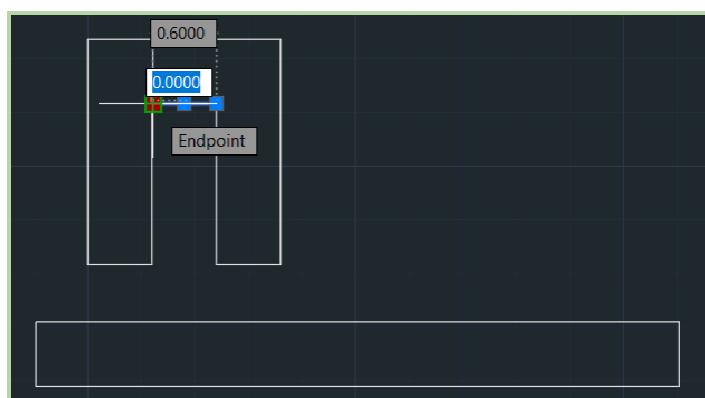


Figura 19. Propuesta de diseño de líneas rectas.
Fuente: Elaboración propia.

La propuesta final es una minimización del anterior diseño, reduciendo su longitud al máximo posible acorde a los parámetros de impresión, 1.6 mm. Asimismo, alargamos las terminales del sensor por temas de practicidad.

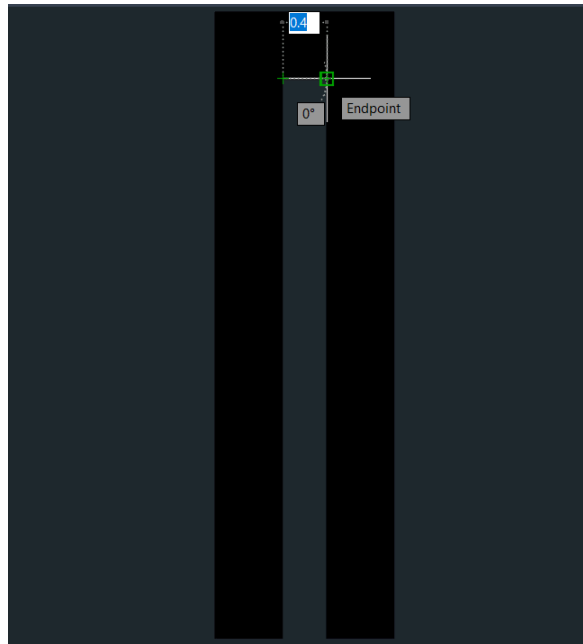


Figura 20. Propuesta de diseño final.

Fuente: Elaboración propia.

Cada uno de los sensores fueron impresos y evaluados acorde a su valor resistivo. Tal como se proyectó, los valores fueron decreciendo a medida que se disminuye el área. Pasando de valores elevados como los primeros tres, 17k - 500 ohm, siendo los primeros dos datos provenientes de diseños preliminares de filamentos sin forma específica y el tercero de la primera propuesta descrita con anterioridad.

Las estructuras con longitudes inferiores a un centímetro contaban con valores de resistencia por debajo de los 200 ohms, aproximándose cada vez más a la suma de 100 ohms, la cual fue la cifra pactada como “idónea” para implementación.

Longitud (mm)	Resistencia (Ω)
100 mm	17 kΩ
45 mm	102 Ω
24.6 mm	570 Ω
7.8 mm	180 Ω
1.8 mm	82 Ω
1.6 mm	73 Ω

Cuadro 2. Valores de resistencia a diferentes longitudes.

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se aprecia en el Cuadro No. 2, los diseños con longitudes más cortas (1.8 mm y 1.6 mm) alcanzaron resistencias de 82Ω y 73Ω , respectivamente. Estos valores no solo se encuentran dentro del rango esperado, sino que lo superan al ubicarse en niveles inferiores, lo cual resulta favorable para el desempeño del sensor, al incrementar su capacidad de disipación térmica y mejorar la sensibilidad ante el flujo de aire.

Con base en estos resultados, definimos una configuración final consistente en un arreglo circular de ocho resistencias GO de 1.6 mm, diseñadas para presentar valores de resistencia lo más similares posible. Los sensores se distribuyen de manera equidistante a lo largo de un radio de 50 mm, formando una disposición simétrica que optimiza la captura de datos desde distintas direcciones del flujo de aire.

La disposición simétrica y radial está optimizada para capturar datos en diferentes direcciones, permitiendo un análisis preciso del flujo de aire, así como se muestra en la imagen de abajo.

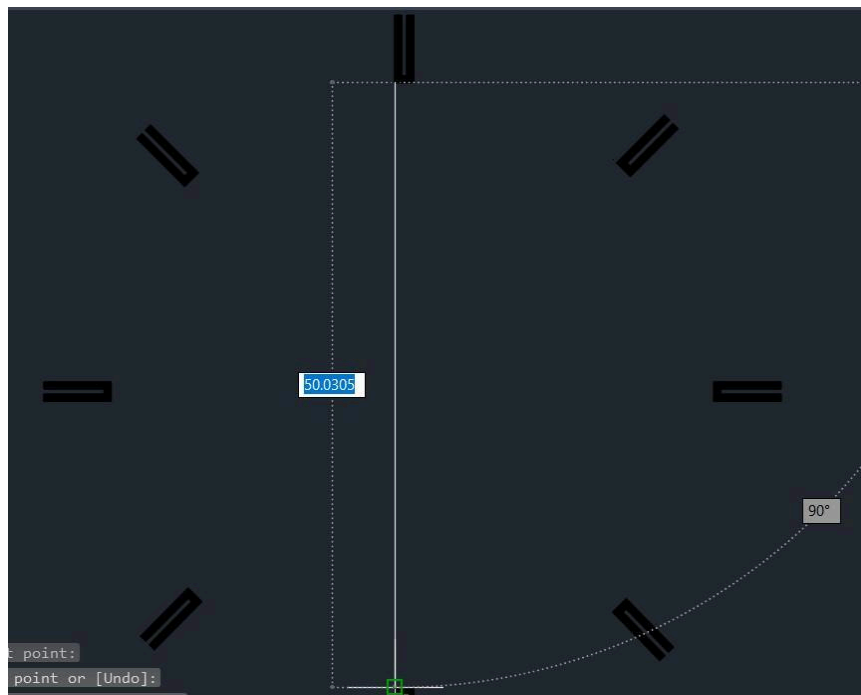


Figura 21. Diseño del arreglo de resistencias.

Fuente: Elaboración propia.

- *Impresión en laboratorio y Montaje.*

La fabricación física de los sensores se efectuó tal cual como se describió en la sección “**6.2. Implementación del grafeno inducido por láser (LIG)**”. El montaje físico de las resistencias lo llevamos a cabo siguiendo una serie de pasos.

1. Definición de terminales conductoras. Se delimitaron las zonas de contacto de cada resistencia aplicando pintura de plata conductora *Leitsilber 200 Silver Paint* mediante un pincel de precisión, con el fin de evitar la cobertura de áreas no deseadas de la poliimida. Además, el recubrimiento con tinta de plata contribuye a reducir significativamente la resistencia en los terminales de conexión, evitando que estas interfieran o alteren el valor resistivo propio de los filamentos.
2. Secado y fijación. Posteriormente, las muestras fueron sometidas a un ciclo de secado en un horno especializado del instituto a 80 C° , con el objetivo de sellar el trazo de óxido de grafeno sobre la película de poliimida y asegurar su estabilidad estructural.
3. Colocación de terminales de aluminio. Instalamos filamentos de aluminio para permitir la conexión eléctrica de los sensores al circuito. Para ello se utilizó cinta dieléctrica, la cual garantiza una unión firme entre el camino conductor de la resistencia y el contacto metálico.

Gracias a este procedimiento fue posible implementar sensores de dimensiones milimétricas dentro de un montaje circuital estándar, lo que habilitó tanto su alimentación eléctrica como la posterior medición de variaciones de temperatura en condiciones controladas.

A continuación exponemos el montaje resultante del arreglo de resistencias.

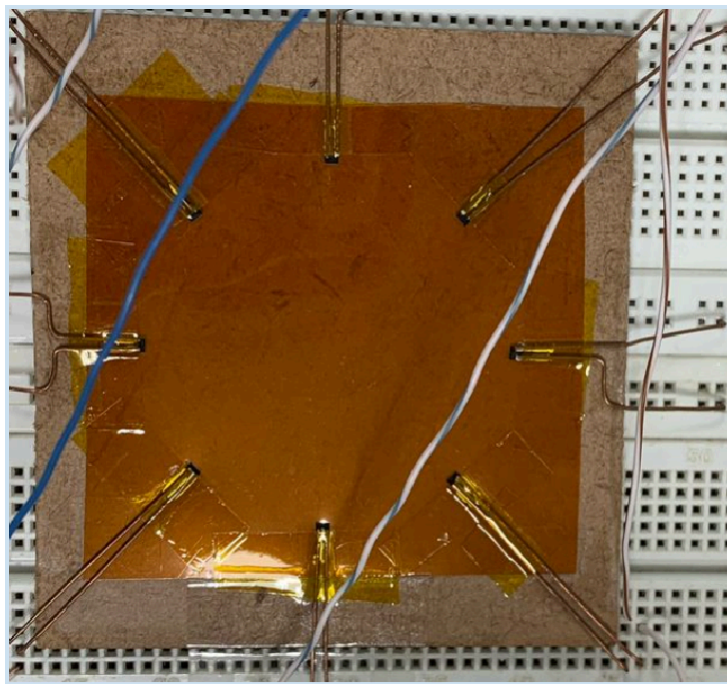


Figura 22. Resistencias Impresas bajo una película de Poliimida.

Fuente: Elaboración propia.

Tras varias pruebas experimentales, decidimos optimizar la distribución del arreglo sensorial con el objetivo de facilitar su comprensión y eliminar material no esencial. Bajo este criterio, el sistema se organizó en tres secciones:

- **Sección 1:** sensores 1, 7 y 8.
- **Sección 2:** sensores 2 y 6.
- **Sección 3:** sensores 3, 4 y 5.

Esta disposición, ilustrada en la Figura No. 23, permitió una representación más clara de la organización funcional del conjunto.

Adicionalmente, las resistencias fueron recortadas para reducir el área de la película de poliimida, ya que el exceso de material generaba un efecto de disipación que limitaba el calentamiento de los sensores, provocando que su temperatura se estabiliza alrededor de los 60 °C. Con esta modificación, mejoramos el desempeño térmico del sistema y se aumentó su capacidad de respuesta ante el flujo de aire.

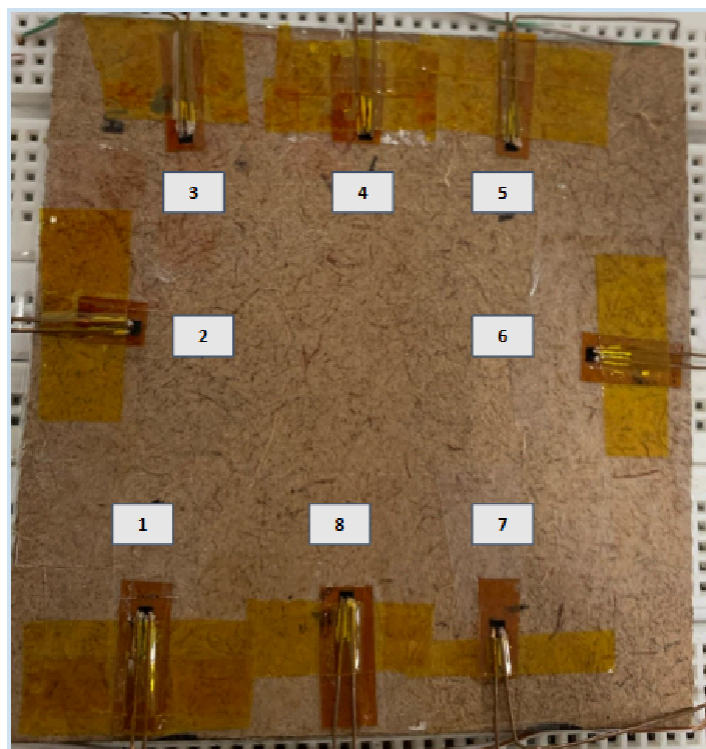


Figura 23. Nuevo Arreglo de resistencias.

Fuente: Elaboración propia.

- *Temperatura.*

La temperatura generada por el paso de corriente eléctrica a través del diseño de la resistencia fue medida con un multímetro acoplado a una termocupla. Los respectivos valores fueron registrados en la siguiente tabla, destacando la temperatura máxima obtenida de 104 C°. Alcanzar la mayor temperatura accesible es de gran utilidad en la predicción de la dirección y velocidad de un flujo de aire, ya que permite generar un mayor gradiente térmico entre el sensor y el entorno, lo que incrementa la sensibilidad del sistema a las variaciones de enfriamiento provocadas por el flujo, facilitando así una estimación más precisa tanto de la dirección como de la velocidad del aire.

Resistencia 1.6mm		Temperatura (C°)
R1	61 Ω	104
R2	68 Ω	102
R3	81 Ω	80
R4	67 Ω	99
R5	64 Ω	97
R6	75 Ω	90
R7	90 Ω	75
R8	80 Ω	80
MEDIA	73.25 Ω	90.88

*Cuadro 3. Valores de temperatura alcanzada.
Fuente: Elaboración propia.*

6.3.2. Componentes Electrónicos

- *Microcontrolador.*

Para la selección del módulo microcontrolador evaluamos criterios fundamentales como la capacidad de procesamiento de datos, la precisión en la adquisición mediante el ADC, el peso del dispositivo y la facilidad de integración al sistema.

En este contexto, elegimos el Arduino Nano 33 IoT, ya que cumple de manera adecuada con dichos requisitos. Un factor determinante fue el peso total del sistema, dado que el prototipo debía mantenerse por debajo de los 100 gramos. El Arduino Nano 33 IoT, con un peso aproximado de 5 gramos, contribuye a cumplir este requisito sin comprometer el rendimiento. A esto se suma su tamaño compacto, con dimensiones de 43,16 mm de largo por 17,77 mm de ancho, lo que facilita su integración en espacios reducidos y montajes a miliescala. En conjunto, estas características hacen del Arduino Nano 33 IoT una opción funcional, ligera y versátil, adecuada para el desarrollo de un sistema de monitoreo ambiental. [36].

- *Multiplexor.*

Un componente de gran importancia para el sistema es el multiplexor, encargado de gestionar múltiples entradas correspondientes a los ocho sensores, dirigiéndose hacia una única salida. Esta configuración permite optimizar el uso de recursos del sistema y facilita el procesamiento secuencial de los datos adquiridos.

En primera instancia, optamos por utilizar el módulo CD74HC4067 para Arduino, un circuito con capacidad para conectar hasta 16 canales de entrada o salida a una única línea común, operando en un rango de voltaje típico de 2V a 6V. Además, al ser del mismo fabricante que otros componentes del sistema, se esperaba una alta compatibilidad con el microcontrolador, lo cual permitiría reducir el número de pines utilizados o evitar la inclusión de componentes electrónicos adicionales como intermediarios.

Sin embargo, al calcular el rango de corriente eléctrica requerido por los sensores (entre 32 mA y 120 mA), se evidenció que el uso del módulo no era viable. Al consultar su hoja de datos, identificamos que la corriente máxima de salida por canal es de solo 20 mA, lo que lo hace inadecuado para manejar las exigencias del sistema, particularmente en lo relacionado con el calentamiento de las resistencias de grafeno.

Otras alternativas consideradas fueron los interruptores digitales y los multiplexores de alta corriente; sin embargo, ninguno logró cumplir con los requerimientos operativos del sistema. Las principales limitaciones se relacionan con el rango de corriente que podían manejar y los niveles de voltaje de operación, los cuales resultaron incompatibles con las condiciones necesarias para el funcionamiento eficiente de los sensores.

La solución planteada se comprendió como una configuración propia de multiplexor utilizando transistores NPN 2N2222A y resistencias comerciales, lo que permitió realizar la conmutación sin una limitación estricta de corriente, alcanzando hasta 600mA por canal. Al contar con componentes estándar se tiene la ventaja de conocer su funcionamiento y versatilidad, lo que permite una gran facilidad en su implementación, así como disponibilidad inmediata en el mercado.

La configuración del circuito se basa en que cada entrada del multiplexor está conectada a la base de un transistor NPN, mientras que los colectores de todos los transistores se conectan en común a la única salida del multiplexor. Dejando la terminal emisora conectada a la resistencia de grafeno, de esta manera se emplea una corriente de entrada mayor al sensor, elevando su temperatura.

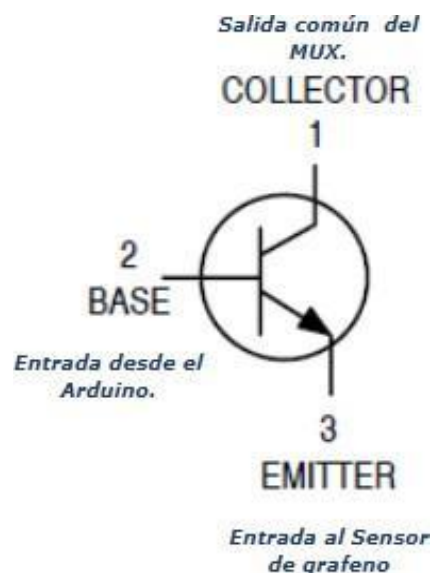


Figura 24. Representación esquemática de conexiones, transistor bipolar NPN.

Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo la misma línea, incorporamos una resistencia pull-down en la salida para estabilizar el estado cuando ningún transistor está conduciendo. La activación de cada canal es controlada por el microcontrolador mediante señales digitales, permitiendo una conmutación eficiente y adaptada a los requerimientos del sistema.

Para la selección de los puertos del microcontrolador, se consideró tanto la cantidad de puertos digitales disponibles como el número de entradas necesarias para el control del sistema. En este proyecto, empleamos ocho puertos digitales, D2 a D9, ubicados en el lateral derecho del Arduino Nano 33 IoT, destinados a controlar la activación de los transistores del multiplexor y gestionar la conmutación de las señales de los sensores de GO. Asimismo, se contempló la disponibilidad de un puerto analógico en el microcontrolador para la adquisición de datos. La lectura de las señales provenientes del sistema se realiza a través del pin A1, que envía la señal al conversor análogo-digital, garantizando una medición precisa de los valores de voltaje.

Finalmente, establecimos correctamente las conexiones de alimentación necesarias para el funcionamiento estable del sistema. Se utilizaron el pin "+3V3" para alimentar el microcontrolador, el pin "GND" como referencia común del sistema, y el puerto USB como interfaz de comunicación para la transferencia de datos hacia una computadora o dispositivo.

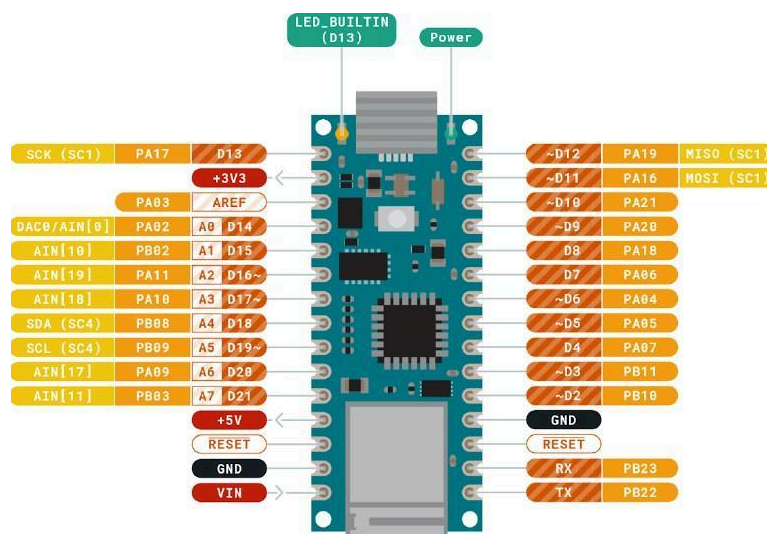


Figura 25. Pinout del Arduino Nano 33 IoT.

Fuente: Tomado de [36].

- *Código Multiplexor.*

En el programa Arduino IDE se desarrolla la primera sección del código correspondiente al microcontrolador, la cual está enfocada en el control secuencial y ordenado de los ocho transistores del sistema. En el cual se configuran los pines digitales asignados como salidas y se asegura que todos los transistores permanezcan inicialmente apagados. Para después ingresar al bucle, se activa uno por uno cada transistor mientras los demás se mantienen inactivos, lo que permite una conmutación precisa de las señales que controlan cada sensor.

Además, se imprime en el monitor serial un mensaje que indica cuál transistor está siendo activado, lo cual resulta útil para verificar el correcto funcionamiento del sistema y facilitar tareas de depuración y prueba durante el desarrollo.

A lo largo del desarrollo del proyecto, hemos ido añadiendo nuevas funciones y mejoras al código principal, con el fin de adaptar su funcionamiento a los requerimientos específicos de cada etapa. Estas modificaciones y ampliaciones se implementaron de forma progresiva conforme se integran y desarrollan los distintos subsistemas del sistema general. El código final será tratado en detalle en el siguiente subsistema “**6.3.3. Adquisición de señales**”.

- *Ruido Fuente Conmutada.*

Durante el proceso de adquisición de datos por parte del ADC, identificamos la presencia de un ruido persistente en las lecturas, evidenciado al graficar los valores, lo cual afectaba la precisión y confiabilidad de los datos obtenidos. Al tratar la situación por componentes se identificó el origen del ruido, conectando el microcontrolador en solitario a un osciloscopio evidenciamos como el componente degrada la señal de voltaje.

Consultando con profesionales sobre este fenómeno se encontró que la causa es atribuida a la fuente de alimentación conmutada o “buck converter”, un componente que ajusta el voltaje de alimentación USB de 5V a 3.3V. Este regulador DC–DC de alta eficiencia mejora la eficiencia del consumo energético, alimentando al microcontrolador con corriente estable.

Para mitigar este problema, optamos por retirar la fuente conmutada del Arduino Nano 33 IoT, dado que en aplicaciones sensibles, como la medición de señales analógicas de bajo voltaje y el procesamiento de señales el ruido de alta frecuencia generado por este tipo de fuentes puede interferir significativamente en el rendimiento del sistema. Otro punto a resaltar es considerando que el microcontrolador es alimentado por una fuente externa de 3.3 V, la eliminación de la fuente conmutada no solo contribuye a reducir la interferencia, sino que también disminuye el consumo energético innecesario, optimizando así la estabilidad, precisión y eficiencia general del sistema.

- *Amplificador de transimpedancia o acoplador.*

El amplificador de transimpedancia, conocido como *TIA* por sus siglas en inglés, es un circuito especializado en convertir señales de corriente en señales de voltaje. Es ampliamente empleado en sistemas de sensado donde las salidas se presentan en forma de corriente. [37]. Su principio de operación se fundamenta en el uso de un amplificador operacional configurado con retroalimentación negativa, en el cual una resistencia de realimentación, denominada R_f , dicho elemento transforma la corriente de entrada en un voltaje de salida de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$V_{out} = - I_{in} \times R_f$$

Ecuación 7. Voltaje de Salida del amplificador Transimpedancia.

Para mejorar la estabilidad del circuito y mitigar el ruido, es común incorporar un condensador en paralelo con la resistencia de realimentación “ R_f ”, lo que ayuda a suprimir oscilaciones no deseadas. Entre sus principales ventajas, el amplificador de transimpedancia sobresale por su elevada sensibilidad a corrientes extremadamente pequeñas, su bajo nivel de ruido y su capacidad para convertir de manera eficiente señales de corriente en voltaje, facilitando así su posterior procesamiento en sistemas electrónicos.

Para la selección del amplificador operacional, seguimos un procedimiento similar al utilizado para la elección del multiplexor, priorizando la capacidad de manejar una corriente de señal superior a 120 mA. Se consideraron amplificadores operacionales con una alta capacidad de corriente de salida, asegurando que pudieran manejar la demanda del sistema sin degradación en el rendimiento. Decidimos implementar el amplificador operacional de potencia “LM675”, el cual destaca por su capacidad de suministrar corrientes de salida superiores a 3 amperios y operar en un amplio rango de voltaje de alimentación. Debido a su uso sencillo en diversas configuraciones es un amplificador utilizado comúnmente en aplicaciones prácticas de control y sistemas de instrumentación.

Esta elección fue fundamental para garantizar una correcta conversión de corriente a voltaje en el amplificador de transimpedancia, evitando saturaciones o limitaciones en la entrega de corriente, lo que podría afectar la precisión de la medición y el procesamiento de la señal.

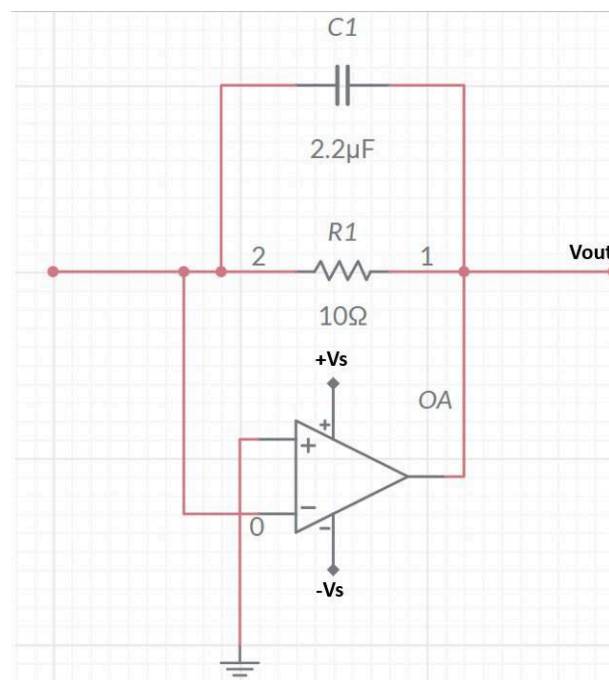


Figura 26. Diagrama de Conexión Amplificador Transimpedancia.
Fuente: Elaboración propia.

Como se ilustra en la anterior imagen, la configuración del amplificador de transimpedancia comienza conectando el *emisor común del multiplexor* a la entrada inversora, por otro lado la entrada no inversora se conecta a tierra. Para la conversión de corriente a voltaje, se coloca una resistencia de realimentación R_f , en este caso $R1$, entre la salida del opamp y su entrada inversora, así como el capacitor en paralelo.

Finalmente, la salida del amplificador proporcionará un voltaje proporcional a la corriente detectada por el sensor, permitiendo su posterior procesamiento.

- *Amplificador Inversor*

Al recibir la señal de salida del amplificador de transimpedancia, detectamos un voltaje negativo, lo cual impedía su correcta adquisición en un sistema diseñado para valores positivos. Para resolverlo, se implementó un inversor de señal utilizando el mismo amplificador operacional en configuración inversora, de modo que el voltaje negativo se convirtiera en un voltaje positivo proporcional.

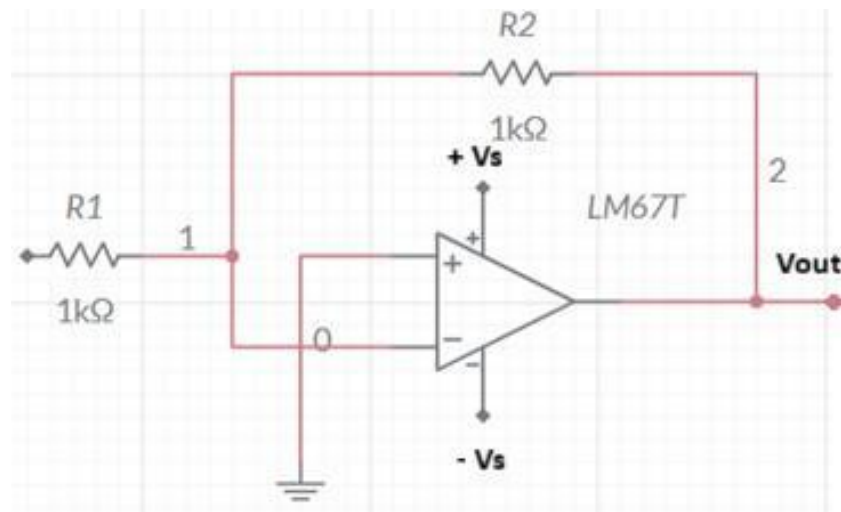


Figura 27. Diagrama de Conexión amplificador Inversor.
Fuente: Elaboración propia.

Se emplea el mismo amplificador operacional $LM675T$ para la etapa inversora, de esta manera se garantiza que la ganancia sea -1 (invertir la polaridad sin modificar la amplitud), las resistencias de entrada " $R1$ " y realimentación " $R2$ " se seleccionaron con el mismo valor. Tal como se muestra en la ecuación.

$$V_{out} = -V_{in}\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

Ecuación 8. Voltaje de Salida del amplificador inversor.

En este caso, empleamos dos resistencias de $1\text{ k}\Omega$, asegurando así que el voltaje negativo de entrada se convierta en un voltaje positivo de igual magnitud en la salida, sin introducir amplificación adicional.

Gracias a esta etapa de acondicionamiento, la señal resultante puede ser interpretada y muestreada adecuadamente por el convertidor analógico-digital, garantizando una adquisición de datos precisa y consistente.

- *Capacitor Bypass.*

A pesar de ser posible la captura de datos a través del ADC, persistía la presencia de ruido que afectaba el procesamiento de las respectivas señales, registrando valores con una desviación considerable entre un dato y otro. Para mitigar este problema, decidimos implementar capacitores de bypass en la alimentación del amplificador operacional *LM675T*, específicamente en las terminales -VEE y VCC de la etapa de acople. Estos capacitores actúan como filtros, reduciendo el ruido y las fluctuaciones no deseadas en la señal eléctrica al proporcionar un camino de baja impedancia para las señales de alta frecuencia hacia tierra. Para optimizar su efectividad, los capacitores fueron colocados lo más cerca posible de los pines de alimentación del dispositivo, minimizando así la inductancia parásita y asegurando un amplio rango de frecuencias de bypass. [38].

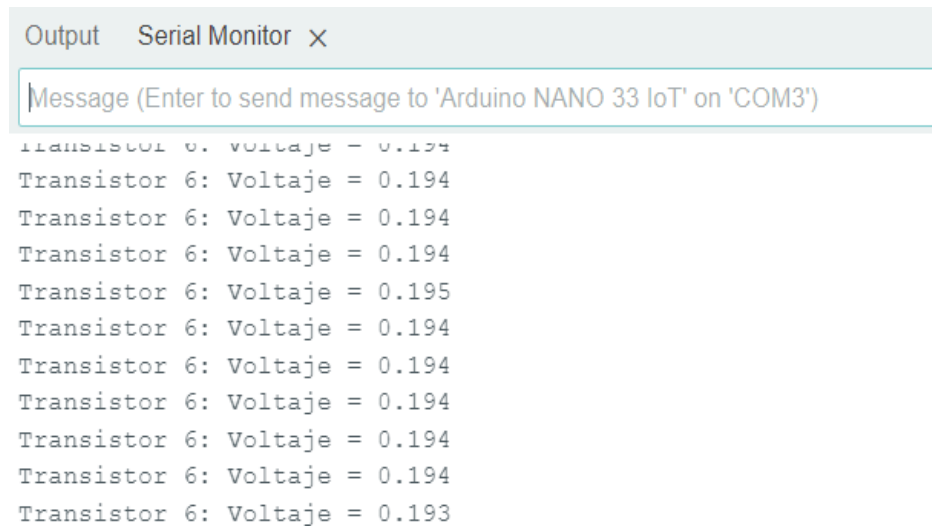
Se utilizaron dos capacitores de 10 microfaradios, siendo valores altos de capacitancia ideales para manejar las frecuencias más bajas. De esta manera, logramos mejorar significativamente la estabilidad del sistema, minimizar las interferencias y optimizar la precisión en la adquisición de datos. En este proyecto, los capacitores de bypass implementados en la alimentación del amplificador operacional cumplen la función de filtros pasabajos, ya que atenúan el ruido y las señales de alta frecuencia, permitiendo únicamente el paso de la componente de baja frecuencia necesaria para el correcto funcionamiento del circuito.

6.3.3. Adquisición de Señales

Un conversor análogo-digital o “ADC” es un dispositivo cuya función es transformar una señal eléctrica análoga en un número digital equivalente, permitiendo así la compatibilidad entre el mundo real y los sistemas digitales. [39]. Para realizar esta conversión de manera precisa, debe garantizarse una correcta toma de muestras y un procesamiento adecuado, considerando parámetros como la velocidad de conversión, la resolución y los rangos de entrada.

El sistema electrónico desarrollado utiliza un microcontrolador SAMD21, reconocido por su precisión en la lectura de señales durante procedimientos prolongados, lo que lo hace ideal para aplicaciones de conectividad exigentes. Este microcontrolador, integrado en la placa Arduino Nano 33 IoT, cumple la función central en el proceso de adquisición de datos, ya que convierte las señales analógicas de voltaje, provenientes del amplificador inversor, en datos digitales. De esta forma, es posible visualizar, almacenar y procesar la información registrada, tal como se presenta el archivo Arduino IDE. El código que implementamos se destaca por su configuración detallada del ADC mediante acceso directo a registros, lo cual permite un control acertado de parámetros.

Los datos convertidos son visualizados por el usuario en la ventana del “Serial Monitor” del programa, por lo que se logra percibir como es el resultado del proceso de transformación.



```
Output Serial Monitor X
Message (Enter to send message to 'Arduino NANO 33 IoT' on 'COM3')
Transistor 6: Voltaje = 0.194
Transistor 6: Voltaje = 0.194
Transistor 6: Voltaje = 0.194
Transistor 6: Voltaje = 0.194
Transistor 6: Voltaje = 0.195
Transistor 6: Voltaje = 0.194
Transistor 6: Voltaje = 0.194
Transistor 6: Voltaje = 0.194
Transistor 6: Voltaje = 0.194
Transistor 6: Voltaje = 0.194
Transistor 6: Voltaje = 0.194
Transistor 6: Voltaje = 0.193
```

Figura 28. Visualización de datos en Arduino IDE.

Fuente: Elaboración propia.

- *Código final - Arduino IDE.*

Una vez convertidos los registros al plano digital, se estructura el código universal, lo que permite la intervención del multiplexor de forma concurrente con la conversión de los voltajes correspondientes a cada uno de los sensores, sin interrupciones.

Del mismo modo, incorporamos una nueva funcionalidad al código, definida como un tiempo de precalentamiento para los ocho sensores. Antes de comenzar a recibir, convertir y expresar los datos de voltaje, se establece un intervalo destinado a que los sensores GO se calienten mediante el paso de corriente eléctrica. De esta manera, al momento de iniciar la adquisición de datos, los sensores se encuentran lo suficientemente calientes para garantizar mediciones más precisas.

El código acoplado tiene como objetivo medir señales de voltaje provenientes de diferentes sensores, utilizando un sistema de adquisición de datos eficiente que combina el control secuencial de transistores. Según las especificaciones, los datos análogos son convertidos en valores de voltaje considerando una referencia de 1.0 V. Esta referencia fue seleccionada con el propósito de minimizar la reducción de voltaje durante la conversión analógico-digital, garantizando así una mayor sensibilidad y precisión en la detección de pequeñas variaciones de señal. Además, para mejorar la estabilidad y confiabilidad de las mediciones, el ADC está configurado para aplicar un promedio de 128 muestras internas.

Lo interesante es entender cómo mediante un único canal de entrada analógica, se puedan leer múltiples señales de forma ordenada y controlada.

Al inicio, el programa realiza el proceso de precalentamiento durante 60 segundos, en el cual cada transistor se enciende de manera cíclica cada 5 segundos. Luego de este período, el programa activa uno a uno los transistores, realiza 100 lecturas de voltaje por cada uno y envía los resultados al monitor serial. Entre cada lectura se respeta un pequeño retraso de 10 microsegundos para permitir la adquisición de datos, y entre cada transistor se incluye un retraso adicional de 500 milisegundos para garantizar una conmutación ordenada.

- *Registros internos del ADC*

En el sistema de adquisición de datos implementado, los registros más trascendentes del ADC en el microcontrolador SAMD21 son aquellos que permiten configurar el comportamiento básico del módulo como iniciar conversiones y recuperar datos con precisión. Entre ellos, se destacan el registro “CTRLA” para habilitar el ADC, “SWTRIG” para activar la conversión por software y “INTFLAG” para verificar cuándo el resultado está disponible. El registro “RESULT” contiene el valor digital correspondiente a la señal analógica leída, siendo este el dato principal que se interpreta en términos de voltaje. Adicionalmente, “INPUTCTRL” configura el canal de entrada, la ganancia y el modo de operación, mientras que “REFCTRL” determina la fuente de referencia de voltaje. Para mejorar la estabilidad de las mediciones, utilizamos los registros “CTRLB” y “AVGCTRL”, los cuales permiten ajustar el prescaler del reloj del ADC y aplicar promedio de 128 muestras con ajuste de resolución, respectivamente. [40].

En conjunto, estos registros garantizan un proceso de adquisición confiable y repetible, fundamental para la correcta lectura de los sensores utilizados en el anemómetro.

- *Características de configuración del ADC*

En general, el código expresa los siguientes parámetros principales:

Resolución del ADC: 12 bits.

La resolución de 12 bits del ADC le permite dividir el rango de voltaje de referencia, 1.0 V en 4096 niveles distintos. Lo que equivale a una precisión de aproximadamente 0.244 milivoltios usando la siguiente ecuación.

$$\frac{1.0 V}{4096} = 0.244 mV$$

Ecuación 9. Resolución del ADC.

Esto significa que el sistema puede detectar y representar variaciones muy pequeñas de voltaje, lo cual es ideal para este proyecto en el que se requiere alta sensibilidad en la adquisición de señales analógicas.

Referencia de voltaje: Interna.

Para asegurar lecturas precisas y estables, configuramos el conversor para utilizar la referencia interna de 1.0 voltio. Por lo que los voltajes adquiridos tendrán un valor entre 0 V y 1V, al convertir las señales a un rango definido se garantiza una conversión más confiable.

Ganancia del ADC.

La ganancia configurada determina cómo se amplifica la señal de entrada antes de ser convertida a digital. En este caso, utilizamos una ganancia de 1X, lo que significa que la señal se mide tal como se recibe, sin amplificación

Tiempo de conmutación entre transistores.

El tiempo de conmutación entre transistores está establecido en 500 milisegundos, medio segundo, lo que permite cambiar de manera controlada entre los diferentes canales de lectura en el sistema multiplexado. Este intervalo asegura que cada transistor se active de forma suficiente para realizar las lecturas sin interferencias entre canales.

Número de lecturas del transistor por ciclo.

El número de lecturas por transistor lo hemos fijado en 100 datos por ciclo, con el objetivo de obtener un promedio representativo y confiable de la señal adquirida en cada canal del sistema multiplexado.

Delay entre lecturas de voltaje.

Configuramos un retardo de 10 microsegundos entre cada lectura de voltaje con el fin de permitir una separación mínima pero suficiente entre conversiones sucesivas del ADC. Este breve intervalo ayuda a estabilizar la señal entre muestras, evitando lecturas erráticas.

Frecuencia de Muestreo

Considerando la unión de los ocho canales, se deberá calcular:

$$\begin{aligned}t_{lecturas} &= 100 \text{ lecturas} \cdot 10\mu s \\t_{lecturas} &= 100 \text{ lecturas} \cdot 0.00001s \\t_{lecturas} &= 1 \text{ ms}\end{aligned}$$

Después se le adiciona el retardo por conmutación de transistores, 500 ms.

$$t_{totalxcanal} = 1ms + 500 ms$$
$$t_{totalxcanal} = 501 ms$$

Cómo son ocho canales, se debe multiplicar ese tiempo.

$$t_{ciclocompleto} = 501 ms \cdot 8 = 4.008s$$

Se calcula el número de muestras por ciclo completo.

$$Muestras\ totales = 8 \cdot 100\ lecturas$$
$$Muestras\ totales = 800\ muestras$$

Por último se calcula la frecuencia de muestreo.

$$f_{muestreo} = \frac{Número\ total\ de\ muestras}{tiempo\ ciclo\ completo} = \frac{800}{4.008}$$
$$f_{muestreo} \approx 199.6\ Hz$$

6.3.4. Procesamiento de los Datos

- *Comunicación Serial Arduino - Python.*

A través de un código en lenguaje Python, establecemos una comunicación Serial con la placa Arduino Nano 33 IoT a ambos estar conectados al puerto 'COM3', configurado a una velocidad de transmisión de 9600 baudios. Su propósito es la adquisición y almacenamiento de datos de voltaje correspondientes a ocho transistores conectados al sistema. Para la gestión de los registros, implementamos un diccionario que vincula cada transistor con un archivo de texto específico, en el cual se consignan sus respectivas mediciones.

Durante la ejecución, el programa opera en un ciclo continuo, leyendo las líneas de datos recibidas a través del puerto serial, identificando el transistor asociado a cada medición, y almacenando los valores de voltaje en el archivo de texto “.txt” correspondiente. De este modo, en cada ejecución del código se generan ocho archivos de texto, cada uno destinado a registrar las mediciones de un transistor particular.

```
≡ Transistor1Prueba17#4-0V.txt
1    0.188
2    0.188
3    0.188
4    0.188
5    0.188
6    0.188
7    0.188
8    0.188
9    0.188
10   0.188
```

Figura 29. Visualización de datos en formato .txt.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos transmitidos son almacenados en una única columna en los archivos generados. A diferencia de la representación gráfica que se observa en la pestaña “*Serial Plot*” del entorno de desarrollo Arduino IDE, en este caso únicamente se registra el valor numérico del voltaje, sin incluir información adicional como el número de transistor correspondiente.

- *Representación de los datos*

La siguiente etapa desarrollada en MATLAB, tuvo como objetivo procesar y analizar datos experimentales de voltaje obtenidos de un transistor, previamente almacenados en el archivo de texto. En primera instancia, el código carga el conjunto de datos y genera un vector de tiempo asociado.

Un aspecto adicional considerado en el procesamiento de la señal fue la implementación de un filtro digital destinado a mitigar el ruido presente entre las lecturas de voltaje. Para ello, empleamos el filtro de mediana unidimensional proporcionado por MATLAB, mediante la función “*MedFilt1*”, este filtro pasabajas no lineal es ampliamente utilizado en el tratamiento de señales afectadas por ruido. En este caso particular, definimos una ventana de filtrado (vecindario) de 51 muestras, lo que permite suavizar la señal preservando, al mismo tiempo, las características relevantes de la dinámica del sistema.

Una vez se cuenta con la señal de voltaje filtrada es posible representar los datos discretos en el dominio del tiempo, tal cual se presenta en el apartado de “**7.1. Resultados**”. Del mismo modo, posibilita la predicción de presencia de viento en el sistema mediante la derivada instantánea. Una función matemática que indica la rapidez con la cambia la señal en un punto específico del tiempo, en resumen, permite saber qué tan rápido está cambiando la señal de voltaje.

Al trabajar en un entorno de datos discretos con un número finito de muestras, la derivada de la señal no puede calcularse de manera analítica, por lo que debe aproximarse mediante una ecuación de diferencias finitas, expresada de la siguiente forma:

$$\frac{dV}{dt} \simeq \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta t}$$

Ecuación 10. Derivada Instantánea Discreta.

En MATLAB, esta ecuación fue implementada mediante la función “*diff*”, que permite calcular las diferencias entre valores de voltaje adyacentes. Dichas diferencias se normalizan dividiéndolas por el intervalo temporal constante, lo que proporciona una estimación discreta de la derivada, expresada en voltios por segundo (V/s). Este procedimiento facilita la identificación de los instantes en los que la señal presenta sus mayores variaciones. [41].

Identificamos el valor máximo absoluto de la derivada, así como el instante de tiempo en el que este ocurre. Estos resultados son graficados e impresos en la consola “*Command Window*”, proporcionando información clave sobre el comportamiento dinámico del transistor bajo prueba, en particular sobre los momentos de mayor variación en la señal de voltaje.

Este procedimiento aporta información fundamental acerca del comportamiento dinámico del transistor en estudio, destacando los períodos de mayor variación en la señal de voltaje, lo cual resulta de gran relevancia para el análisis de su respuesta transitoria.

- *Modelado del Sistema de Medición del Flujo de Viento.*

Para cumplir con el objetivo general, orientado al desarrollo de un sistema capaz de determinar la velocidad del flujo de aire a partir de la disipación térmica, implementamos un protocolo de estandarización de las mediciones. El enfoque experimental se basa en el uso de un *termoanemómetro digital Minipa MDA-11* como instrumento de referencia para registrar las magnitudes del flujo de aire aplicado al arreglo de resistencias. Este dispositivo permite medir la velocidad del viento en un rango de 0.4 a 30 m/s, con una precisión de $\pm(3\% + 0.1 \text{ m/s})$ y resolución de 0.01 m/s, lo que garantiza la confiabilidad de las mediciones empleadas para la calibración del sistema. [42]. Los flujos de aire se generaron de manera controlada mediante un ventilador portátil, cuya tasa de flujo se ajustó regulando el voltaje de alimentación; en este caso, se utilizaron cuatro valores de voltaje específicos: 9V, 12V, 13.5V y 15 V.

Antes de iniciar con el plan de acción, diseñamos un recinto en la plataforma de modelado 3D “*TinkerCAD*”, con el propósito de aislar el sistema de variables externas no deseadas. De este modo, se busca obtener registros de medición lo más precisos y reproducibles posible, minimizando la influencia de factores ambientales que puedan afectar el comportamiento del sistema.

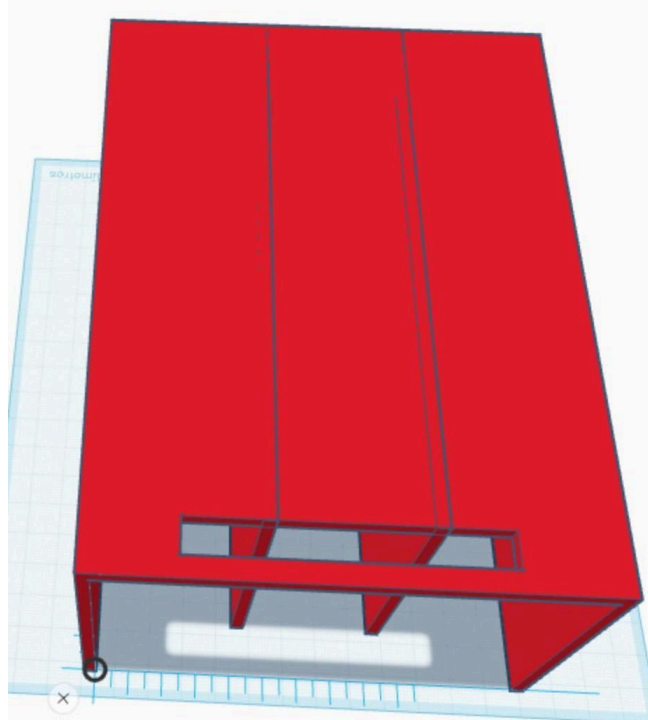


Figura 30. *Perspectiva Superior del modelo en TinkerCad.*
Fuente: *Elaboración propia.*

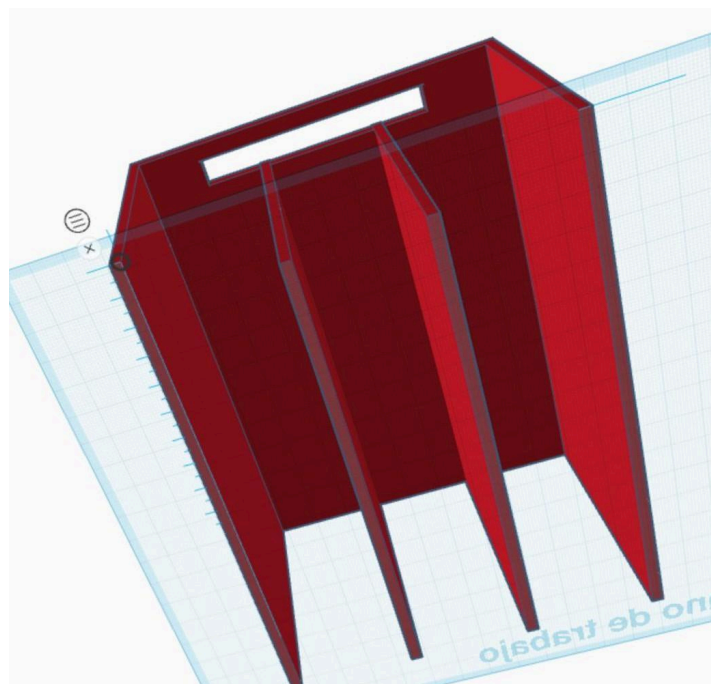
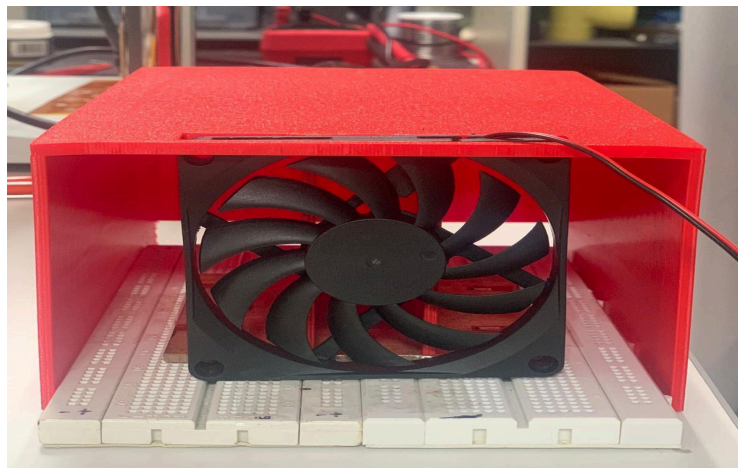


Figura 31. *Perspectiva Inferior del modelo en TinkerCad.*
Fuente: *Elaboración propia.*

El modelo cuenta con una estructura cerrada en sus laterales y parte superior, e incorpora tabiques internos que dividen el espacio en tres sectores, previamente descritos en el subsistema **6.2.1. Sensores de Grafeno**. Esta configuración permite canalizar el flujo de aire de manera diferenciada hacia cada sección del arreglo de sensores, lo que facilita un análisis detallado del comportamiento del sistema en función de la dirección y la velocidad del flujo. Además, añadimos una abertura en la parte superior destinada a la instalación del ventilador. El recinto fue fabricado mediante impresión 3D en la impresora del Centro de Automatización de Procesos de la Pontificia Universidad Javeriana Cali. Una vez completada la fabricación, procedimos a instalar la estructura sobre el arreglo de sensores y a acoplar el ventilador portátil.



*Figura 32. Figura impresa y equipada.
Fuente: Elaboración propia.*

El ventilador de fuente de poder presenta un rango de operación típico entre **7V** y **12V**, donde una menor tensión reduce la velocidad de giro y el nivel de ruido. En las pruebas realizadas, se utilizó un rango de **9V**, ya que desde ese punto comenzó a ofrecer un flujo de aire adecuado. No obstante, se comprobó que al aplicarle **15V** alcanzó su máximo desempeño, aunque este nivel de voltaje excede la especificación recomendada y puede dañar el motor, reduciendo drásticamente su vida útil.

Al hacer las pruebas y registrar los datos obtenidos se realizó un promedio, arrojando los resultados que se muestran en la siguiente tabla.

Voltaje y Sector	Minipa MDA-11 - Magnitud (m/s)
9V	
Sector 1	0.57
Sector 2	1.5
Sector 3	0.42
12V	
Sector 1	0.65
Sector 2	1.70
Sector 3	0.54
13.5V	
Sector 1	0.75
Sector 2	1.80
Sector 3	0.56
15V	
Sector 1	0.77
Sector 2	1.87
Sector 3	0.66

Cuadro 4. Valores Registrados con el Anemómetro Digital.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que, en general, a medida que aumenta el voltaje aplicado al ventilador, la magnitud del flujo de aire incrementa en todos los sectores, lo que es consistente con un mayor caudal generado por el ventilador. Avanzando en el tema, se evidencia que el Sector 2 presenta las mayores velocidades de flujo en todas las condiciones de prueba, mientras que los Sectores 1 y 3 muestran valores significativamente menores. Esta observación sugiere una concentración del flujo de aire, causado por cómo está posicionado el ventilador, que favorece un perfil de flujo más pronunciado en el sector medio (Sector 2).

- *Representación Matemática empleando Origin Lab.*

Al contar con las mediciones del flujo de aire que atraviesa cada resistencia y los valores de voltaje correspondientes, es posible establecer la relación entre ambas variables mediante una ecuación lineal:

$$y = mx + b$$

Ecuación 11. *Ecuación Lineal general .*

Donde el valor de la *variable Y* está correspondido a los valores reales del flujo de viento que se encuentran en el cuadro No. 4, mientras que la variable X representa los registros obtenidos por el ADC. No obstante, los parámetros de la pendiente (m) y de la ordenada al origen (b) son inicialmente desconocidos, por lo que necesitamos calcularlos a partir de los datos experimentales.

La técnica empleada para este análisis fue el tratamiento de la ecuación mediante el método matemático y estadístico de los mínimos cuadrados. A partir de un conjunto de datos experimentales, este método permite ajustar una línea recta, es decir, encontrar la ecuación lineal que mejor se aproxima a los valores observados en el plano, minimizando la suma de los errores cuadráticos y los valores predichos por el modelo. [43].

El análisis de las expresiones matemáticas asociadas al método de mínimos cuadrados permite obtener las fórmulas necesarias para el cálculo de la pendiente (m) y la ordenada al origen (b), a partir del conjunto de datos experimentales.

$$m = \frac{\Sigma xy - \frac{(\Sigma X)(\Sigma Y)}{n}}{\Sigma X^2 - \frac{(\Sigma X)^2}{n}}$$

Ecuación 12. *Ecuación de la pendiente.*

$$b = \frac{\Sigma Y - m \Sigma X}{n}$$

Ecuación 13. *Ecuación del Punto de Origen.*

En este caso para la realización del ajuste lineal, empleamos el software “OriginLab”, herramienta especializada en el análisis y visualización de datos científicos. A través de su función de regresión lineal, se aplicó el método de los mínimos cuadrados a los datos experimentales, permitiendo obtener de manera precisa los parámetros de la ecuación ajustada, así como los respectivos indicadores de calidad del ajuste.

A(X)	B(Y)
Velocidad del viento	Voltaje ADC de Referencia
m/s	V
SECTOR 1	
R1	
0,57	0,1955
0,65	0,1947
0,75	0,1941
0,77	0,1937

Figura 33. Datos de las Magnitudes relacionadas Sensor 1.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura No. 33 se presentan los datos experimentales correspondientes al Sector 1, específicamente al datos respectivos del sensor número uno. Es en este espacio donde se relaciona la velocidad del viento (m/s) con el voltaje de referencia medido por el ADC (Voltaje), evidenciando a la variable “Velocidad del viento” como la independiente.

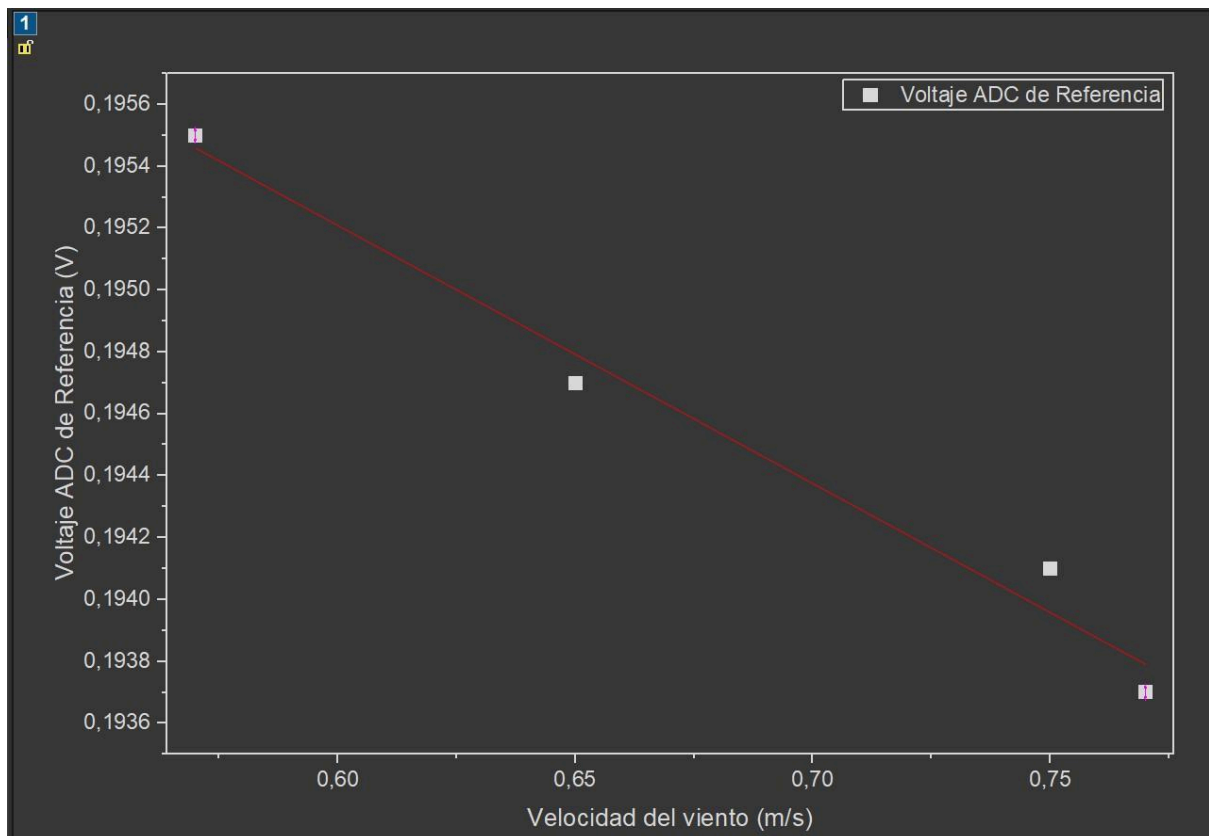


Figura 34. Gráfica de Ajuste Lineal Sensor 1.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura No. 34 se presenta el resultado del ajuste lineal entre la velocidad del viento y el voltaje ADC de referencia. La línea de tendencia obtenida evidencia una correlación lineal inversa entre ambas variables, indicando que el incremento en la velocidad del flujo de aire produce una disminución proporcional en el voltaje registrado por el ADC. Este comportamiento confirma la sensibilidad del sensor frente a las variaciones del flujo de aire y la respuesta consistente del sistema de adquisición de datos.

Equation	$y = a + b*x$
Plot	Voltaje ADC de Referen
Intercept	0,20021 ± 5,95459E-4
Slope	-0,00834 ± 8,63347E-4
R-Square (CO	0,97902
Adj. R-Square	0,96852

Figura 35. Estadísticas del Sistema Matemático Sensor 1.

Fuente: Elaboración propia.

El ajuste lineal realizado para el primer sensor arrojó los siguientes resultados: la pendiente “m” tiene un valor de -0.00834, mientras que el intercepto u ordenada al origen “b” corresponde a 0.20021. Para fines prácticos, omitimos los valores asociados a las incertidumbres de estos parámetros. Otros elementos relevantes son el coeficiente de determinación “R-Square (COD)”, cuyo valor obtenido fue 0.97902 y el “Adj R-Square”, que corresponde a una versión ajustada del coeficiente de determinación que considera tanto la cantidad de variables del modelo como el número de datos, con un valor superior a 0.96. Ambos indicadores reflejan un excelente nivel de ajuste del modelo lineal a los datos experimentales.

Estos resultados respaldan la validez del modelo propuesto para estimar la velocidad del flujo de aire a partir de la medición del voltaje en este sector del sistema.

Este procedimiento lo realizamos de manera individual para cada uno de los ocho sensores, obteniendo en el proceso los valores correspondientes de pendiente y ordenada al origen. En consecuencia, se utilizarán ocho ecuaciones lineales distintas para el cálculo de la magnitud del viento en el sistema. Para fines prácticos, optamos por almacenar dichos valores en un directorio incluido en el código implementado para el subsistema **“6.3.6. Representación de los datos”**.

6.3.5 Placa de Circuito Impreso

Como parte de los objetivos del diseño, fue necesario cumplir con estándares específicos de tamaño, peso y facilidad de uso, con el fin de garantizar la eficiencia y funcionalidad del sistema. En este sentido, el diseño y fabricación de la PCB la llevamos a cabo bajo estrictas especificaciones dimensionales, de manera que su implementación no comprometiera el rendimiento del dispositivo final.

- *Fabricación.*

El circuito impreso presenta unas dimensiones compactas de 62.75 mm de largo por 49.5 mm de ancho, lo cual responde a la necesidad de integrar funcionalmente todos los componentes electrónicos en un espacio reducido, manteniendo al mismo tiempo una organización lógica que optimiza el flujo de señales, la disipación térmica y la facilidad de diagnóstico técnico.

La distribución de los componentes en la placa la diseñamos siguiendo el orden lógico de funcionamiento del sistema. En la sección inicial, ubicada en uno de los extremos del PCB, se encuentran los módulos de amplificación e inversión de voltaje, encargados de adaptar los niveles eléctricos de entrada para el correcto funcionamiento de los módulos subsiguientes. Esta etapa garantiza que las tensiones sean estables y compatibles con los rangos operativos del sistema, en especial del microcontrolador.

A continuación, en el área central de la placa, disponemos del microcontrolador, el cual actúa como núcleo de procesamiento del sistema. Su ubicación céntrica permite reducir la longitud de las pistas que lo interconectan con las diferentes unidades periféricas, minimizando interferencias y mejorando la confiabilidad del sistema.

Seguidamente, se encuentra la etapa de multiplexación, que cumple la función de gestionar múltiples señales de entrada provenientes de sensores, optimizando el uso de entradas del microcontrolador. Esta sección se encuentra alineada hacia los extremos de la placa para facilitar la conexión física con los sensores externos.

Por último, la zona de recepción y captura de datos se ubica en el extremo opuesto al de alimentación, permitiendo un direccionamiento claro y ordenado del flujo de información desde los sensores hasta la etapa de procesamiento. Esta distribución favorece además la depuración del diseño al evitar cruces innecesarios de pistas, reduciendo el ruido electrónico y mejorando la integridad de la señal.

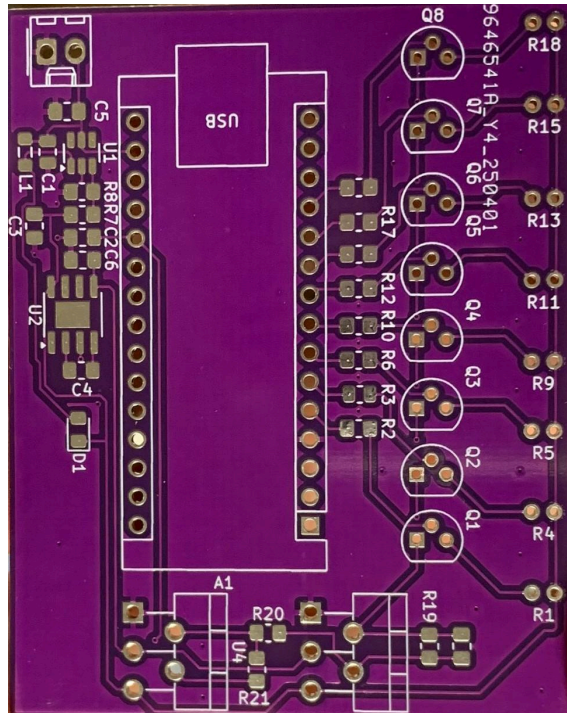


Figura 37. Diseño en la placa física.
Fuente: Elaboración propia.

6.3.6. Representación de los datos

El último paso de la metodología del sistema contempla una solución práctica que permite al usuario acceder, visualizar e interpretar de manera efectiva los datos registrados por el anemómetro. En este contexto, diseñamos una interfaz utilizando el lenguaje de programación Python.

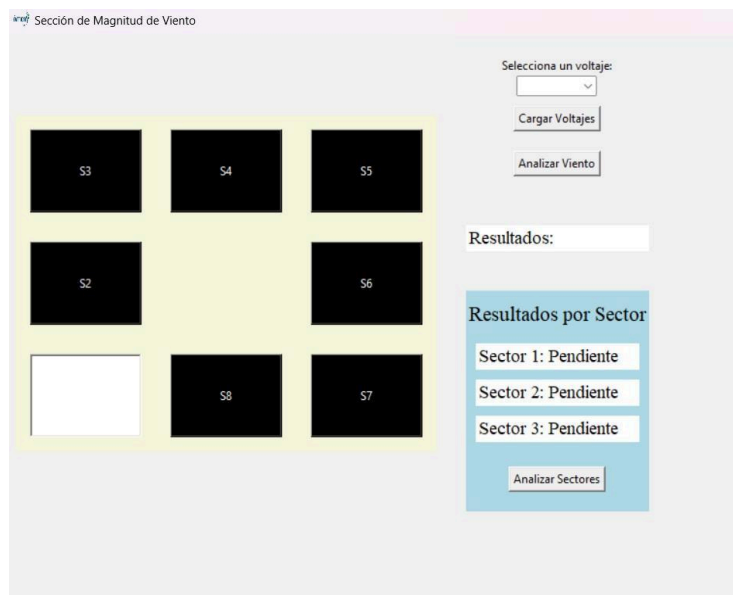


Figura 38. Interfaz de usuario.
Fuente: Elaboración propia.

La interfaz gráfica desarrollada presenta un diseño intuitivo, orientado a facilitar la interacción del usuario con el sistema de adquisición de datos. En el lado izquierdo, se dispone un panel conformado por ocho recuadros organizados en una cuadrícula, cada uno etiquetado de “S1” a “S8”, que representan los distintos sensores en los tres sectores establecidos. Los recuadros aparecen de color negro de manera predeterminada, excepto por el recuadro correspondiente al sensor S1, el cual se muestra en blanco para indicar que está actualmente seleccionado.

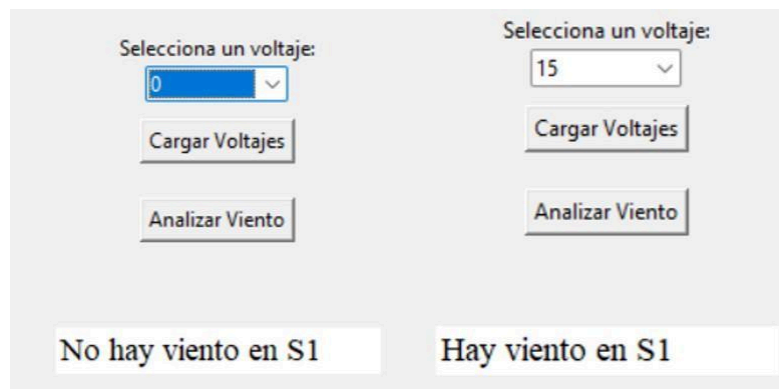


Figura 39. Sección de Identificación de presencia de viento.

Fuente: Elaboración propia.

En la interfaz gráfica, el usuario puede seleccionar un valor de voltaje asociado a un sensor específico, en este caso el sensor No. 1, a través de un menú desplegable. Posteriormente, al presionar el botón “*Analizar Viento*”, se ejecuta un análisis basado en el valor de voltaje cargado.

Dependiendo del valor del voltaje seleccionado, el sistema interpreta y despliega un mensaje en el rectángulo blanco: si el voltaje seleccionado es bajo o nulo se muestra el mensaje “*No hay viento en S1*”, indicando que no se detecta movimiento de aire en ese sensor. Sin embargo, si el voltaje tiene un valor significativo como son los 15V, el mensaje que aparece es “*Hay viento en S1*”, señalando la presencia de viento en esa posición.

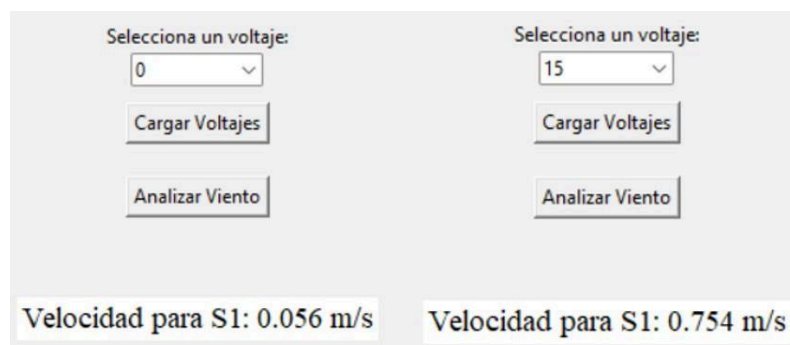


Figura 40. Sección de Visualización de la magnitud del viento.

Fuente: Elaboración propia.

La siguiente opción presenta una metodología similar, esta vez al presionar el botón “*Cargar Voltajes*” el sistema calcula y muestra la velocidad del viento correspondiente en metros por segundo (m/s). En este caso se puede apreciar como a 0V prácticamente no se tiene una velocidad de viento considerable, caso puesto al estudiar la magnitud del flujo de aire en 15V.

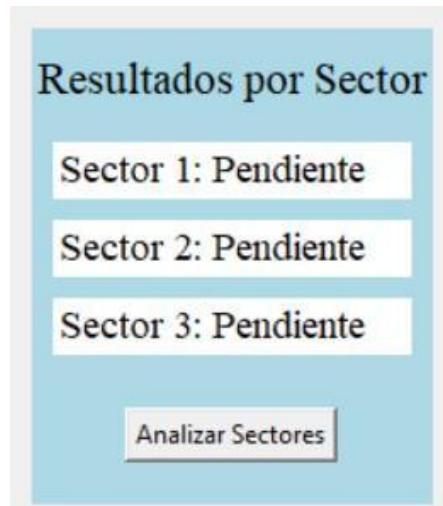


Figura 41. Sección de Resultados por sector.
Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, presentamos un módulo denominado “Resultados por Sector”, donde los sensores se agrupan en tres sectores distintos. Cada sector aparece inicialmente marcado como “**Pendiente**”, indicando que aún no se ha realizado el análisis correspondiente. Para acceder a los datos de cada sector, basta con haber cargado previamente los datos de la magnitud del flujo de viento, como se explicó anteriormente, y ejecutar el botón “**Analizar Sectores**”. Inmediatamente, se indicará el cambio más alto registrado por el sensor correspondiente a cada sector. Esta información se utiliza como un trazado aproximado de la dirección del aire.

- *Realización de la interfaz mediante tkinter.*

Este código en Python implementa una interfaz gráfica desarrollada con la librería Tkinter, diseñada para analizar la magnitud del viento a través de señales obtenidas desde sensores conectados a transistores.

Al inicio, definimos los parámetros de ajuste lineal hallados para cada uno de los ocho sensores, los cuales permiten convertir valores de voltaje en velocidades de flujo de aire. A continuación, desarrollamos *tres funciones* principales: la función “*cargar_velocidad*” lee un archivo .txt correspondiente al sensor seleccionado y al voltaje elegido, promedia los datos por bloques de 1700 muestras, y luego utiliza los parámetros lineales definidos para calcular y mostrar la velocidad media en metros por segundo.

La función "*analizar_viento*" también carga datos desde archivos, aplica un filtro de mediana para suavizar la señal, calcula la derivada del voltaje respecto al tiempo y determina si hay presencia de viento según un umbral preestablecido, que en este caso es un intervalo entre -0.016 y 0.016 V/s. Por su parte, la función "*analizar_sectores*" divide los sensores en tres sectores y determina cuál sensor en cada uno presenta el mayor cambio de voltaje, indicativo de viento, actualizando la interfaz con esa información.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Resultados

A continuación, presentamos y describimos seis secciones relacionadas con los resultados obtenidos durante el desarrollo de este proyecto de grado. Las dos primeras, ***“Gráficas en el dominio del tiempo”*** e ***“Identificación de la presencia de viento”***, abordan el procesamiento e interpretación de los datos registrados por el anemómetro.

Posteriormente, la sección ***“Análisis de la desviación estándar en la respuesta de los sensores frente a la velocidad del viento”*** permite evaluar la consistencia y variabilidad de las mediciones, aportando un criterio cuantitativo para validar la confiabilidad del sistema. Finalmente, la sección ***“Modelado predictivo del sistema”*** presenta el ajuste de los datos experimentales a modelos matemáticos que permiten estimar el comportamiento del anemómetro bajo diferentes condiciones de flujo.

Finalmente, el apartado ***“Placa de Circuito Impreso”*** describe la solución propuesta frente a las limitaciones de los anemómetros tradicionales, mediante el diseño de un sistema ligero, compacto y fácilmente integrable. El siguiente, ***“Interacción de los resultados mediante interfaz”*** expone la forma en que se visualizan las variables de interés asociadas al funcionamiento del anemómetro: presencia, dirección y magnitud del flujo de viento.

- *Gráficas en el Dominio del tiempo.*

Como mencionamos en la sección correspondiente al subsistema de procesamiento de datos, empleamos el software “MatLab” para representar de forma bidimensional los datos obtenidos por el sistema, con el fin de facilitar su análisis e interpretación.

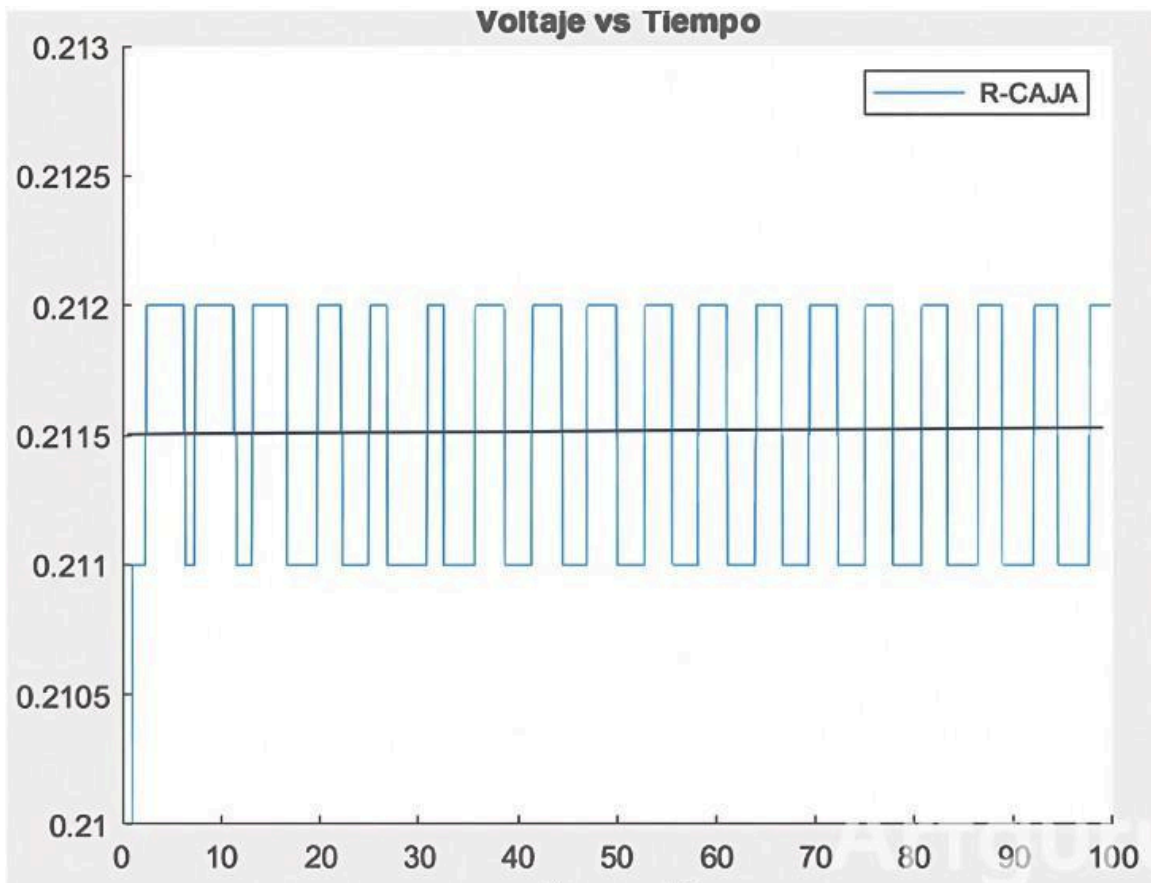


Figura 42. Gráfica de los datos; Sensor sin presencia de viento.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura No. 42 presenta la gráfica de voltaje vs tiempo obtenida para la resistencia de referencia "R-CAJA", correspondiente a la condición en la que la resistencia no se encuentra expuesta al flujo de aire. La señal, registrada a lo largo de un intervalo de 100 segundos, muestra mínimas fluctuaciones del voltaje en el rango de aproximadamente 0.211V a 0.212V (0.001V aproximadamente), las cuales reflejan el comportamiento natural del sistema en ausencia de viento. Esta medición de referencia es fundamental para establecer una línea base, permitiendo comparar posteriormente la respuesta del sensor en presencia de flujo de aire y así identificar variaciones atribuibles a la acción del viento.

- *Identificación de la presencia de viento.*

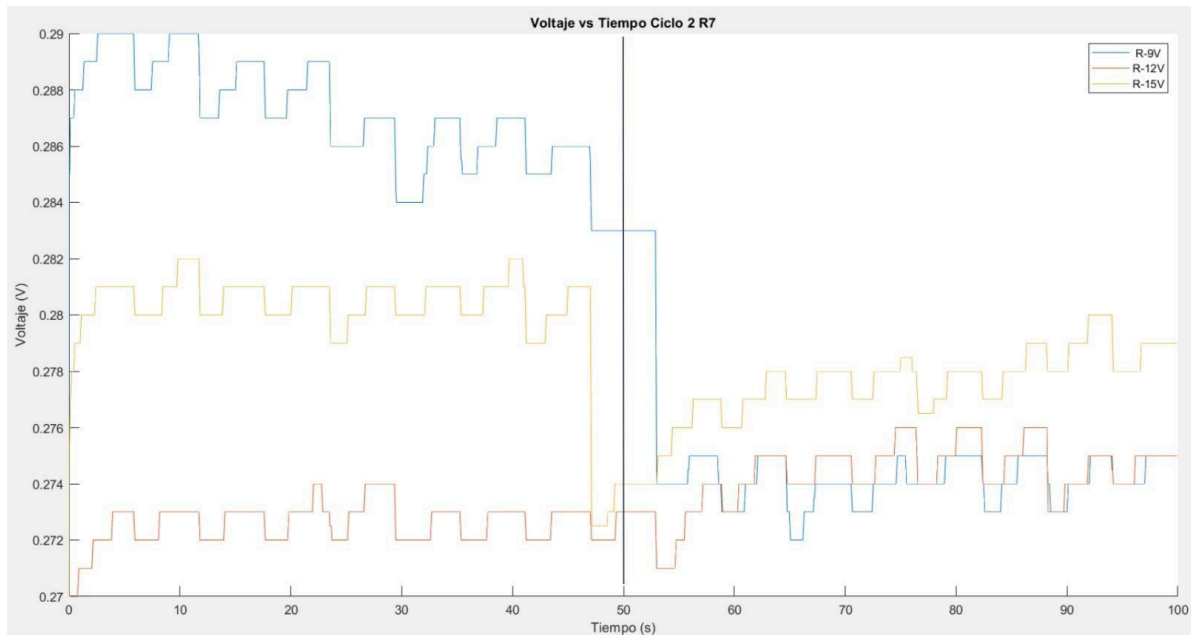


Figura 43. Gráfica de presencia de viento a diferentes voltajes.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura No. 43 se muestra la evolución temporal del voltaje medido por el sensor durante un ciclo experimental diseñado para identificar la presencia de viento. La metodología consistió en operar el ventilador a tres niveles de voltaje de alimentación: 9V referenciado con el color azul, 12V con el naranja y 15V con el amarillo. Así mismo, aplicamos de manera continua el flujo de aire durante los primeros 50 segundos del registro. Posteriormente, el ventilador fue apagado, y se continuó la adquisición de datos durante otros 50 segundos para observar la respuesta del sistema en ausencia de flujo.

Se puede apreciar que, durante la etapa con viento, las curvas correspondientes a cada nivel de voltaje presentan valores de voltaje diferenciados, en concordancia con la magnitud del flujo de aire generado por el ventilador. Al producirse el apagado del ventilador, se observa una caída abrupta en las lecturas de voltaje en las tres curvas, seguida de una estabilización progresiva. Esta disminución se debe a la reducción del intercambio de calor por convección forzada sobre la resistencia, lo que provoca un ajuste en el equilibrio térmico del sistema. La estabilización de los valores de voltaje en niveles inferiores a los registrados durante la etapa con viento confirma la capacidad del sensor para distinguir de manera efectiva entre las condiciones de presencia y ausencia de flujo de aire.

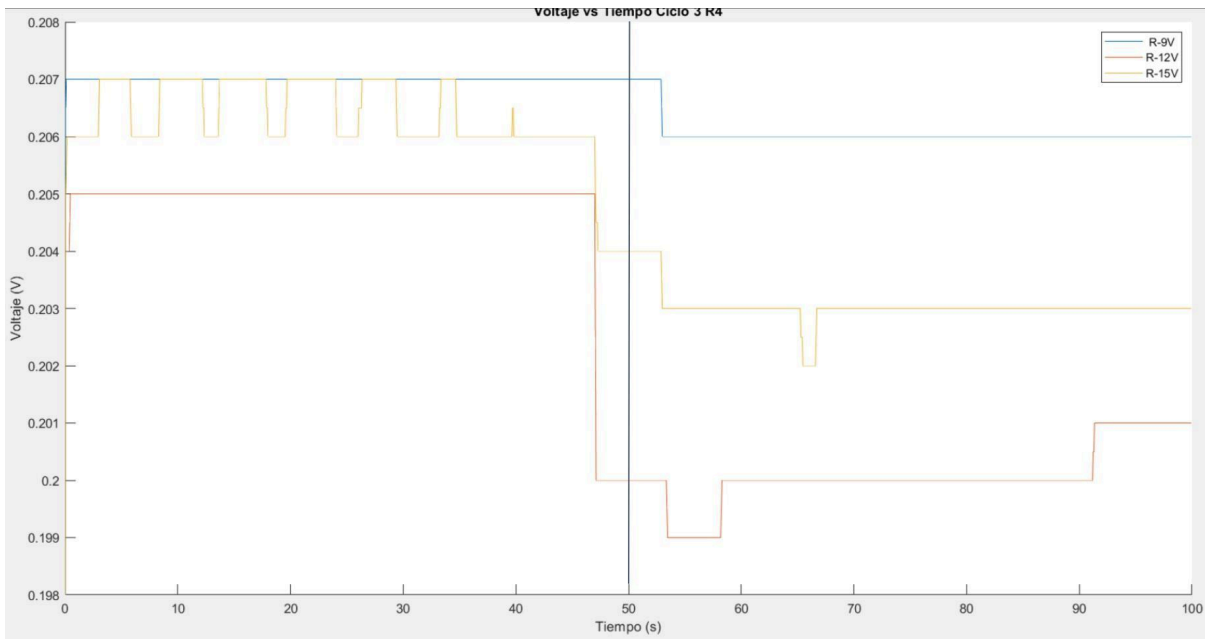


Figura 44. Señales filtradas.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la imagen, la aplicación del filtro permite obtener curvas más estables, preservando las transiciones abruptas asociadas al cambio de condición ligada al segundo 50. Durante la etapa con viento, se mantienen las diferencias en los niveles de voltaje entre las tres condiciones, reflejando la magnitud del flujo aplicado. Tras el apagado del ventilador, observamos una caída pronunciada y una estabilización posterior, lo que refuerza la capacidad del sistema para detectar la presencia y ausencia de viento de forma robusta y con menor sensibilidad al ruido.

Una vez analizado el fenómeno de cambio a partir de un instante específico en el tiempo, decidimos emplear la derivada instantánea como herramienta de identificación. De este modo, es posible determinar la presencia de viento en el sistema sin necesidad de recurrir a la representación gráfica de la señal.

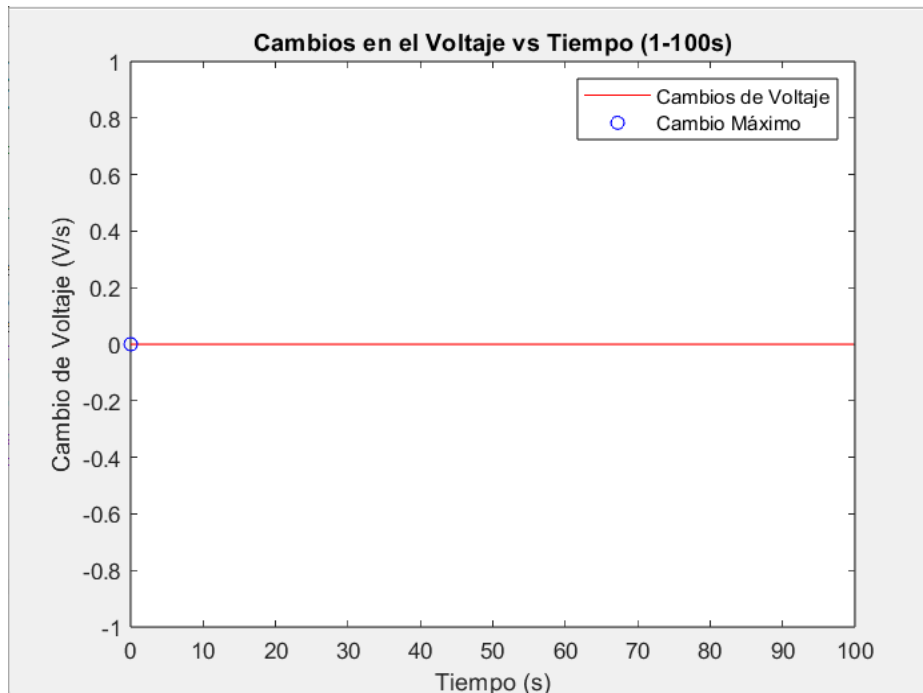


Figura 45. Gráfica de la Derivada Instantánea sin Viento.
Fuente: Elaboración propia.

```
Command Window
Derivada máxima (instantánea): 0.000 V/s
La derivada máxima ocurrió en t = 0.0000 s
fx >>
```

Figura 46. Estadísticas de la señal.
Fuente: Elaboración propia.

Presentamos la derivada instantánea del voltaje correspondiente a la resistencia de referencia, una sin presencia de viento, calculada a partir de los datos previamente filtrados. Como era de esperar para esta condición de referencia, la señal de voltaje se mantiene prácticamente constante a lo largo del tiempo, lo que se refleja en una derivada instantánea igual a cero en todo el intervalo de medición. Esta ausencia de variaciones dinámicas confirma la estabilidad de la medición en carencia de flujo de aire y valida la eficacia del proceso de filtrado aplicado. El análisis de la derivada instantánea en esta condición resulta fundamental como contraste con los resultados obtenidos en presencia de viento.

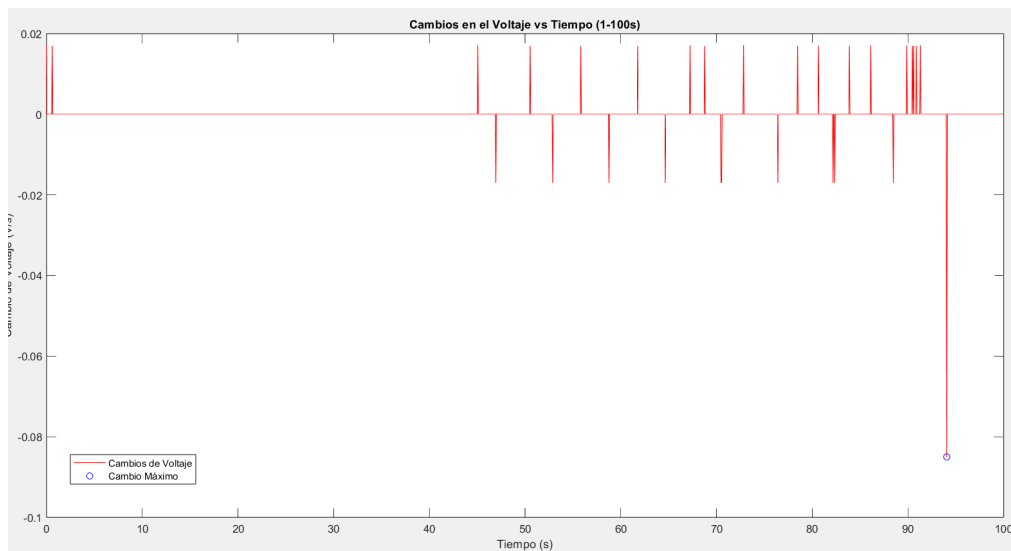


Figura 47. Gráfica de la Derivada Instantánea con Viento.
Fuente: Elaboración propia.

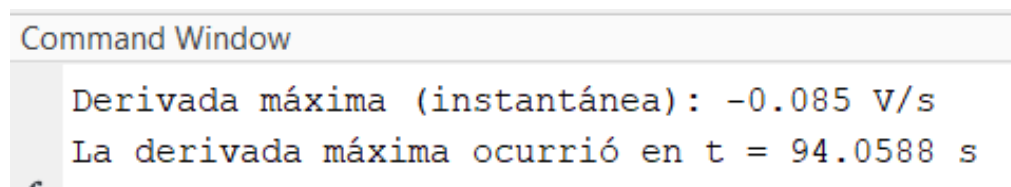


Figura 48. Estadísticas de la señal.
Fuente: Elaboración propia.

A diferencia de la condición descrita con anterioridad, en este caso la derivada presenta múltiples fluctuaciones a lo largo del tiempo, reflejando los cambios dinámicos inducidos por el flujo de aire y por la transición entre las fases de operación del ventilador.

El valor máximo de la derivada instantánea registrado fue de -0.085 V/s , ocurrido en a los 94 segundos aproximadamente, lo que corresponde a un cambio abrupto en la señal de voltaje asociado al proceso de estabilización térmica tras el apagado del ventilador. Estos resultados evidencian que la derivada instantánea constituye una herramienta efectiva para detectar la presencia y dinámica del viento en el sistema, permitiendo caracterizar de manera más precisa los eventos transitorios sin necesidad de análisis visual detallado de la señal en el dominio del tiempo.

- *Análisis de la desviación estándar en la respuesta de los sensores frente a la velocidad del viento.*

La desviación estándar la empleamos en este estudio como una medida estadística para evaluar la variabilidad de los datos obtenidos por cada uno de los ocho sensores. A diferencia de la media, que únicamente proporciona información acerca del valor central de las mediciones, la desviación estándar cuantifica la dispersión de los valores respecto a dicho promedio, permitiendo así determinar la consistencia de las respuestas de cada sensor.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Ecuación 14. Ecuación de la Desviación Estándar.

Un valor bajo de desviación estándar refleja que los datos se encuentran próximos a la media, lo que se interpreta como una mayor precisión y estabilidad en el comportamiento del sensor. Por el contrario, una desviación estándar elevada indica una mayor dispersión en las mediciones, lo cual puede estar asociado a presencia de ruido, inestabilidad en el registro o diferencias en el desempeño de los sensores.

Con el fin de obtener una representación más precisa de la respuesta del sistema, aplicamos una corrección de offset a los voltajes medidos, restando a cada medición el valor de referencia correspondiente a la condición de 0 V. Este procedimiento permitió eliminar el sesgo inicial introducido por el ADC y resaltar únicamente las variaciones efectivamente inducidas por el flujo de aire. Como consecuencia, las barras de error asociadas a las mediciones mostraron una reducción significativa, evidenciando una mayor estabilidad estadística y una correspondencia más coherente con el comportamiento físico del sistema.

$$V_{Corr} = V_{ADC} - V_{0V}$$

Ecuación 15. Ecuación de corrección de offset.

En este sentido, a continuación se presentan las gráficas de dispersión con barras de error correspondientes a los sectores definidos, iniciando con el sector 1, conformado por los sensores R1, R8 y R7.

Sector 1

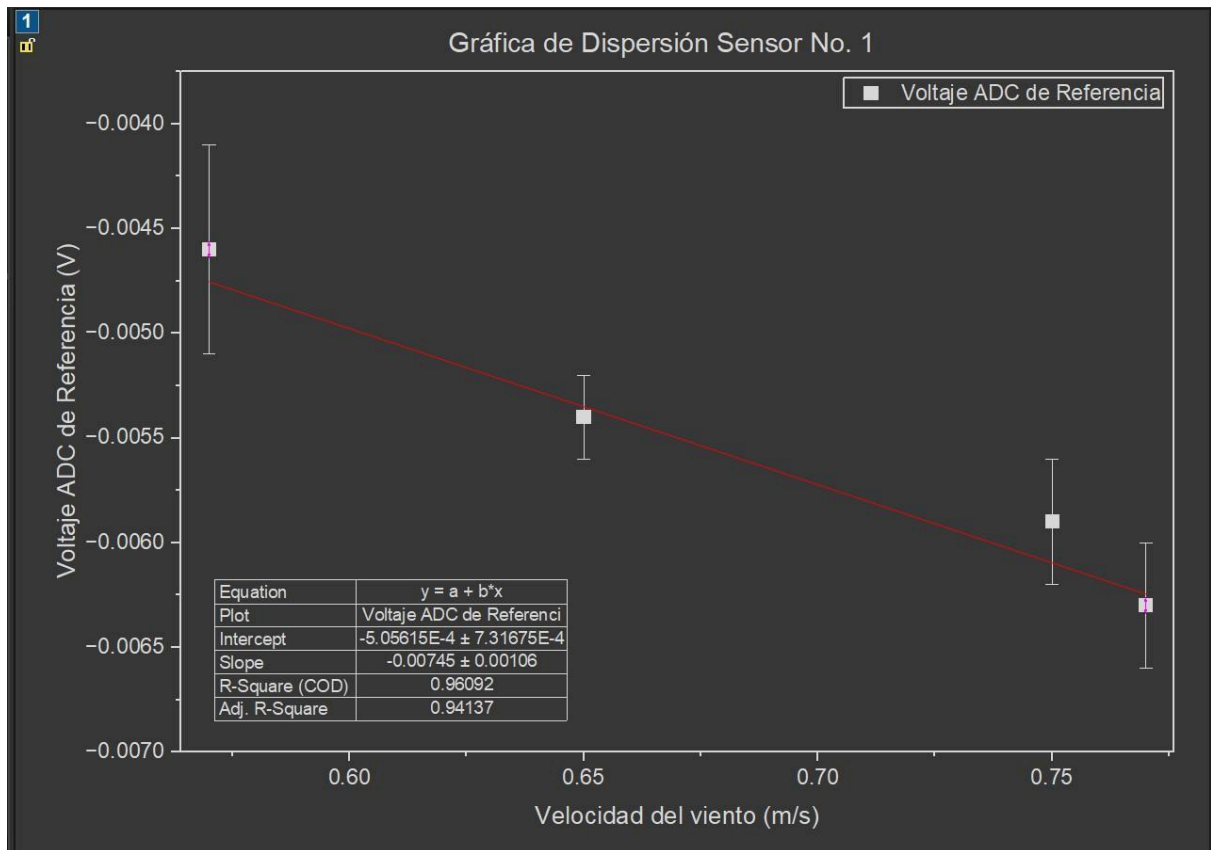


Figura 49. Variabilidad en respuesta del sensor uno.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos representados corresponden a los valores normalizados del voltaje de referencia registrados por el ADC frente a la velocidad del flujo de aire. Se observa una tendencia lineal decreciente entre ambas variables, indicando que a medida que aumenta la velocidad del viento, el voltaje registrado por el sensor disminuye progresivamente. Este comportamiento se asocia con la disipación térmica más eficiente del elemento resistivo cuando se incrementa el flujo de aire, reduciendo su temperatura y, por consiguiente, su tensión de salida.

Las barras de error reflejan una dispersión moderada, evidenciando una respuesta relativamente estable del sensor bajo condiciones controladas. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.96$) confirma un ajuste adecuado del modelo lineal a los datos experimentales, lo cual respalda la consistencia del comportamiento registrado.

En términos generales, el Sensor No. 1 muestra un desempeño confiable, con variaciones dentro de un rango aceptable y una relación funcional clara entre el voltaje de referencia y la velocidad del viento. Este resultado sugiere una buena sensibilidad térmica y estabilidad en la respuesta ante pequeños cambios en la magnitud del flujo.

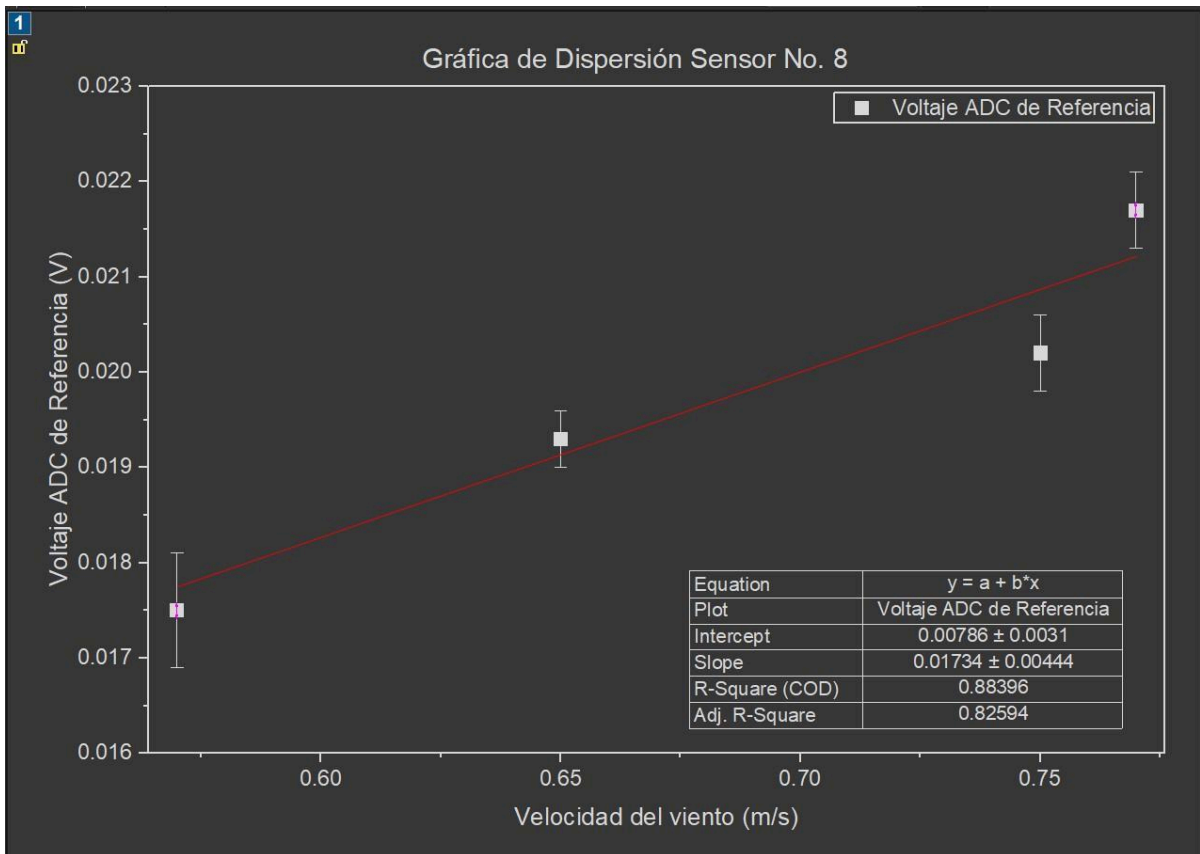


Figura 50. Variabilidad en respuesta del sensor ocho.
Fuente: Elaboración propia.

En este caso, los datos normalizados evidencian una tendencia lineal creciente entre el voltaje de referencia del ADC y la velocidad del viento. Este comportamiento indica que, a diferencia de la mayoría de los sensores del arreglo en los cuales se observa una disminución de la señal eléctrica con el incremento del flujo de aire, el elemento resistivo del Sensor No. 8 presenta un aumento en la tensión medida conforme se incrementa la magnitud del flujo incidente.

Las barras de error muestran una dispersión moderada, lo que sugiere una estabilidad aceptable en las mediciones experimentales. No obstante, el coeficiente de determinación obtenido es ligeramente inferior al registrado para el Sensor No. 1, evidenciando una menor linealidad en la respuesta. Esta diferencia puede atribuirse a variaciones locales en la disipación térmica, a la interacción del flujo con la geometría específica del sensor o a efectos acumulativos asociados al uso prolongado del material.

En conjunto, el comportamiento del Sensor No. 8 revela una respuesta diferencial respecto al patrón esperado, lo cual no se interpreta como un error experimental, sino como una manifestación de la variabilidad inherente a los sensores LIG. Este fenómeno es analizado en mayor detalle en la discusión global de resultados, donde se abordan los efectos inherentes del material.

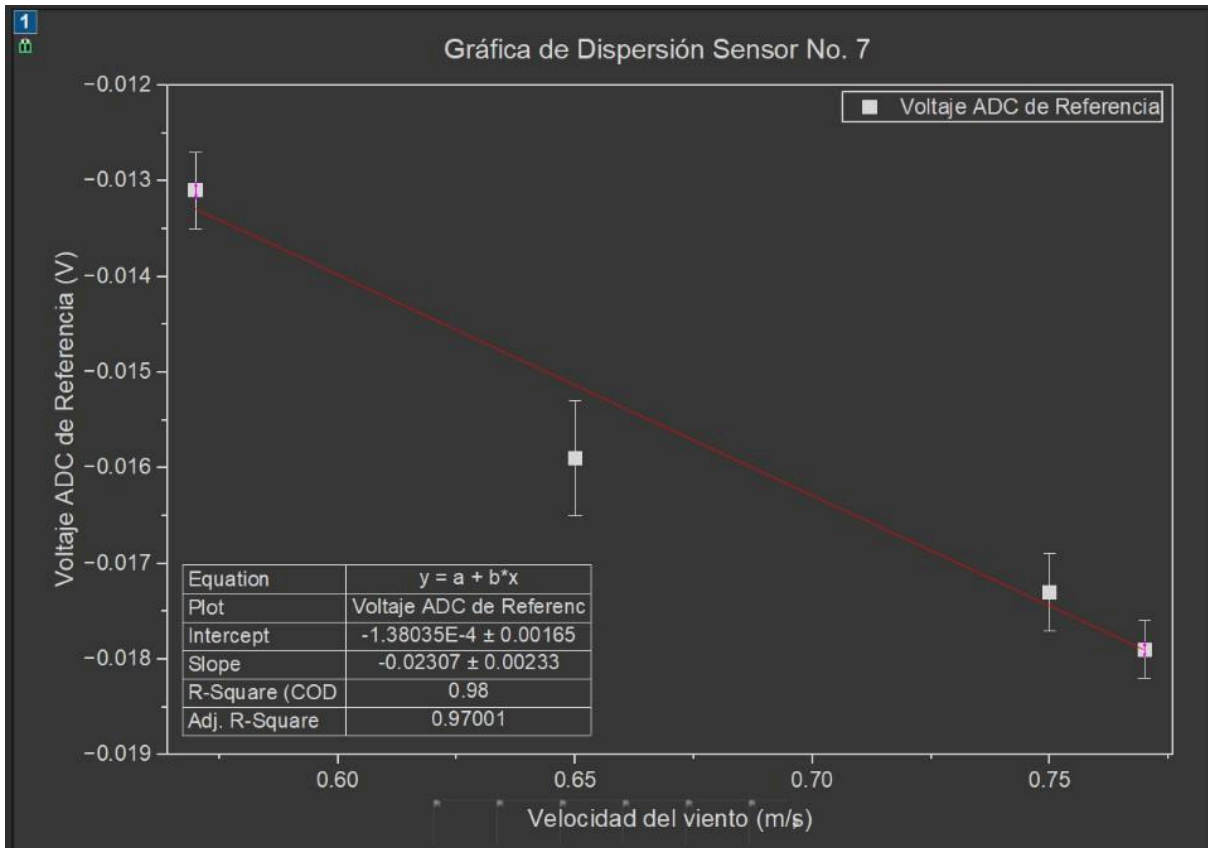


Figura 51. Variabilidad en respuesta del sensor siete.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura No. 51 permite observar una tendencia lineal negativa, lo que indica una disminución progresiva del voltaje conforme aumenta la velocidad del viento. Este comportamiento concuerda con el del Sensor No. 1, sugiriendo que ambos elementos se encuentran expuestos a una mayor incidencia directa del flujo, provocando un enfriamiento más pronunciado y, en consecuencia, una reducción del voltaje de salida del ADC.

El coeficiente de determinación evidencia una excelente correlación lineal entre el voltaje y la velocidad, lo que demuestra una respuesta altamente estable y reproducible del sensor ante variaciones del flujo de aire. Las barras de error reducidas corroboran esta estabilidad, indicando una baja dispersión en las mediciones y un comportamiento térmico consistente.

Comparativamente, el Sensor No. 7 presenta una respuesta más definida que la del Sensor No. 8, manteniendo la misma tendencia que el Sensor No. 1. Esto refuerza la hipótesis de un gradiente térmico direccional a lo largo del sector.

Sector 2

El sector número dos, identificado como la zona central del arreglo y dotado con dos sensores, concentra los resultados que se presentan a continuación.

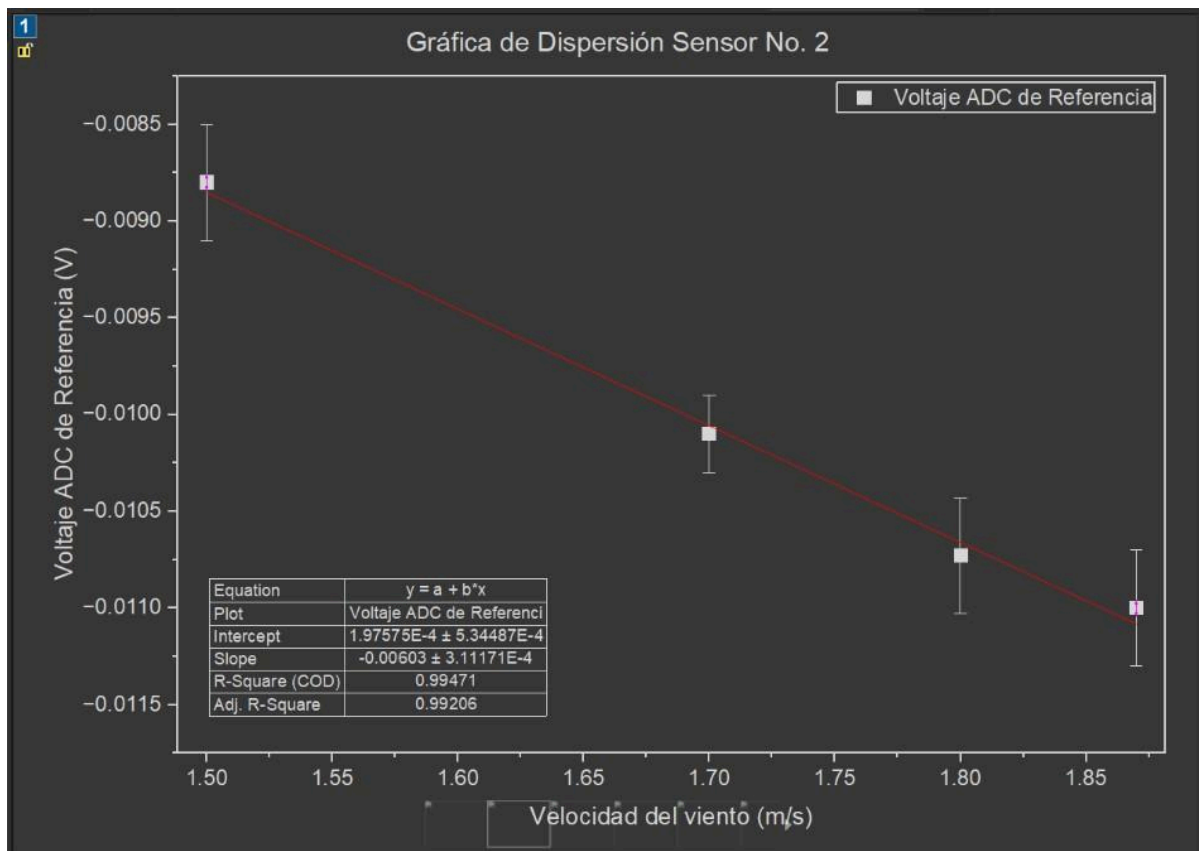


Figura 52. Variabilidad en respuesta del sensor dos.

Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica No. 52 se aprecia una tendencia lineal negativa entre la velocidad del viento y el voltaje medido, lo que indica que ambos sensores responden de forma inversa al incremento de la velocidad.

El Sensor 2 presenta una pendiente de -0.00603 y un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9947$, lo cual evidencia una excelente linealidad en la respuesta. Las barras de error, de baja magnitud, confirman una alta repetitividad en las mediciones y una dispersión mínima respecto a la media, lo que se traduce en un comportamiento estable del sensor bajo las distintas condiciones de flujo ensayadas.

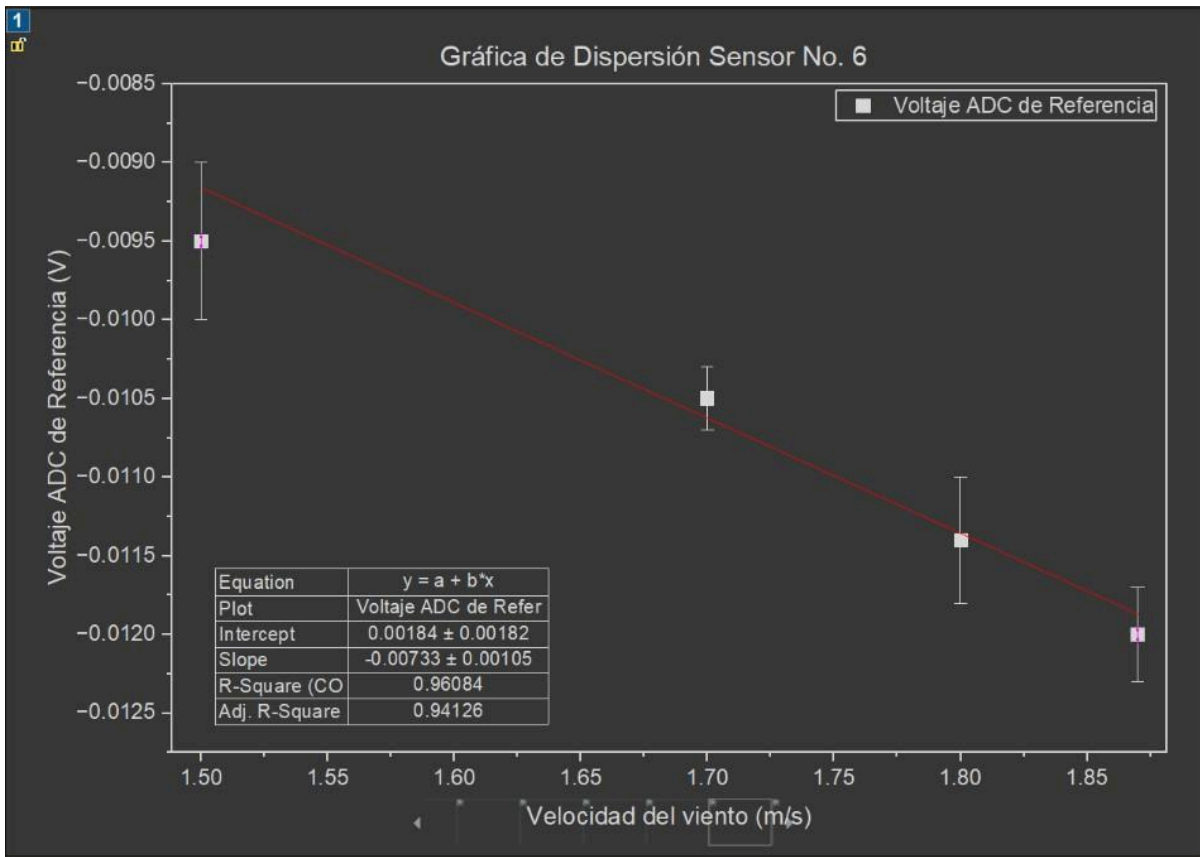


Figura 53. Variabilidad en respuesta del sensor seis.

Fuente: Elaboración propia.

De manera similar, el Sensor 6 muestra una pendiente de $-0.00733 \text{ V}/(\text{m/s})$ y un $R^2 = 0.9608$, también con barras de error reducidas, aunque ligeramente mayores en comparación con el sensor 2. Esta pequeña diferencia puede atribuirse a fluctuaciones locales del flujo de aire o ligeras variaciones térmicas en la región donde se encuentra este sensor. Pese a ello, la relación lineal se mantiene clara y la dispersión sigue siendo muy baja, lo que demuestra un desempeño confiable.

En conjunto, los resultados del sector 2 ponen de manifiesto una consistencia en la respuesta térmica de ambos sensores, evidenciando la efectividad del proceso de normalización para reducir la variabilidad estadística entre mediciones. Además, las barras de error estrechas verifican la estabilidad y precisión del sistema de adquisición, reafirmando que el arreglo mantiene una lectura uniforme y reproducible dentro de este sector.

Sector 3

Se procede a presentar los resultados del sector número tres, correspondiente a la última región evaluada.

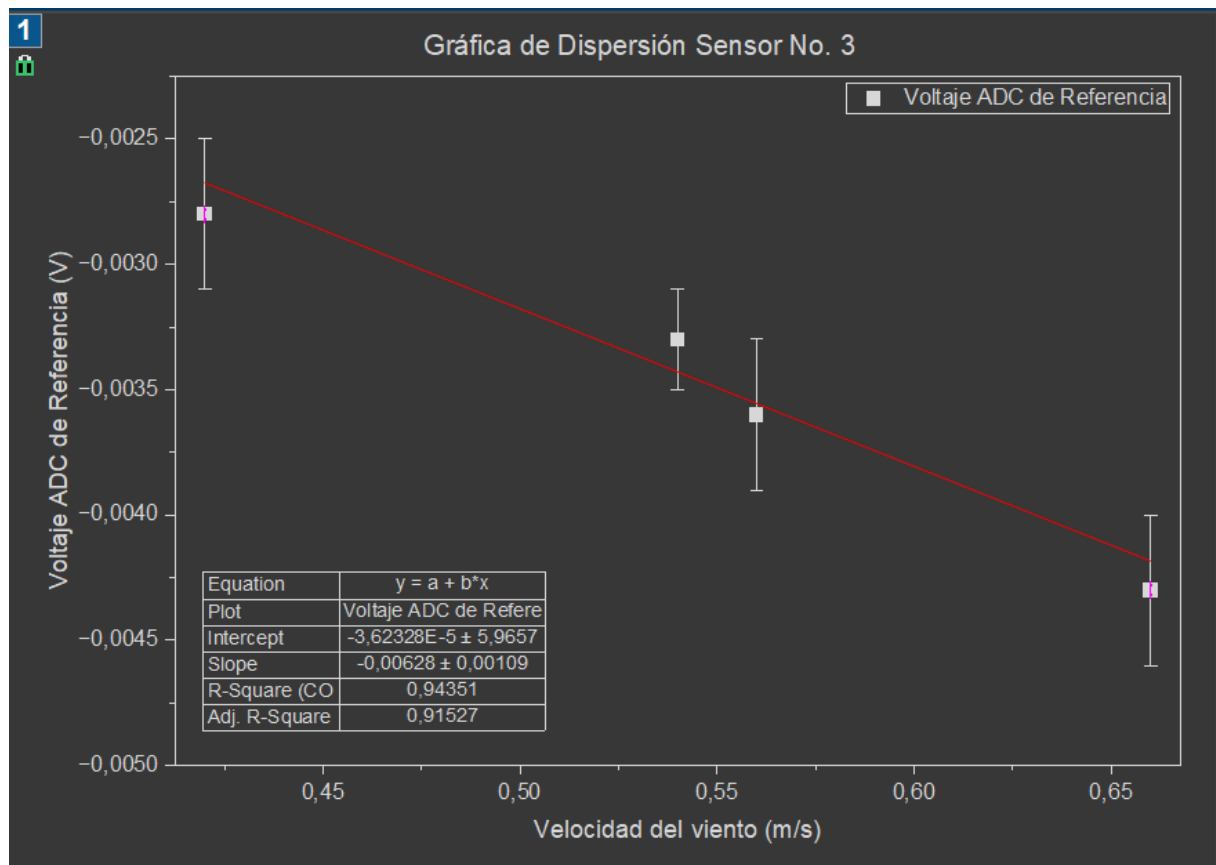


Figura 54. Variabilidad en respuesta del sensor tres.

Fuente: Elaboración propia.

La gráfica del Sensor No. 3 muestra una relación ligeramente descendente entre el voltaje medido por el ADC y la velocidad del viento, indicando que, a medida que la velocidad del flujo aumenta, el voltaje tiende a disminuir. La pendiente negativa de la recta de ajuste lineal confirma esta tendencia. Del mismo modo, el coeficiente de determinación (R^2) refleja un ajuste bastante exacto, lo que sugiere que la relación entre voltaje y velocidad es consistente, aunque presenta una ligera dispersión en los puntos experimentales. Esto también se evidencia en las barras de error, que representan la variabilidad de las mediciones para cada velocidad de viento; su tamaño moderado sugiere una estabilidad adecuada del sistema de lectura.

En conjunto, el Sensor No. 3 contribuye a reforzar la tendencia general del arreglo sensorial, aunque con una respuesta menos pronunciada.

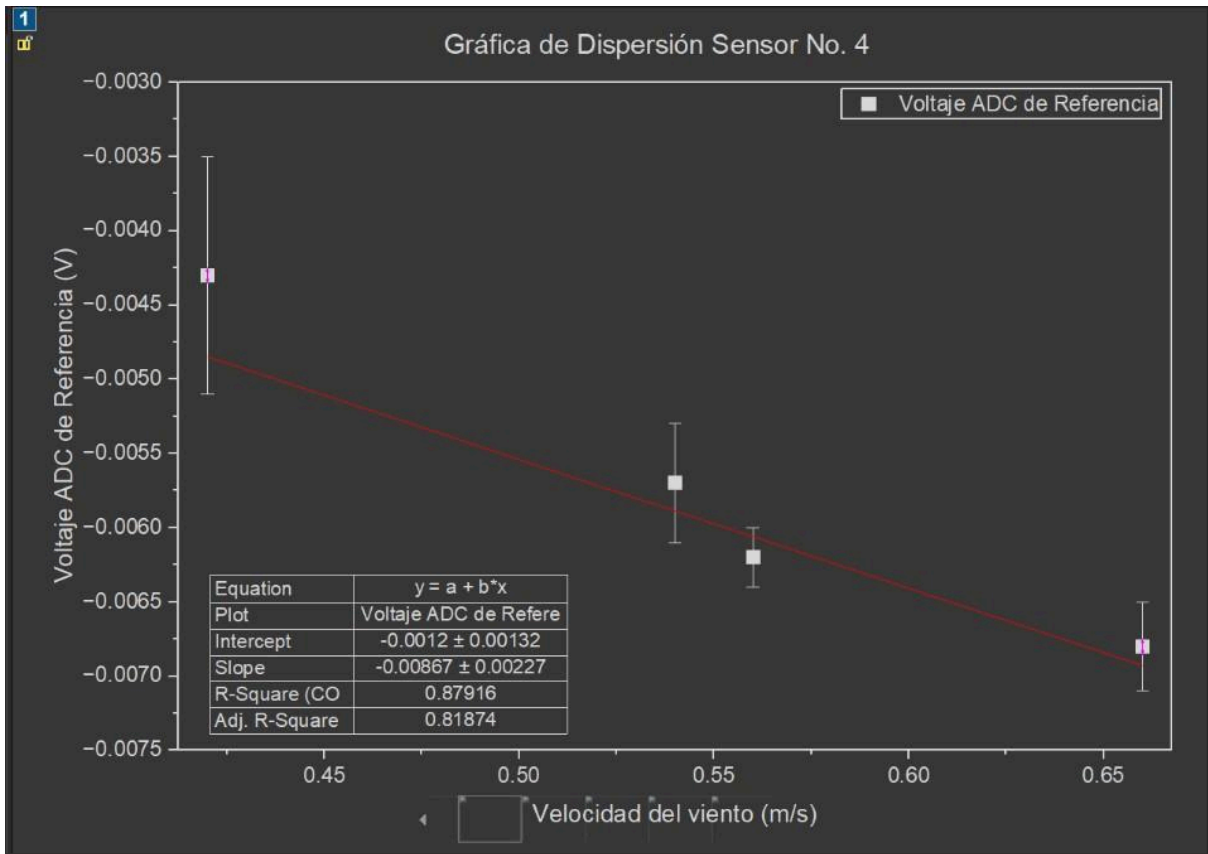


Figura 55. Variabilidad en respuesta del sensor cuatro.

Fuente: Elaboración propia.

La gráfica del Sensor No. 4 evidencia una clara relación inversa entre el voltaje medido por el ADC y la velocidad del viento. La pendiente negativa del ajuste lineal confirma que el voltaje disminuye a medida que aumenta la velocidad del flujo, lo que concuerda con el comportamiento esperado del sensor térmico. El valor de R^2 indica una buena correlación entre las variables, mientras que las barras de error reflejan una dispersión moderada, propia de ligeras variaciones en las condiciones térmicas o de lectura. En general, el Sensor No. 4 muestra una respuesta estable y representativa dentro del conjunto del arreglo sensorial.

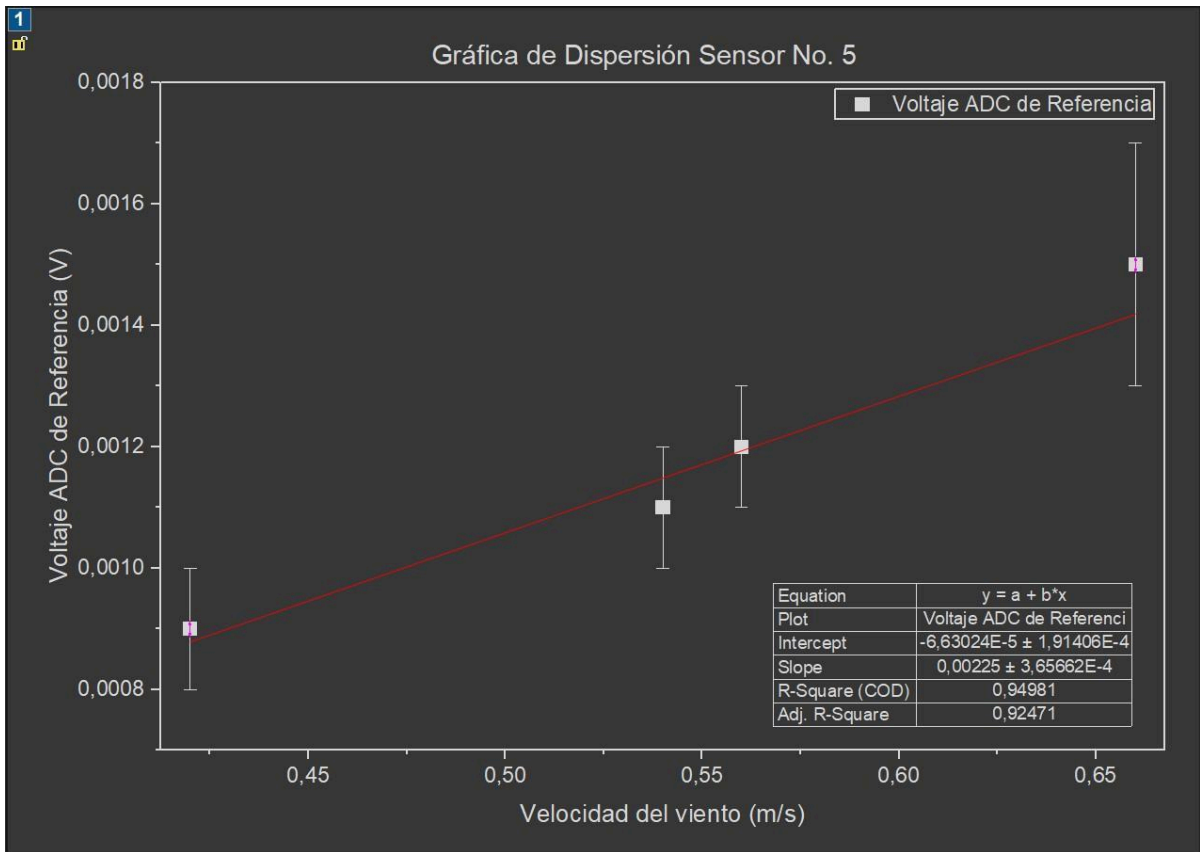


Figura 56. Variabilidad en respuesta del sensor cinco.

Fuente: Elaboración propia.

La gráfica correspondiente al Sensor No. 5 presenta una tendencia lineal creciente entre el voltaje de referencia del ADC y la velocidad del viento. Esta respuesta difiere del comportamiento observado en los sensores adyacentes del mismo sector, los cuales exhiben pendientes negativas asociadas a la disminución del voltaje conforme aumenta el flujo de aire.

El coeficiente de determinación (R^2) obtenido para el sensor indica un ajuste lineal sólido, lo que sugiere consistencia interna en las mediciones pese a la diferencia en la dirección de la pendiente. Las barras de error, de magnitud reducida y distribución estable, refuerzan la repetibilidad del registro experimental y la confiabilidad del comportamiento observado.

Al analizar de manera conjunta los resultados del sector 3, se evidencia una respuesta diferencial entre los sensores del arreglo. Mientras que los sensores No. 3 y No. 4 presentan el comportamiento térmico esperado para un anemómetro de principio resistivo, el sensor No. 5 manifiesta una pendiente positiva, lo que sugiere una alteración en su respuesta térmica efectiva.

Este comportamiento atípico nuevamente se interpreta como una posible consecuencia de factores asociados a la variabilidad del material LIG, tales como diferencias en la disipación térmica local, cambios en la conductividad eléctrica efectiva o efectos acumulativos derivados del uso prolongado e interacción continua con el ambiente.

- *Análisis de la variabilidad entre sensores*

Cabe destacar que, si bien la mayoría de los sensores del arreglo presentan la tendencia térmica esperada, caracterizada por una pendiente negativa asociada a una mayor disipación térmica conforme aumenta la velocidad del flujo de aire, los sensores No. 5 y No. 8 exhiben una pendiente positiva en sus curvas de ajuste lineal.

Este comportamiento diferencial no se atribuye a errores de medición ni a variaciones en los parámetros de excitación eléctrica, los cuales se mantuvieron constantes durante todas las pruebas experimentales, sino a efectos asociados al uso prolongado y a la interacción continua del material con el ambiente. En particular, estos sensores corresponden a los elementos con mayor tiempo de operación dentro del arreglo, lo que sugiere la presencia de fenómenos de envejecimiento del LIG, tales como oxidación progresiva, modificación de la resistividad local y cambios en el acoplamiento térmico con el sustrato de poliimida.

Estos mecanismos pueden alterar la distribución del gradiente térmico en el sensor y modificar su respuesta termo-resistiva efectiva, dando lugar a variaciones tanto en la magnitud como en el signo de la pendiente observada. Este resultado pone de manifiesto una limitación inherente al uso de materiales emergentes, en los cuales pequeñas variaciones estructurales o químicas pueden tener un impacto significativo en la respuesta eléctrica del dispositivo.

No obstante, la repetibilidad interna de las mediciones y los coeficientes de determinación obtenidos indican que, aun en presencia de esta deriva, los sensores mantienen una relación funcional clara entre el voltaje registrado y la velocidad del flujo de aire. Esto reafirma la validez del enfoque propuesto y resalta la necesidad de implementar protocolos de estabilización del material y estrategias de calibración a largo plazo en futuras versiones del sistema.

- *Modelado predictivo del sistema*

Para la construcción del modelo predictivo empleamos los datos experimentales obtenidos a partir del sensor número dos, seleccionado por su ubicación estratégica frente al ventilador, lo que le permitió recibir de manera más directa el flujo de aire generado. Este criterio aseguró que las mediciones reflejaran con mayor fidelidad la relación entre la tensión de alimentación del motor y la velocidad efectiva del flujo de aire. Dentro del rango experimental, se identificó un punto de activación cercano a los 9 V, a partir del cual el sistema comenzó a producir velocidades de magnitud significativa, alcanzando su desempeño máximo seguro a los 15 V.

Con base en estos resultados, se implementó un modelo de regresión lineal que permitió caracterizar la dependencia entre el voltaje aplicado y la velocidad registrada. Dicho modelo, validado mediante el coeficiente de determinación, presentó un ajuste robusto que respalda su capacidad predictiva. A partir de la ecuación obtenida fue posible extrapolar el comportamiento del sistema a condiciones de operación superiores, calculando valores teóricos de velocidad para tensiones de 20V, 25V, 30V y hasta 40V. Aunque estas condiciones exceden las especificaciones recomendadas para el ventilador de fuente empleado, la predicción aporta una visión teórica del límite de desempeño del sistema, consolidando al modelo propuesto como una herramienta útil para la estimación del flujo de aire en escenarios no contemplados experimentalmente.

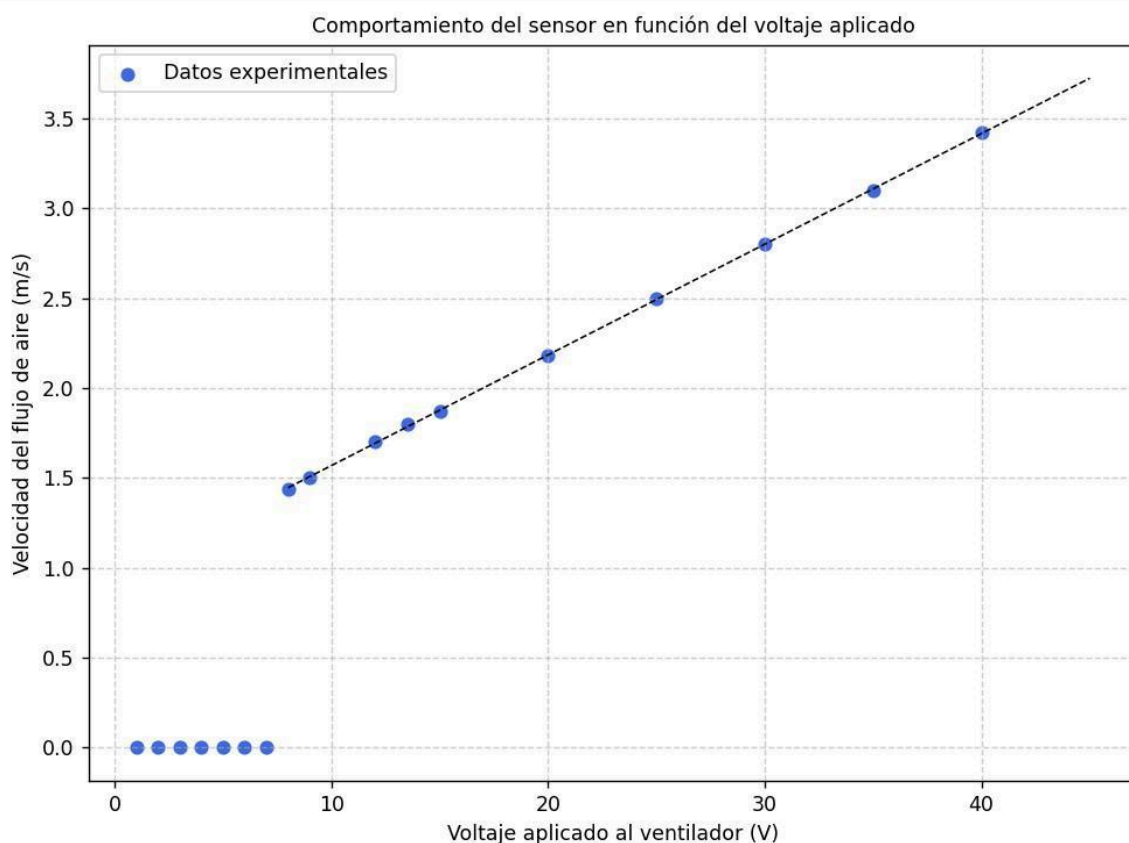


Figura 57. Modelado del comportamiento del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura No. 57 ilustra la relación entre el voltaje aplicado al ventilador y la velocidad del flujo de aire medida en el sensor central. La curva evidencia dos regiones diferenciadas: en la primera, comprendida entre 0 y 7V, no se registra generación de flujo, lo que indica que el voltaje aplicado no es suficiente para superar las condiciones de arranque del ventilador, mientras que, a partir de los 8V, se observa el inicio de la producción de aire con una magnitud inicial de 1.44 m/s. Posteriormente, la tendencia se mantiene creciente y cercana a un comportamiento lineal, alcanzando los 1.87 m/s a 15V. Este comportamiento fundamenta la extrapolación y la construcción del modelo predictivo.

- *Placa de Circuito Impreso final.*

La placa de circuito impreso fue ensamblada en las instalaciones del Instituto de Investigación y Desarrollo Ómicas, empleando componentes electrónicos disponibles en su inventario. El proceso de soldadura se realizó de manera manual, asegurando la correcta conexión de todos los elementos según el diseño previamente establecido.

Una vez finalizado la soldadura, la placa presenta el siguiente aspecto:

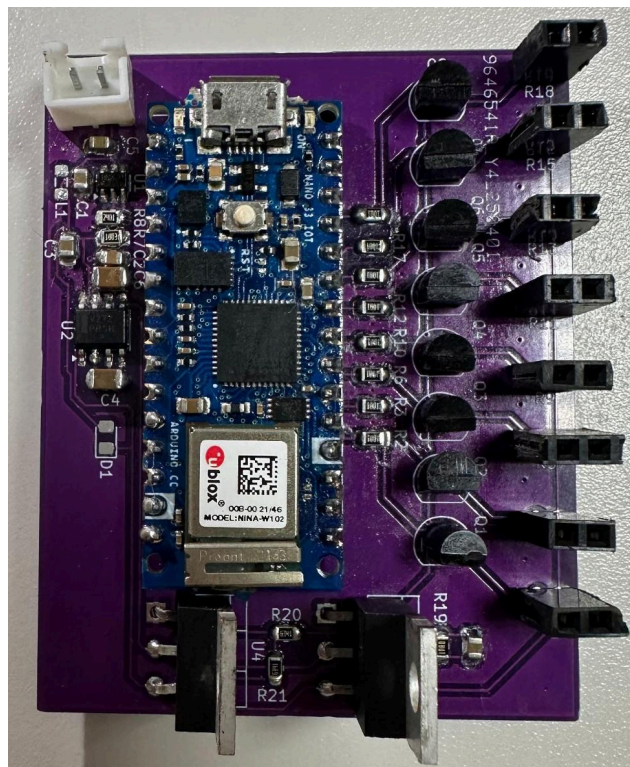


Figura 58. Prototipo totalmente soldado.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se aprecia la disposición compacta y ordenada de los componentes electrónicos sobre la placa. Destaca el microcontrolador, ubicado en el centro de la placa y actuando como eje principal del sistema, así como los conectores de entrada/salida dispuestos lateralmente, que permiten la integración con los sensores de GO externos.

En ese sentido, observamos el arreglo de transistores configurado como multiplexor, encargado de la conmutación de señales provenientes de los sensores, y una serie de componentes pasivos, resistencias y condensadores distribuidos estratégicamente para el acondicionamiento y protección del circuito. Esta implementación corresponde a la versión física de lo descrito previamente en la sección “1.2.5 Placa de Circuito Impreso”, donde se detallan los aspectos técnicos y funcionales del diseño.

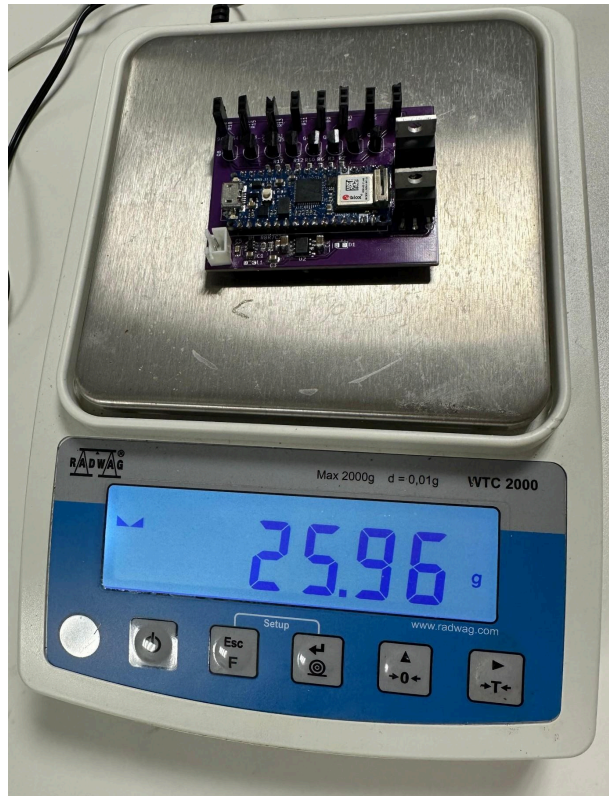


Figura 59. Registro del peso del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

Para validar el cumplimiento de los requisitos de peso establecidos en el diseño, procedimos a realizar la medición de la placa ensamblada utilizando una balanza de precisión marca “Radwag”, con una resolución de 0.01 g. El resultado obtenido fue de 25.96 gramos, lo cual confirma que la estructura es ligera y adecuada para aplicaciones portátiles o de montaje en estructuras sensibles, sin comprometer la estabilidad ni la eficiencia del dispositivo.

Realizamos una comparación referencial del peso de la placa con un objeto cotidiano, específicamente unas gafas de uso común, cuyo peso promedio es de aproximadamente 21.34 g. En contraste, la placa ensamblada presenta un peso de 25.96 g. Esta diferencia mínima confirma que el diseño de la PCB mantiene un peso reducido y manejable, lo cual resulta especialmente favorable para su integración en sistemas de monitoreo equipables.

- *Interacción de los resultados mediante la interfaz.*

Para la presentación y análisis de los datos mediante la interfaz, optamos por utilizar tres valores de referencia correspondientes a la alimentación del ventilador: 0 V (ventilador apagado), 9 V y 15V, con el fin de observar y comparar el comportamiento del sistema en diferentes condiciones de flujo de aire.

Ejemplo 1.

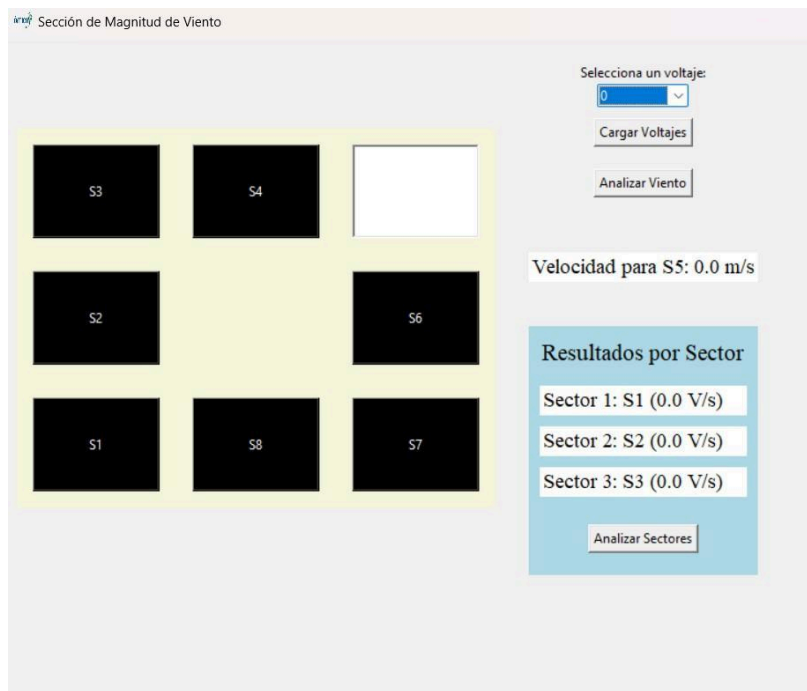


Figura 60. Visualización Datos en 0V.

Fuente: Elaboración propia.

La interfaz gráfica desarrollada permite visualizar el estado de los sensores dispuestos espacialmente (S1 a S8), así como calcular y mostrar la velocidad estimada del viento con base en los datos adquiridos por cada sensor.

En el ejemplo mostrado, seleccionamos el sensor S5, correspondiente al sector 3, cuya velocidad calculada es de 0.0 m/s. Este resultado es coherente con las condiciones experimentales, ya que no se detecta ningún flujo de aire que afecte la medición, por lo tanto, no debería registrarse un valor diferente a cero. Esto valida tanto el comportamiento esperado del sensor en reposo como la precisión del sistema de medición en condiciones estáticas.

Como refuerzo visual y conceptual, el sistema cuenta con la opción de verificar si hay presencia de viento en el sistema. En este caso al no haber cambios relevantes entre lecturas se genera el mensaje explícito: **“No hay viento en S5”**, lo cual permite al usuario interpretar rápidamente el estado del sensor y validar que no se están registrando falsos positivos en ausencia de viento.

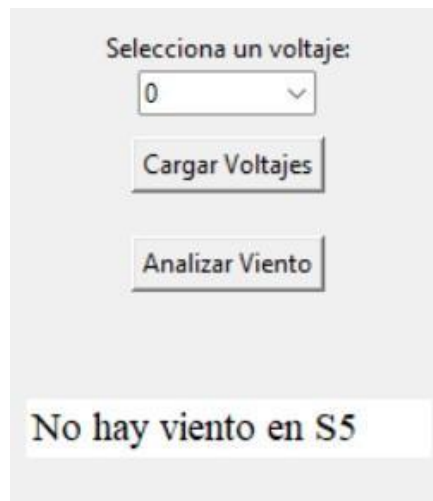


Figura 61. Sección de presencia de Viento a 0V.
Fuente: Elaboración propia.

La última sección de la interfaz está dedicada a la visualización del valor máximo de la derivada instantánea registrado en cada uno de los sectores definidos. Esta métrica permite identificar de manera precisa cambios abruptos en el comportamiento de los sensores respecto a un flujo de aire determinado.

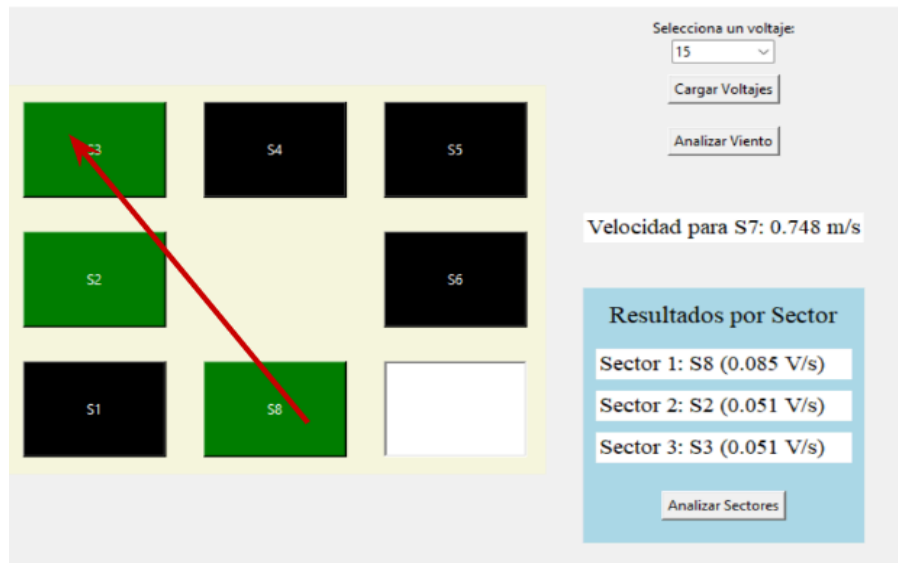


Figura 62. Dirección del viento.
Fuente: Elaboración propia.

En el caso ilustrado, los valores reportados para los tres sectores son de 0.0 V/s, lo cual concuerda con las condiciones de prueba en ausencia de flujo de aire. Esta agrupación por sectores permite detectar patrones regionales dentro de la matriz sensora, facilitando la identificación de zonas con mayor o menor actividad.

Mediante esta distribución espacial es posible inferir la dirección del flujo de aire, ya que los sensores o sectores que presenten mayores lecturas de rapidez de cambio estarán más próximos o directamente expuestos al origen del flujo. De esta manera, el sistema no solo mide la magnitud del viento, sino que también proporciona una base para el análisis

direccion del flujo, útil en aplicaciones de monitoreo de variables físicas, ambientales.



Ejemplo 2.

Figura 63. Dirección de viento a 15 V.

Fuente: Elaboración propia.

En la imagen No. 63 se representa una simulación con el ventilador operando a 15V, donde se destacan en color verde los tres sensores con la mayor tasa de cambio de cada uno de los sectores definidos. Es decir, S2, S3 y S8 corresponden a los sensores que registraron la variación más significativa por sector, lo cual permite resaltar los puntos de mayor impacto del flujo de aire en la matriz.

Esta visualización facilita una interpretación rápida y clara del comportamiento del sistema, ya que no solo muestra la velocidad en un punto específico, sino que además permite comparar la dinámica del flujo entre sectores. En este caso, el sensor S8 presenta el valor más alto de derivada con 0.085 V/s, indicando que fue el más influenciado por el flujo, reforzando la dirección estimada del viento, ilustrada con una flecha roja ascendente de S8 a S3.

De igual forma, la interfaz permite visualizar la magnitud del flujo de aire medida por el sensor S7, la cual, en el caso mostrado, corresponde a 0.748 m/s. Al comparar este valor con los datos tabulados obtenidos para el Sector 1 a 15 V, se observa una coincidencia cercana con el valor promedio de 0.77 m/s reportado en la tabla planteada en la sección “**1.2.4 Procesamiento de los Datos**”.

Esta concordancia respalda la fiabilidad de las mediciones individuales proporcionadas por el sistema. Además, refuerza la capacidad del sistema para realizar estimaciones localizadas de velocidad del viento, con un margen de error aceptable dentro del contexto experimental.

Ejemplo 3.

En esta simulación con el ventilador alimentado a 9 V, se aprecia una activación significativa en los sensores S1, S2 y S3, representados en color verde, al ser los de mayor tasa de cambio dentro de cada uno de sus sectores. En este orden de ideas, la interfaz sugiere que el flujo se ha desplazado hacia el oriente de la matriz.

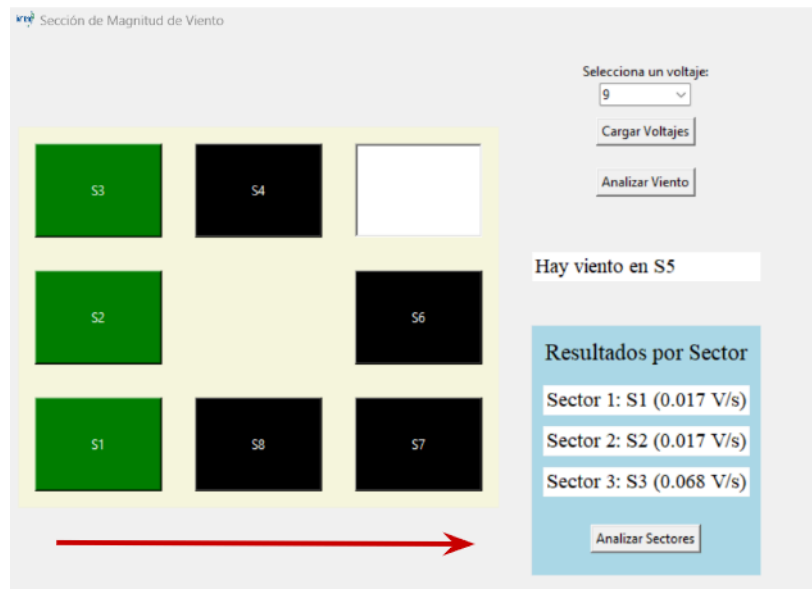


Figura 64. Dirección de viento a 9V.

Fuente: Elaboración propia.

En este caso particular, decidimos presentar el resultado de la opción “*Verificar viento*”, una funcionalidad diseñada para evaluar de manera individual si un sensor específico detecta flujo de aire. En la interfaz se observa claramente la notificación “*Hay viento en S5*”, lo cual confirma que dicho sensor ha registrado una variación significativa en la señal, superando el umbral definido para considerar la presencia de viento.

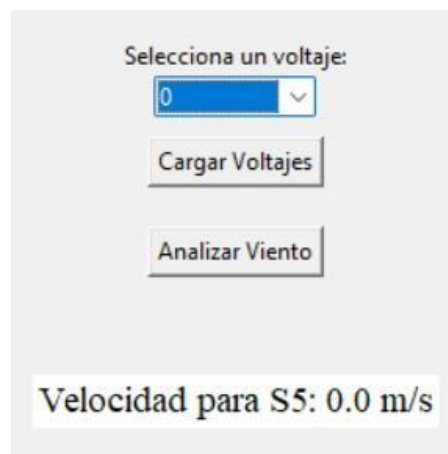
Ejemplo 4.

El último ejemplo demuestra la capacidad del anemómetro para detectar y calcular la magnitud de la corriente de aire que atraviesa cada resistencia. Para ilustrarlo, analizamos el comportamiento del sensor número cinco bajo los cuatro niveles de voltaje estudiados, comparando los resultados obtenidos con los valores de referencia presentados en la *Tabla 4*, correspondientes al sector 3.

Voltaje y Sector	Minipa MDA-11 - Magnitud (m/s)
9V	
Sector 3	0.42
12V	
Sector 3	0.54
15V	
Sector 3	0.66

Cuadro 5. Magnitud de viento referenciada sector 3.

Fuente: Elaboración propia.



Selecciona un voltaje:
0
Cargar Voltajes
Analizar Viento
Velocidad para S5: 0.0 m/s

Figura 65. Registro de magnitudes del Sensor 5 en 0 V.

Fuente: Elaboración propia.

Selecciona un voltaje:

9 ▾

Cargar Voltajes

Analizar Viento

Velocidad para S5: 0.426 m/s

Figura 66. Registro de magnitudes del Sensor 5 en 9 V.
Fuente: Elaboración propia.

Selecciona un voltaje:

12 ▾

Cargar Voltajes

Analizar Viento

Velocidad para S5: 0.525 m/s

Figura 67. Registro de magnitudes del Sensor 5 en 12 V.
Fuente: Elaboración propia.

Selecciona un voltaje:

15 ▾

Cargar Voltajes

Analizar Viento

Velocidad para S5: 0.651 m/s

Figura 68. Registro de magnitudes del Sensor 5 en 15 V.
Fuente: Elaboración propia.

Esta correspondencia entre los valores individuales del Sensor 5 y el promedio del Sector 3 es consistente con el comportamiento estadístico previamente observado en las gráficas de linealidad con barras de error. En dichas representaciones, el Sensor 5 mostró una dispersión reducida y estable alrededor del ajuste lineal, lo que indica una variabilidad experimental acotada y una buena repetibilidad de las mediciones. En este sentido, las pequeñas diferencias registradas en la interfaz gráfica se encuentran dentro de los márgenes de variación esperados, previamente cuantificados mediante las barras de error, y no representan desviaciones significativas del modelo propuesto.

Por tanto, la visualización de la magnitud del flujo de aire a través de la interfaz no sólo valida la coherencia interna del análisis por sectores, sino que también confirma que el procesamiento estadístico previo es representativo del comportamiento real del sistema durante su operación dinámica.

7.2. Caracterización Cuantitativa del Sistema

Con el objetivo de ir más allá de un análisis cualitativo del comportamiento del sistema y establecer criterios objetivos de desempeño, los resultados experimentales obtenidos se emplean para definir parámetros cuantitativos que caracterizan el funcionamiento del sensor desarrollado. En esta sección reportamos métricas propias de dispositivos de sensado, incluyendo sensibilidad, límite de detección, límite de cuantificación, así como la resolución en velocidad y dirección del flujo de aire, todas ellas derivadas directamente de los datos experimentales.

Esta caracterización permite delimitar de manera clara las capacidades y limitaciones del anemómetro propuesto, facilitando su comparación con soluciones existentes y la definición de una especificación funcional del prototipo. En conjunto, los resultados consolidan un marco cuantitativo que respalda su potencial aplicación en sistemas de monitoreo ambiental y agricultura de precisión.

- *Sensibilidad.*

La sensibilidad del sensor fue analizada como uno de los principales indicadores de desempeño del anemómetro térmico desarrollado. En sensores termo-resistivos, este parámetro constituye una métrica fundamental, ya que describe la capacidad del dispositivo para convertir variaciones del flujo de aire en cambios medibles de la señal eléctrica de salida.

En este trabajo, la sensibilidad se define como la variación del voltaje registrado en función de cambios en la velocidad del flujo de aire, y se expresa matemáticamente como la pendiente de la curva de calibración voltaje–velocidad, tal como se indica en la Ecuación No. 16. Esta definición permite cuantificar de manera directa la respuesta del sensor frente al estímulo físico aplicado, a partir de datos experimentales obtenidos en condiciones controladas.

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta v}$$

Ecuación 16. Ecuación de sensibilidad.

En consecuencia, la sensibilidad de cada sensor individual la obtuvimos a partir de la pendiente de su respectiva curva de calibración, calculada mediante un ajuste lineal por mínimos cuadrados en la **sección 6.3.4**.

Dado que el sistema opera como un arreglo de ocho sensores distribuidos espacialmente, calculamos el valor promedio de sensibilidad del prototipo, con el fin de obtener una métrica global representativa del desempeño del anemómetro como sistema integrado, tal como se muestra en la Ecuación No. 15.

$$SS_{Prom} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |m_i|$$

Ecuación 17. Promedio de valores de sensibilidad.

A continuación, presentamos la tabla de sensibilidad con la correspondiente información de los sensores.

Número del sensor	Valor de Sensibilidad (V/(m/s))
Sector 1	
Sensor 1	0.0074
Sensor 8	0.0173
Sensor 7	0.0231
Sector 2	
Sensor 2	0.0060
Sensor 6	0.0073
Sector 3	
Sensor 3	0.0063
Sensor 4	0.0087
Sensor 5	0.0023
Promedio	0.0098

Cuadro 6. Valores de sensibilidad por Sensor, Sector y promedio .

Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos presentan una variabilidad moderada entre sensores, atribuible a diferencias en el proceso de fabricación, efectos locales de disipación térmica y envejecimiento del material.

El valor promedio de sensibilidad del sistema se estimó en 0.0098 V/(m/s), lo que indica que, en promedio, el anemómetro presenta una variación medible de la señal eléctrica del orden de 9.8×10^{-3} por unidad de velocidad del viento dentro del rango experimental evaluado. Este resultado confirma una respuesta sistemática y suficientemente pronunciada frente a cambios en el flujo de aire, estableciendo una base cuantitativa adecuada para la caracterización metrológica del sensor.

Dicho valor promedio se adopta como parámetro representativo del comportamiento global del arreglo y se emplea en la estimación del límite de detección (LOD), del límite de cuantificación (LOQ) y de la resolución mínima en velocidad y dirección del flujo de aire. De esta manera, la sensibilidad no solo describe el comportamiento del sensor, sino que permite traducir la variabilidad experimental observada en especificaciones funcionales claras del sistema desarrollado.

- *Límite de Detección (LOD) y Límite de Cuantificación (LOQ).*

Dado que el objetivo del presente trabajo es caracterizar el desempeño del anemómetro como un sistema integrado, y no de cada sensor de manera individual, se adoptó un enfoque de promediado.

El análisis de los registros obtenidos en ausencia de flujo de aire permitió estimar una desviación estándar promedio del sistema de $\sigma = 0.0015$, lo que evidencia un nivel de ruido basal reducido bajo condiciones controladas. Este valor es consistente con sensores térmicos de microescala y refleja una adecuada estabilidad eléctrica y térmica del sistema de adquisición. A partir de esta métrica y de la sensibilidad promedio del arreglo, calculamos el límite de detección y el límite de cuantificación, permitiendo establecer una especificación cuantitativa clara del desempeño del prototipo.

$$LOD = \frac{3\sigma_{Prom}}{S_{Prom}}$$

Ecuación 18. Límite de detección.

$$LOD = \frac{3 \cdot 0.0015}{0.0098}$$

$$LOD \approx 0.546$$

El LOD del sistema fue estimado en 0.546, lo que indica que el anemómetro es capaz de detectar la presencia de flujo de aire a partir de velocidades cercanas a este valor. Por debajo de este umbral, las variaciones observadas en la señal eléctrica no pueden diferenciarse de forma confiable del ruido térmico y eléctrico del sistema. Este resultado demuestra que el sensor presenta una capacidad adecuada para identificar flujos de baja magnitud, permitiendo distinguir condiciones de flujo incipiente frente a la ausencia de viento.

$$LOQ = \frac{10\sigma_{Prom}}{S_{Prom}}$$

Ecuación 19. Límite de cuantificación.

$$LOQ = \frac{10 * 0.0015}{0.0098}$$

$$LOQ \approx 1.53$$

El LOQ lo determinamos en 1.53, estableciendo el umbral mínimo a partir del cual la velocidad del flujo de aire puede ser medida de manera cuantitativa con una incertidumbre aceptable. Por encima de este valor, la relación entre el voltaje medido y la velocidad del viento presenta una respuesta estable y reproducible, lo que permite realizar estimaciones confiables de la magnitud del flujo de aire. En consecuencia, el rango comprendido entre el LOD y el LOQ corresponde a una zona de detección cualitativa, mientras que para velocidades superiores a 1.53 el sistema opera dentro de su régimen de medición efectiva.

En conjunto, los resultados indican que el anemómetro es capaz de detectar variaciones de flujo de aire de baja magnitud dentro del rango experimental, validando su potencial para aplicaciones de monitoreo microclimático. No obstante, por debajo del LOQ las mediciones deben interpretarse de forma cualitativa, lo que resalta la importancia de futuras mejoras orientadas a la reducción del ruido basal y al aumento de la sensibilidad efectiva del sistema.

- *Resolución de Ángulo de Velocidad.*

Dado que la resolución del ADC del sistema fue previamente establecida en una sección **6.3.3**, esta se emplea aquí como parámetro de entrada para la estimación de la resolución mínima en velocidad del flujo de aire. A partir de la mínima variación de voltaje detectable por el sistema y de la sensibilidad promedio obtenida experimentalmente, es posible definir la menor variación de velocidad que el anemómetro puede discriminar.

$$\Delta V = \frac{\text{Resolución del ADC}}{S_{Prom}}$$

Ecuación 20. Resolución de Ángulo de Velocidad.

$$\Delta V = \frac{2.44 \times 10^{-4}}{0.0098}$$

$$\Delta V \approx 0.025 \text{ m/s}$$

Este valor representa la resolución teórica del sensor en términos de velocidad del flujo de aire, establecida por la relación entre la electrónica de adquisición y la respuesta termo-resistiva del arreglo de sensores. En la práctica, dicha resolución constituye un límite inferior, pudiendo verse afectada por ruido electrónico, dispersión entre sensores y condiciones térmicas del entorno.

- *Tabla - Especificaciones del prototipo.*

A partir del análisis experimental del sistema desarrollado, consolidamos las principales métricas técnicas que caracterizan el desempeño del anemómetro propuesto. El cuadro No. 7 presenta una especificación funcional del sensor. Estos valores se derivan directamente de los datos experimentales obtenidos durante las pruebas en entorno controlado y permiten establecer de manera objetiva las capacidades, alcances y limitaciones del prototipo. Asimismo, esta caracterización facilita la comparación con soluciones existentes y sustenta el potencial del sistema para aplicaciones de monitoreo ambiental.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor obtenido</i>	<i>Observaciones</i>
Número de sensores	8 Unidades	Arreglo Circular
Tecnología de sensado	LIG Termo-resistivo	Sin partes Móviles
Principio Físico	Efecto Joule	Disipación térmica
Sensibilidad Promedio	0.0098 (V·s/m)	Pendiente (V/velocidad)
Desviación estándar	0.0015	Datos sin condición de flujo de aire
Límite de detección (LOD)	0.55 m/s	-
Límite de cuantificación (LOQ)	1.53 m/s	-
Resolución mínima en velocidad	0.025 m/s	Dependiente de la resolución del ADC
Linealidad	> 0.90	Ajuste por mínimos cuadrados
Repetibilidad Relativa	Adecuada	Evaluada con barras de error
Peso Total del Sistema	26g	Prototipo físico
Entorno de Validación	Controlado (Laboratorio)	Ventilación calibrada

Cuadro 7. Especificaciones técnicas del prototipo de anemómetro.

Fuente: Elaboración propia.

7.3. Discusiones

Tras la caracterización experimental del sistema y la obtención de métricas cuantitativas de desempeño, realizamos un análisis comparativo entre el anemómetro desarrollado y una selección representativa de anemómetros comerciales disponibles en el mercado. Este contraste permite evaluar de manera objetiva el grado de competitividad del prototipo, así como identificar sus ventajas, limitaciones y oportunidades de mejora.

	Referencia del Anemómetro	Peso en gramos	Dimensiones	Tecnología	Consumo Energético en mW	Costo (COP)
1	GMX200 Compact Weather Station	500	170 mm X 142 mm	Ultrasónica	Entre 312 mW y 420 mW	5.330.000 Aprox.
2	AMS1 Portable Anemometer	160	156 mm X 60 mm	Rueda Alada (Mecánico)	45 mW	800.000 Aprox.
3	Anemómetro PCE-WVA	170	129 mm × 190 mm	Principio de medida magnético	480 mW	1.420.000 Aprox.
4	PCE-HWA 30	400	70 mm × 194 mm	Hilo caliente, Hot-wire	370mW	2.092.000 Aprox.
5	Proyecto de Grado: Anemómetro de Filamento de Grafeno Inducido.	26	63 mm X 50 mm	Sensores termo-resistivos	Típico de 440 mW	Costo base: 115.000

Cuadro 8. *Contraste de características de los anemómetros.*

Fuente: *Elaboración propia.*

Respecto al principio de funcionamiento, los dispositivos comerciales emplean tecnologías consolidadas como ultrasonido, rueda alada, sensores magnéticos o hilo caliente. Si bien estas soluciones ofrecen buena precisión, suelen implicar compromisos en términos de consumo energético, desgaste mecánico o costos elevados. El prototipo que propusimos se diferencia al emplear sensores termo-resistivos basados en LIG, una tecnología emergente que combina ausencia de partes móviles, alta sensibilidad térmica y un elevado potencial de miniaturización. Esta aproximación reduce la complejidad mecánica del sistema y abre nuevas posibilidades de integración en arquitecturas electrónicas compactas.

En cuanto al consumo energético, el prototipo presenta un valor típico de aproximadamente 440 mW, comparable al de anemómetros comerciales de gama media-alta. Aunque este consumo aún no alcanza los niveles de los dispositivos más eficientes del mercado, los resultados experimentales indican que existe un margen claro de optimización mediante mejoras en el diseño electrónico, estrategias de excitación térmica intermitente y gestión inteligente de potencia. Por tanto, el consumo energético no se interpreta como una limitación estructural del concepto, sino como un aspecto susceptible de mejora en versiones futuras.

El costo de fabricación constituye una de las ventajas más relevantes del sistema desarrollado. Mientras que los anemómetros comerciales presentan precios que oscilan entre 800.000 y más de 5.000.000 COP, el prototipo alcanza un costo base estimado de 115.000 COP. Esta diferencia sustancial permite proyectar su uso en aplicaciones de bajo presupuesto, despliegues masivos de sensores y proyectos de monitoreo ambiental a gran escala, donde el costo unitario es un factor determinante.

Desde una perspectiva tecnológica, es importante reconocer que el prototipo se encuentra aún en una etapa de validación experimental en entorno controlado, lo que implica que su desempeño bajo condiciones reales de campo —con presencia de humedad, turbulencia, contaminantes y variaciones térmicas— debe ser evaluado en trabajos futuros. Asimismo, la variabilidad observada entre algunos sensores del arreglo pone de manifiesto la necesidad de mejorar la reproducibilidad del proceso de fabricación LIG y de establecer protocolos de estabilización y calibración a largo plazo.

En conjunto, el concepto de prototipo basado en un anemómetro no pretende reemplazar de forma inmediata a los sistemas comerciales consolidados, sino posicionarse como una solución emergente, ligera, económica y altamente integrable, con un claro potencial de evolución tecnológica. Su combinación de bajo costo, miniaturización y uso de materiales avanzados lo convierte en una alternativa prometedora para aplicaciones de monitoreo ambiental intensivo, agricultura de precisión y sistemas electrónicos distribuidos, consolidando así la pertinencia y el valor del desarrollo propuesto.

CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo diseñamos, fabricamos y validamos un anemómetro térmico sin partes móviles a escala milimétrica, basado en filamentos de óxido de grafeno inducido por láser. Los sensores desarrollados demostraron un comportamiento termo-resistivo funcional, en el cual la disipación térmica por efecto Joule permitió convertir variaciones del flujo de aire en cambios eléctricos medibles. La integración de los sensores con circuitos de acondicionamiento analógico y un sistema de adquisición digital posibilitó la obtención de señales reproducibles en tiempo real, aunque con variaciones asociadas a la estabilidad térmica y eléctrica del material sensor.

Los resultados experimentales obtenidos en entorno controlado confirman que el sistema es capaz de detectar la presencia, dirección y magnitud del flujo de aire mediante una respuesta diferencial entre los sensores del arreglo. Asimismo, la relación entre el voltaje medido y la velocidad del viento presentó un comportamiento aproximadamente lineal dentro del rango experimental evaluado, con coeficientes de determinación superiores a 0.90 en la mayoría de los sensores, lo que evidencia una linealidad comparable a la reportada en micro-anemómetros térmicos basados en hilo caliente y sensores MEMS descritos en el estado del arte. Sin embargo, también se observaron fluctuaciones y dispersión en algunas mediciones, asociadas a efectos térmicos, envejecimiento del material y variaciones entre sensores.

Desde un punto de vista cuantitativo, el prototipo alcanzó una sensibilidad promedio de 0.0098 (V·s/m), lo que permitió establecer un límite de detección de 0.546 m/s y un límite de cuantificación de 1.53 m/s, valores coherentes con aplicaciones de monitoreo ambiental de baja velocidad. Del mismo modo, la resolución en velocidad estuvo limitada principalmente por la dispersión térmica, el ruido eléctrico y la variabilidad intrínseca del material sensor.

En comparación con anemómetros comerciales y desarrollos reportados en la literatura, el sistema propuesto destaca por su ausencia de partes móviles, bajo peso, dimensiones reducidas y costo de fabricación significativamente menor, manteniendo métricas funcionales competitivas en términos de sensibilidad y linealidad. A diferencia de tecnologías ultrasónicas o mecánicas, el uso de LIG permite una fabricación sencilla, escalable y adaptable, lo que posiciona este desarrollo como una alternativa emergente para sistemas distribuidos y portátiles de monitoreo ambiental.

No obstante, los resultados también evidencian limitaciones inherentes al uso de materiales emergentes. Se observaron variaciones en la respuesta de sensores con mayor tiempo de uso, atribuibles a fenómenos de envejecimiento del LIG, oxidación progresiva y cambios en el acoplamiento térmico con el sustrato de poliimida. Estas variaciones afectaron la repetibilidad y reproducibilidad inter-sensor, evidenciando que el sistema aún presenta limitaciones en términos de estabilidad temporal. Esto refuerza la necesidad de implementar protocolos de estabilización, calibración y encapsulado para aplicaciones de largo plazo. De igual forma, el desempeño del sistema aún debe validarse bajo condiciones reales de campo, donde variables como humedad, turbulencia y ruido ambiental pueden influir significativamente en la respuesta.

En conjunto, este trabajo demuestra que los sensores de GO fabricados mediante LIG constituyen una tecnología viable y prometedora para anemometría térmica a microescala, ofreciendo una relación favorable entre desempeño, costo y simplicidad de fabricación. Aunque el sistema todavía presenta desafíos asociados a la estabilidad y uniformidad de respuesta, los resultados obtenidos sientan las bases para futuras mejoras orientadas a optimizar el consumo energético, la estabilidad temporal del material y la robustez operativa, con miras a su implementación en aplicaciones reales de agricultura de precisión, monitoreo ambiental distribuido y sistemas electrónicos portátiles.

RECOMENDACIONES

Como línea futura de trabajo, recomendamos avanzar en la integración del sistema con tecnologías de transmisión de datos inalámbricas, como Bluetooth Low Energy, LoRa o Wi-Fi, lo cual permitiría la recolección remota y en tiempo real de las señales adquiridas por los sensores. Esta incorporación facilita la implementación del sistema en entornos de difícil acceso, optimizando la movilidad, autonomía y versatilidad del dispositivo en escenarios ganaderos o ambientales.

Asimismo, se recomienda realizar una revisión detallada de la electrónica asociada al sistema, con el objetivo de reducir el consumo energético general del dispositivo. La optimización de los circuitos de acondicionamiento de señal, el uso de componentes de bajo consumo y la implementación de estrategias de gestión eficiente de energía pueden contribuir significativamente a prolongar la autonomía operativa del sistema. Esta mejora no solo favorece la viabilidad del dispositivo en escenarios de campo, sino que también incrementa su competitividad frente a soluciones comerciales existentes.

Una recomendación práctica para estudios futuros consiste en evaluar la influencia de la distribución, cantidad y disposición superficial de los sensores de grafeno. Aumentar el número de sensores podría mejorar la resolución espacial y la precisión en la recolección de datos dentro de un área determinada. Asimismo, sugerimos explorar diferentes patrones de alineación para analizar su impacto en el rendimiento del sistema. Adicionalmente, proponemos experimentar con superficies no planas, como formas cóncavas o convexas, con el fin de comparar los resultados obtenidos frente a los registrados en esta investigación, la cual se desarrolló sobre una superficie completamente lisa y uniforme. Esta comparación permitiría identificar posibles mejoras en la sensibilidad o en la caracterización direccional del flujo.

Se invita a desarrollar e incorporar algoritmos de aprendizaje automático (machine learning) que permitan caracterizar los patrones de flujo de aire de forma más robusta y adaptativa, especialmente frente a condiciones dinámicas y no lineales del entorno. Mediante el análisis de series temporales de datos, técnicas como redes neuronales, máquinas de soporte vectorial o árboles de decisión podrían emplearse para identificar correlaciones entre las variaciones de voltaje y la intensidad o dirección del flujo, incluso en presencia de ruido o fluctuaciones ambientales.

Finalmente, destacamos la importancia de continuar con la investigación orientada a la mejora del proceso de fabricación de los sensores. Los parámetros utilizados durante la inducción del grafeno afectan directamente la variabilidad observada entre sensores, evidenciada en la dispersión y las barras de error registradas. En consecuencia, futuros estudios deben enfocarse en la optimización de las condiciones de fabricación para reducir dicha variabilidad y garantizar un comportamiento más homogéneo entre sensores LIG producidos bajo distintas condiciones.

Estas mejoras proyectan el sistema hacia un nivel de madurez tecnológica superior al TRL 6, avanzando hacia niveles 7 u 8, donde el prototipo se valida en entornos operacionales reales y se consolida su fiabilidad en condiciones prácticas. La combinación de capacidades de comunicación, inteligencia artificial y validación en campo acercará el desarrollo a un producto funcional, robusto y transferible, orientado a soluciones de monitoreo ambiental de alta precisión.

Anexo 1 - *Diagrama de Subsistemas.*

Anexo 2 - *Diseño esquemático del circuito.*

BIBLIOGRAFÍA

-
- [1]. S. Singh, R. Singh, and V. Jain, "Low Cost, Flexible, Room Temperature Gas Sensor: Polypyrrole-Modified Laser-Induced Graphene for Ammonia Detection," *IEEE Sensors Journal*, vol. 24, no. 5, pp. 6892–6900, 2024. doi: 10.1109/JSEN.2024.3498120.
- [2]. A. C. Ochoa, J. R. Castillo, F. R. Palacios, and M. B. Serrano, "Graphene-Based Temperature Sensors—Comparison of the Temperature and Humidity Dependences," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 9, p. 1594, 2022, doi: 10.3390/nano12091594.
- [3]. L. Lin, Z. Peng, Y. Liu, F. Ruiz-Zepeda, R. Ye, E. L. Samuel, M. J. Yacaman, B. I. Yakobson, and J. M. Tour, "Laser-Induced Graphene: En Route to Smart Sensing," *Nano-Micro Letters*, vol. 12, no. 1, p. 173, 2020, doi: 10.1007/s40820-020-00496-0.
- [4]. Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2024). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Our World in Data. Recuperado el 19 de mayo de 2024, de <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions?insight=human-greenhouse-gas-emissions-have-increased-global-average-temperatures#key-insights>
- [5]. G. Sepúlveda, "Sistema de monitoreo ambiental para la medición y registro de variables físicas en tiempo real mediante la implementación de sensores y plataformas IoT," Tesis de grado, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago, Chile, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.udec.cl/server/api/core/bitstreams/e0d579cb-1fd9-4a1c-a51f-1acc5555788b/content>
- [6]. PhenoAgro, "PhenoAgro – Plataforma IoT para el monitoreo y análisis de cultivos," Brochure técnico, 2023. [Online]. Available: <https://phenoagro.com/> [Accessed: 08-Jun-2025].
- [7]. *GMX200 Compact Weather Station Datasheet*, Omni Instruments Ltd., Dundee, Reino Unido. [Online]. Available: <https://www.omniinstruments.co.uk>
- [8]. Firstrate Sensor, "FST200-209 3D Ultrasonic Wind Speed and Direction Sensor Datasheet V1.0," Firstrate Sensor, [Online]. Available: <https://www.firstratesensor.com/viewfilebizce/1938050555647991808/FST200-209%203D%20Ultrasonic%20Wind%20Speed%20%E2%80%8B%E2%80%8Band%20Direction%20Sensor%20Datasheet%20V1.0.pdf>. [Accessed: 08-Jun-2025].
- [9]. *Hoja de datos del Anemómetro PCE-AM81*, PCE Ibérica S.L., Tobarra, España. [Online]. Available: <http://www.pce-iberica.es>
- [10]. PCE Instruments, "Anemómetro de cazoletas PCE-A420 - Hoja de datos," PCE Instruments. [Online]. Available: <https://www.pce-instruments.com/>. [Accessed: 08-Jun-2025].
- [11]. PCE Instruments, "Anemómetro sonda térmica PCE-HWA 30 - Hoja de datos," PCE Instruments. [Online]. Available: <http://www.pce-instruments.com/>. [Accessed: 08-Jun-2025].

- [12]. Testo, S.A., “Testo 405i, anemómetro térmico para smartphone/tablet – Catálogo de producto,” Testo, S.A. [Online]. Available: <https://www.testo.com/>. [Accessed: 08-Jun-2025].
- [13]. PCE Instruments, “Sensor de dirección de viento PCE-WV A - Hoja de datos,” PCE Instruments. [Online]. Available: https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/anemometro-kat_70015.htm. [Accessed: 08-Jun-2025].
- [14]. Minciencias. (2024). *ANEXO 5. Technology Readiness Levels (TRL)*. Minciencias | Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación. Recuperado el 19 de mayo de 2024, de https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo5_7.pdf
- [15]. J. M. Ibáñez. “NIVELES DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA TECHNOLOGY READINESS LEVELS .TRLS”. Ministerio de Industria y Turismo. Accedido el 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.mintur.gob.es/publicaciones/publicacionesperiodicas/economiaindustrial/revistaeconomiaindustrial/393/notas.pdf>
- [16]. IEEE, “IEEE Taxonomy: 2024 Version,” IEEE, 2024. [Online]. Available: <https://www.ieee.org/content/dam/ieee-org/ieee/web/org/pubs/ieee-taxonomy.pdf>. [Accessed: 8-Jul-2025].
- [17]. Sears, F. W., & Zemansky, M. W. (1987). *University Physics* (7a ed.). Addison-Wesley Publ.
- [18]. Medrano, M. G. M., Rosu, H. C., & González, L. A. T. (2012). Grafeno: el alótropo más prometedor del carbono. *Acta Universitaria*, 22(3), 20-23. <https://doi.org/10.15174/au.2012.381>
- [19]. E. Seliverstova, T. Brzhezinskaya, A. Veligzhanin, V. Vinogradov and A. Vinogradov, "Influence of Transfer Conditions on Properties of Graphene Oxide Langmuir Films," 2016 *International Conference on Micro- and Nano-Electronics (ICMNE)*, Zvenigorod, Russia, 2016, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICMNE.2016.7814460.
- [20]. L. Sun, “Structure and synthesis of graphene oxide,” *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 27, no. 9, pp. 2251–2260, 2019, doi: 10.1016/j.cjche.2019.05.003.
- [21]. B. Hu and S. Bi, "Interfacial adhesion behavior between conductive polymers and functionalized graphene via molecular dynamic simulation," 2020 *IEEE International Conference on Micro/Nano Sensors for AI, Healthcare, and Robotics (NSENS)*, Nagoya, Japan, 2020, pp. 50–53, doi: 10.1109/NSENS50987.2020.00021.
- [22]. Yang, Y., Li, S., Xu, H., & Cheng, Y. (2022). Fabrication of flexible microheater with tunable heating capabilities by direct laser writing and selective electrodeposition. *Journal of Manufacturing Processes*, 74, 88-799.
- [23]. Pallás Areny, R. (2008). *Adquisición y distribución de señales*. Marcombo.
- [24]. Universidad del Azuay. (2024). *Multiplexación*. Recuperado el 19 de mayo de 2024, de <https://www.uazuay.edu.ec/sistemas/teleprocesos/multiplexacion>
- [25]. F. Miyara y L. A. Lahoz, “INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS FRECUENCIAL Y AL RUIDO ELÉCTRICO”, *Univ. Nac. Rosario*, vol. 3, pp. 36–37, 2003.
- [26]. F. Miyara, “FILTROS ACTIVOS”, *Univ. Nac. Rosario*, vol. 2, pp. 3–4, 2004.
- [27]. Leng, X., Li, W., Luo, D., & Wang, F. (2017). Differential Structure With Graphene Oxide for Both

Humidity and Temperature Sensing. *IEEE Sensors Journal*, 17(14), 4357-4364

[28]. Taidinejad, J., Ghasemi, A., Koohsorkhi, J., & Sadeghian, G. (2022). A four-wire micro anemometer in double cross shape with high mechanical stability for high sensitive air flow. *Journal of Sensors and Actuators*, 262(2), 123-130.

[29]. Stanford, M., Yang, K., Chayanne, Y., Kittrell, C., & Tour, J. (2019). Laser-Induced Graphene for Flexible and Embeddable Gas Sensors. *ACS Nano Journal*, 21(3), 567-574.

[30]. J. de la Roche, I. López-Cifuentes y A. Jaramillo-Botero. "Influence of lasing parameters on the morphology and electrical properties of laser-induced graphene," *Applied Surface Science*, vol. 541, p. 148489, 2023.

[31]. M. E. Lopez Troya, *Caracterización de nanopartículas por método de microscopia electrónica de barrido y espectroscopia de energía dispersiva de rayos X*, Tesis de pregrado, Univ. Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2022.

[32]. S. Bai, L. Ruan, H. Chen, Y. Du, H. Deng, N. Dai, and Y. Tang, "Laser-induced graphene: Carbon precursors, fabrication mechanisms, material characteristics, and applications in energy storage," *Chemical Engineering Journal*, vol. 493, p. 152805, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152805>

[33]. J. Lin *et al.*, "All Laser Direct Writing Process for Temperature Sensor Based on Graphene and Silver," *Micromachines*, vol. 15, no. 3, pp. 350–361, 2024.

[34]. H. Li *et al.*, "In situ growth of laser-induced graphene micro-patterns on arbitrary substrates," *Nanoscale*, vol. 14, no. 20, pp. 7238–7247, 2022.

[35]. E. Pop, V. Varshney, and A. K. Roy, "Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications," *MRS Bulletin*, vol. 37, no. 12, pp. 1273–1281, 2012. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1301.6181>

[36]. *Arduino Nano 33 IoT Datasheet*, Arduino S.r.l., Rev. 4, Mar. 28, 2025. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc>

[37]. Texas Instruments, *Transimpedance Amplifier Circuit (Rev. A)*, SBOA268A, Feb. 2018, revised Jan. 2019. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/pdf/SBOA268>

[38]. T. Schmitz and M. Wong, *Choosing and Using Bypass Capacitors*, Application Note AN1325.1, Intersil Americas Inc., Oct. 10, 2011.

[39]. J. I. Huircán, *Convertidores Analógico-Digital y Digital-Analógico: Conceptos Básicos*, versión 1.0, Die-Ufro.

[40]. Microchip Technology Inc., SAM D21/DA1 Family – Low-Power, 32-bit Cortex-M0+ MCU with Advanced Analog and PWM, DS40001882F, Mar. 2020.

[41]. S. James, *Cálculo de una Variable: Trascendentes Tempranas*. Séptima Edición. Thomson Int., 2012.

[42]. Minipa do Brasil Ltda., *Termo Anemômetro Digital MDA-11 — Manual do Usuário*, São Paulo, Brasil. [Online]. Available: <https://www.minipa.com.br/produto/mda-11/>.

[43]. Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía, *Ajuste por mínimos cuadrados*. Torrelavega: Física. I, s.f.