

ÁREA TEMÁTICA: INNOVACIÓN

MONITOREO DE GASES INDICADORES DE LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR CON APLICACIÓN DE IOT, EN EL CENTRO MULTIDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIONES TECNOLÓGICAS

Autor: León Piris, Augusto Iván; email: aileonp1998@fpuna.edu.py

Co-autor(es): Vázquez Fernández, Sergio Ismael; Saldívar Bernal, María Belén; León Piris, Augusto Iván; Erika Arami Ruiz Diaz Arias; Jonathan Gabriel Moreno Olmedo; Mauricio Daniel Paniagua Rojas

Orientador/a: Duarte Paredes, Esteban José;

Facultad Politécnica

Resumen

Con el objetivo de conocer las condiciones de la calidad del aire interior en las diversas dependencias del Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas de la Universidad Nacional de Asunción, se ha desarrollado un sistema de monitoreo de la calidad del aire interior preciso y confiable, desde marzo a octubre de 2024. Esta investigación corresponde al área de instrumentación, automatización, Internet de las Cosas y aplicación de sistemas embebidos, específicamente, en el monitoreo de oxígeno y dióxido de carbono. El estudio reveló que, mediante la implementación de dispositivos validados y verificados por los fabricantes, proporcionando mediciones consistentes y útiles bajo diversas condiciones ambientales de funcionamiento, es posible el monitoreo de estos gases en tiempo real, asegurando la fiabilidad, exactitud y precisión de los datos registrados, con el fin de facilitar el análisis estadístico para determinar las condiciones de la calidad del aire interior, y orientar en la toma de medidas efectivas para su optimización. Se concluyó con el diseño de un sistema de monitoreo automático, mediante la programación de un módulo microcontrolador ESP32 a través del entorno de desarrollo de Arduino IDE y la implementación de la plataforma ThingSpeak para la visualización de los datos en tiempo real. Para estudios futuros, se sugiere el estudio de otros parámetros, como la temperatura, humedad, gases como el monóxido de carbono y contaminantes como el material particulado, para un análisis más completo de la calidad del aire en ambientes cerrados y con condiciones de ventilación subóptimas.

Palabras clave: Calidad del aire, IoT, Monitoreo, Equipo de Medición, Sensor, Oxígeno, Dióxido de Carbono, Arduino IDE.

Introducción

La calidad del aire interior es un tema crucial para la salud pública, especialmente en espacios cerrados donde las personas pasan entre el 80% y 90% de su tiempo (OMS, 2022). La ventilación deficiente puede derivar en efectos negativos para la salud, siendo el monitoreo de gases como el dióxido de carbono (CO₂) y oxígeno una herramienta fundamental para evaluar las condiciones del ambiente interior.

A raíz de la pandemia por COVID-19, se intensificó la atención sobre este tema. En 2021, el Ministerio de Educación y Ciencias recibió 500 medidores de CO₂ donados por el Gobierno de Taiwán. Sin embargo, su implementación en instituciones como el CEMIT reveló lecturas inexactas, lo que motivó la búsqueda de soluciones confiables.

Esta propuesta técnica plantea el diseño de un sistema automático y preciso para el monitoreo de CO₂ y oxígeno, con visualización en tiempo real y almacenamiento de datos. El objetivo es proporcionar una herramienta eficaz para la toma de decisiones sobre calidad del aire interior en entornos laborales y educativos.

Entre los objetivos específicos se encuentran: el análisis de la normativa vigente, la identificación de variables relevantes, el desarrollo de hardware y software para los sensores, y la validación funcional mediante ensayos, incluyendo la conexión remota mediante Wi-Fi a la plataforma ThingSpeak.

El trabajo se estructura en cinco partes: revisión bibliográfica, metodología, ingeniería de diseño, conclusiones y recomendaciones. La propuesta se alinea con el Plan Nacional de Desarrollo 2030, la Política Nacional de Salud 2015-2030 y la Política Nacional de Ciencia y Tecnología,

así como con el Plan Estratégico de la UNA, buscando contribuir con datos confiables a la salud ocupacional y al desarrollo científico del país.

Objetivos

Objetivo general.

Diseñar e implementar un sistema para el monitoreo de los niveles de oxígeno y dióxido de carbono en el Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas de la Universidad Nacional de Asunción.

Objetivos específicos.

- Analizar los criterios técnicos manejados en la normativa vigente sobre los parámetros que definen las condiciones de la calidad del aire.
- Examinar los factores asociados a la calidad del aire en las oficinas del CEMIT.
- Identificar las variables a ser controladas por los prototipos de monitoreo.
- Desarrollar el código de programación y diseñar el hardware para la adquisición de datos de los sensores, la visualización en tiempo real de los valores de concentraciones de los gases y el almacenamiento de los datos en una memoria externa.
- Construir los prototipos monitores de los niveles de oxígeno y dióxido de carbono para espacios interiores.
- Validar el funcionamiento de los prototipos mediante pruebas y ensayos con los circuitos construidos, en diferentes ambientes.
- Monitorear de forma remota y representar los datos obtenidos por los sensores del sistema, utilizando protocolos Wi-Fi para la visualización de los datos a través de la plataforma "ThingSpeak".
- Determinar la viabilidad económica de

la implementación del sistema para el monitoreo de la calidad del aire en el ambiente estudiado.

Materiales y Métodos

En la Tabla 1 se detalla la lista de componentes necesarios para la conformación del circuito de cada dispositivo, y los elementos necesarios para la estructura final del hardware, con los costos unitarios señalados en dólares y en guaraníes. Considerando los costos de cada componente necesario para la construcción de cada prototipo, el costo total del hardware resulta en 1.180.062 Gs.

Pantalla LCD 16x2	1	9,30	70.000
Placa PCB	1	13,278	100.000
Caja de paso	1	4,65	35.000
Otros (Resistencias, espadines, y otros insumos)	1	6,18	46.543
TOTAL:		156,69	1.180.062

Tabla 1. Costo global del hardware de un dispositivo.

Descripción	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Precio Unitario (₡.)
Sensor O ₂	1	33,36	251.240
Sensor CO ₂	1	33	248.529
Módulo ESP32	1	14,61	110.000
Lector de tarjeta miniSD	1	4,81	36.225
Tarjeta de memoria 8GB	1	4,12	31.000
RTC	1	5,51	41.500
Fuente de 5V/2A	1	4,64	35.000
ADC 24 bits	1	9,95	74.935
Convertor de Nivel Lógico	2	6,64	50.000

3.1. Costos del capital humano.

El tiempo ocupado en crear los prototipos, que incluye la investigación realizada, el diseño del hardware y software del sistema, el análisis de las especificaciones y selección de los componentes de acuerdo con los requerimientos del diseño, la compra de los componentes y el montaje de los 5 prototipos se estima en 3 meses, con un promedio de 12 horas de trabajo semanales. Considerando que se asigna un pago por hora de 20\$ a cada uno de los dos ingenieros junior involucrados en el desarrollo del proyecto, el costo unitario del capital humano será de 23.497.313 ₡., por lo que, para dos ingenieros junior, el pago total en concepto de mano de obra será de 46.994.626 ₡. En la Tabla 2 puede observarse el precio unitario de la mano de obra por 156 horas trabajadas, esto corresponde al pago de honorarios para un ingeniero junior.

Se utilizó el software Proteus Professional V8.13, el entorno de desarrollo Arduino IDE y la plataforma en línea ThingSpeak. Ambas plataformas son de código abierto, facilitando la accesibilidad a

los recursos de software, y reduciendo la dependencia sobre sistemas operativos específicos para la realización de los diseños óptimos del hardware y software.

Tabla 2. Costos del capital Humano.

Descripción	Horas trabajadas	Precio Unitario (USD)	Precio Unitario (₡.)
Mano de Obra	156	20	150.624
TOTAL:		3.120	23.497.313

3.2. Costo total de desarrollo.

Considerando los costos de los componentes que han sido requeridos, los costos de capital humano y los correspondientes a la fabricación, además de aplicar un prorrateo del costo total de desarrollo sobre las 5 unidades fabricadas, en la Tabla 3 se establece el costo tentativo para el producto terminado. Esto resulta en un precio de venta unitario final de 10.578.987 ₡. Según el valor obtenido para el precio unitario de venta, el precio de venta para los 5 dispositivos fabricados será de 52.894.935 ₡. en total.

Tabla 3. Costo de Venta del Producto.

Descripción	Costo Unitario (USD)	Costo Unitario (₡.)	Cantidad	Costo total (₡.)
Prototipo	156,69	1.180.062	5	5.900.310
Honorarios (Prorrateo sobre 5 unidades)	1248	9.398.925	5	46.994.626
TOTAL:	1404,69	10.578.987	5	52.894.935

Aunque ya se han desarrollado dispositivos con características similares y

están disponibles en el mercado, en muchos casos estos dispositivos no ofrecen la posibilidad de mantener el monitoreo de los parámetros de manera remota, miden parámetros que son de difícil comprensión de parte del público no especializado; o bien, no son indicadores útiles para discernir las condiciones más importantes que hacen a la calidad del aire o para señalar cuando es necesario corregir los niveles de ventilación. Otro punto que se debe considerar es el elevado costo de muchos de los dispositivos, que los hacen inaccesibles para los interesados que poseen limitaciones económicas. La Tabla 4 detalla los precios de los dispositivos monitores de calidad del aire interior disponibles en el mercado. Los valores han sido extraídos de los sitios web oficiales de los proveedores de estas marcas.

En la quinta columna de la Tabla 4, puede observarse la diferencia expresada en términos de porcentaje entre el costo de cada dispositivo investigado y el costo del prototipo desarrollado en esta propuesta técnica. De esta manera, se observa que, en todos los casos, con el prototipo desarrollado en este trabajo de grado se obtiene una reducción positiva del costo, en comparación con los precios de la competencia.

Tabla 4. Costos del prototipo desarrollado vs. dispositivos disponibles en el mercado.

Dispositivo	Descripción	Costo (USD)	Costo (₡.)	Reducción de costo (%)
PCE-AQD 20	Medidor de Partículas y CO ₂	2031,55	15.300.000	30,86

SOUTHLAN ND SENSING	Medidor de O ₂ y CO ₂	1731, 60	13.041.0 00	18,88
PureAire	Medidor de O ₂ y CO ₂	2400, 00	18.074.8 56	41,47
Prototipo desarrollado	Medidor de O ₂ , CO ₂ , temperatura y humedad	1404, 69	10.578.9 87	—

Considerando el interés que origina este proyecto, que es contribuir con la ciencia y la investigación, se decidió donar las dos terceras partes (66,66%) del valor del trabajo realizado para la investigación y desarrollo. De esta manera, el costo unitario por prototipo se reduce a ₡. 3.526.329, lo que determina en la práctica el costo total del desarrollo de los 5 dispositivos en ₡. 17.631.645.

3.3. Conclusión de la viabilidad económico-financiera del proyecto.

El prototipo desarrollado tiene en promedio un costo menor a los dispositivos comerciales analizados en un 29% aproximadamente. Si se considera el costo final para este prototipo luego de restar el monto correspondiente en concepto de colaboración con la institución financiadora, el costo global final será menor al de los dispositivos comerciales analizados en un 78%, en promedio. Es importante mencionar que el prototipo desarrollado mide dos variables más, que son la temperatura y la humedad, gracias a que son funciones integradas en el sensor SCD30 de CO₂ que se ha implementado. De esta manera, se concluye satisfactoriamente que el dispositivo desarrollado es financieramente viable y

ventajoso con respecto a los dispositivos similares disponibles en el mercado.

Resultados y Discusión

A través de la automatización del sistema de monitoreo de calidad del aire interior, mediante la construcción de 5 dispositivos medidores de oxígeno y dióxido de carbono, se busca tener a disposición un sistema que permita conocer los datos de las concentraciones de estos gases en las oficinas del CEMIT, de manera precisa y disponible en tiempo real.

Los datos procesados por el microcontrolador se envían para su visualización mediante la plataforma en línea ThingSpeak, en donde la información es visualizada gráficamente cada 30 segundos, para un seguimiento en tiempo real de las variaciones de los niveles de los gases.

Paralelamente, los datos de las concentraciones de los gases se envían a una pantalla LCD integrada en la carcasa del dispositivo, para la visualización in situ de los valores sin necesidad de acceso a internet. Con el fin de tener acceso posterior a los datos de las mediciones con fines de análisis de los mismos, los datos son almacenados en periodos de 1 minuto en la tarjeta de memoria de 8GB, suficiente para un almacenamiento prolongado; esto permite el registro histórico de las mediciones, sin sobrescribir información previa.

Estos equipos son de fácil instalación, se conectan directamente al tomacorriente, y gracias a su compacto diseño y reducido peso, se evita crear molestias a los ocupantes del ambiente en que se realiza la medición.

El proyecto también previó la incorporación de un sistema de avisos, mediante el uso de correo electrónico, con

el fin de indicar niveles de concentración por fuera de los intervalos normales señalados por las Normativas Nacionales e Internacionales.

De esta manera, se ha desarrollado una solución que cumple con todos los requerimientos del proyecto a un precio competitivo.

RESULTADOS.

4.1. Gráficos de mediciones tomadas en el CEMIT.

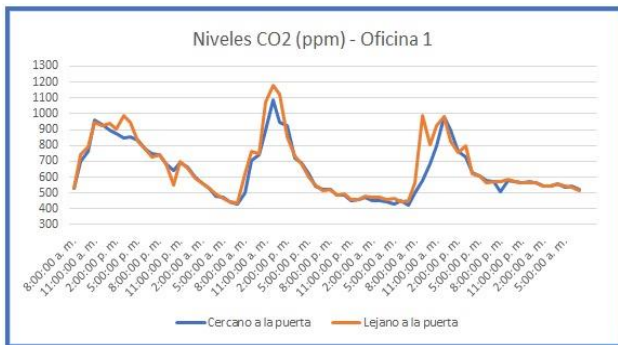


Figura 1. Mediciones tomadas con dos dispositivos en ubicaciones diferentes durante el monitoreo en la oficina 1, por 72 horas.¹

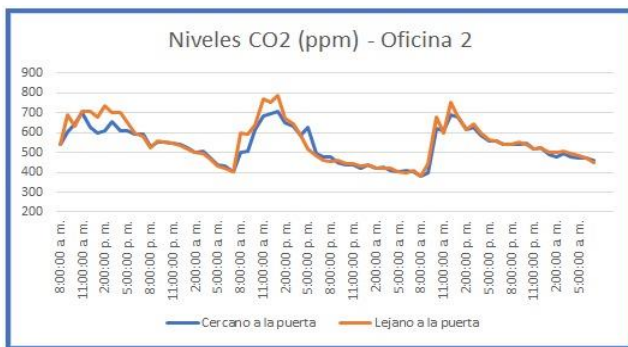


Figura 2. Mediciones tomadas con dos dispositivos en ubicaciones diferentes

¹ VAZQUEZ, Sergio; SALDIVAR, María. *Mediciones tomadas con dos dispositivos en ubicaciones diferentes durante el monitoreo en la oficina 1, por 72 horas.* Imagen registrada en fecha 4 de octubre del 2024.

² VAZQUEZ, Sergio; SALDIVAR, María. *Mediciones tomadas con dos dispositivos en ubicaciones diferentes durante el monitoreo en la*

durante el monitoreo en la oficina 2.²

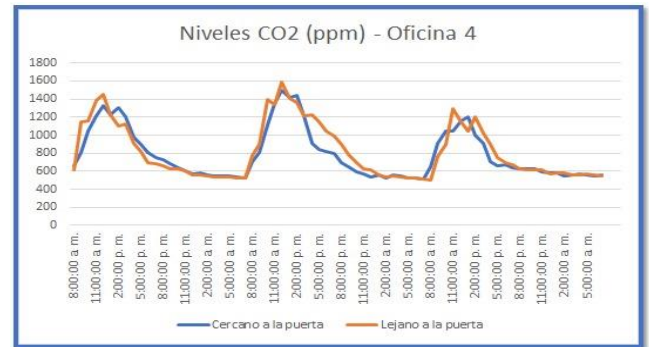


Figura 3. Mediciones tomadas con dos dispositivos en ubicaciones diferentes durante el monitoreo en la oficina 4.³

Se observó una tendencia a la elevación en los niveles de CO₂ cuando las oficinas están ocupadas. Durante los horarios de ocupación (8:00 a.m. a 12:00 a.m.), y tras un monitoreo de 3 días, se observó que el promedio de CO₂ en las tres oficinas fue de 850 ppm.

Por otro lado, los niveles de CO₂ tienden a disminuir en ausencia de personas. En los horarios de no ocupación (8:00 p.m. a 00:00 a.m.), el promedio en las tres oficinas fue de 577 ppm.

Por último, se pudo observar que la oficina 4 presenta los niveles más elevados de concentraciones de CO₂, alcanzando valores de hasta 1600 ppm durante horarios de ocupación.

oficina 2. Imagen registrada en fecha 4 de octubre del 2024.

³ VAZQUEZ, Sergio; SALDIVAR, María. *Mediciones tomadas con dos dispositivos en ubicaciones diferentes durante el monitoreo en la oficina 4.* Imagen registrada en fecha 4 de octubre del 2024.



Figura 4. Mediciones de niveles de oxígeno tomadas con dos dispositivos en ubicaciones diferentes, durante el monitoreo en la oficina 1. ⁴

En la Figura 4 se observa que los niveles de oxígeno se mantuvieron dentro de rangos muy estables al comparar ambos monitores instalados en la misma oficina. Este comportamiento también se registró con valores similares en las oficinas 2 y 4.

De esta manera, es posible deducir que los volúmenes de dióxido de carbono generados durante los horarios de ocupación de estas dependencias son insuficientes para causar disminuciones notables en los niveles de oxígeno, si bien indican la necesidad de mantener mejores condiciones en los sistemas de ventilación, ya que podrían acumularse otros contaminantes, además de propiciar la proliferación de microorganismos.

4.2. Especificaciones técnicas del dispositivo fabricado.

Para determinar los parámetros característicos de los prototipos construidos, se han revisado y analizado rigurosamente las documentaciones técnicas de cada componente, además de verificar algunos valores mediante procedimientos de medición realizados en

⁴ VAZQUEZ, Sergio; SALDIVAR, María. *Mediciones de niveles de oxígeno tomadas con dos dispositivos en ubicaciones diferentes, durante el monitoreo en la oficina 1*. Imagen registrada en fecha 4 de octubre del 2024.

los laboratorios del GIEM, FP-UNA. De este modo, se han determinado las características más significativas y útiles a tener en cuenta para el correcto manejo de los dispositivos, a fin de evitar la degradación de los componentes por el mal uso o la exposición a condiciones ambientales perjudiciales.

Tabla 11. Especificaciones técnicas del prototipo.⁵

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS			
MONITOR DE CALIDAD DEL AIRE INTERIOR			
Descripción		Especificación	Unidad de medida
Sensor de CO ₂	Rango de medición:	0 - 40.000 ± (30 + 3%)	ppm
	Resolución	1	ppm
	Vida útil	15	años
Sensor de O ₂	Rango de medición:	0 - 25	%
	Resolución	0,00253 (de 20,9 a 21,0)	%
	Vida útil	2	años
Voltaje de alimentación		5 ± 0,25	V
Corriente máxima		190	mA
Capacidad de almacenamiento		8	GB
Peso aproximado		395	g
Dimensiones		150x150x70	mm
Actualización de datos	Display LCD	60	s
	ThingSpeak	30	s
	Memoria SD	60	s
Rango de temperatura		0 - 50	°C
Otras características:			
* Fuente de alimentación tipo adaptador AC/DC.			

⁵ VAZQUEZ, Sergio; SALDIVAR, María. *Especificaciones técnicas del prototipo*. Tabla elaborada en fecha 10 de octubre del 2024.

- * Medición de parámetros adicionales: temperatura y humedad relativa.
- * Pantalla LCD retroiluminada para visualización local.
- * Informe de valores fuera de rango vía e-mail.
- * Archivo de registros en formato CSV.
- * Código QR disponible en carcasa para acceso a visualización de datos en línea.

DISCUSIÓN

Durante la elaboración del proyecto fueron detectadas algunos problemas que se mencionan a continuación.

Uno de los inconvenientes al inicio fue la falta del módulo de acondicionamiento de la señal para el sensor de oxígeno, es decir, un módulo que permite que las corrientes de baja magnitud arrojados por el sensor de oxígeno, es decir, la celda electroquímica, sean amplificadas y convertidos a un valor digital de voltaje que pueda ser procesado directamente por el microcontrolador. Sin embargo, considerando la necesidad de mantener el prototipo dentro de un rango económicamente accesible, se prescindió de la compra del módulo y en su lugar se realizó la compra de las celdas electroquímicas solamente.

En una primera etapa, se incorporó el conversor analógico-digital ADS1115 para el acondicionamiento de la señal, sin embargo, al ser un ADC con resolución de 16 bits, se pudo notar que los datos de las mediciones no eran lo suficientemente precisos y carecían de gran exactitud.



Fotografía 1. Diseño del primer prototipo utilizando un ADC ADS1115.⁶

Posteriormente, se llevaron a cabo las investigaciones necesarias para optimizar el acondicionamiento de la señal. En este contexto, se analizó la viabilidad de implementar un amplificador de transimpedancia, el cual convertiría las señales de corriente generadas por el sensor en un valor de voltaje analógico (Gupta, 2019). Dado que el amplificador de transimpedancia requiere una conversión analógica a digital para que la información sea procesada por el microcontrolador, se consideró necesario incorporar un ADC externo de mayor resolución. Esto se debió a que el ADC del microcontrolador tiene una resolución de 12 bits, lo que podría comprometer la precisión de las mediciones. Sin embargo, esta decisión implicaba un aumento en la complejidad del diseño y los costos.

Finalmente, se optó por implementar el ADC HX711, una solución que reduce los costos del prototipo y también proporciona una gran precisión gracias a su resolución de 24 bits y minimiza el ruido. Además, este ADC amplifica la señal, facilitando su procesamiento por

⁶ VAZQUEZ, Sergio; SALDIVAR, María. *Diseño del primer prototipo utilizando un ADC ADS1115*. Imagen registrada en fecha 3 de agosto del 2024.

parte del microcontrolador. Después de verificar el funcionamiento del circuito montado con el ADC HX711, se constató que los resultados proporcionados por el sensor eran bastante precisos y exactos. Esto demostró que el ruido no afectaba significativamente a la señal, lo que reafirmó la viabilidad del uso del ADC HX711 en el sistema.

Conclusiones

En el contexto del desarrollo del diseño del prototipo de monitoreo de calidad del aire, se llevó a cabo un relevamiento exhaustivo de la información relacionada con los antecedentes del monitoreo en el Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas, así como un análisis de las características edilicias del mismo. Se examinaron las implicancias del oxígeno y del dióxido de carbono en espacios cerrados, evaluando las causas de la variación de estos gases, los factores que inciden en la calidad del aire y el impacto que esto tiene en la salud y el bienestar de las personas en entornos laborales. Además, se revisaron las tecnologías disponibles para la medición precisa de gases, y se evaluó la viabilidad de implementar soluciones basadas en IoT para garantizar un monitoreo continuo y eficiente.

En función de los objetivos específicos establecidos, a continuación, se presentan las conclusiones más relevantes:

- Del análisis de los criterios técnicos establecidos en las normativas, leyes, decretos y ordenanzas concernientes a la calidad del aire, se identificó al dióxido de carbono como un gas de interés a ser monitoreado en ambientes cerrados, proporcionando también información sobre los valores límites de exposición, los que

fueron utilizados para el desarrollo del sistema de avisos sobre niveles por fuera de los rangos normales. Además, estas normativas enfatizan en la necesidad de mantener condiciones atmosféricas adecuadas en los ambientes de trabajo, evitando la contaminación del aire interior, con el fin de mitigar los efectos en la salud y promover el mantenimiento adecuado de los ambientes laborales.

- Con relación al estudio de los factores asociados a la calidad del aire en las oficinas del CEMIT, se ha determinado mediante visitas técnicas, condiciones subóptimas en el sistema de ventilación, dejando en evidencia la necesidad del estudio de las condiciones de la calidad del aire en el Centro, con el fin de trazar planes de acondicionamiento de las estructuras edilicias.
- En cuanto a la identificación de las variables a ser controladas por los prototipos, se llevó a cabo una revisión de la documentación académica relacionada y las normativas vigentes. Esto permitió identificar al dióxido de carbono como un gas de interés para el monitoreo de espacios interiores como indicador directo de la calidad del aire y ventilación, y sus influencias en la salud a elevadas concentraciones. Asimismo, se determinó que el oxígeno es un parámetro esencial, dado su vínculo con problemas de salud, lo que hace necesario su monitoreo para garantizar una evaluación integral de la calidad del aire.
- Con relación al desarrollo del código de programación y diseño del hardware, se utilizó el software Proteus Professional V8.13 para el

diseño del circuito esquemático y la placa de circuito impreso. Por otro lado, mediante el uso del software de programación Arduino IDE, se incorporó la visualización de los datos mediante la plataforma ThingSpeak, el sistema de avisos sobre valores fuera de los rangos normales, el almacenamiento de datos en la memoria extraíble y la visualización de los datos mediante un display LCD.

- En cuanto a la construcción de los prototipos monitores, se llevó a cabo la fabricación de los prototipos en los laboratorios del Grupo de Investigación en Electrónica y Mecatrónica. La fabricación de la placa se realizó utilizando una fresadora CNC, seguida del montaje y la soldadura de los componentes electrónicos. Una vez ensamblada, la placa fue colocada dentro de una caja de paso de PVC, la cual se acondicionó con una malla para evitar la entrada de agentes externos a través de los orificios. Además, se integró una pantalla LCD en la parte lateral de la caja para la visualización de datos.
- Con respecto a la validación del funcionamiento de los prototipos, se realizaron las pruebas de verificación de precisión en las instalaciones del GIEM, comparando simultáneamente los valores registrados por los 5 monitores durante un periodo de 24 horas. Los dispositivos arrojaron mediciones consistentes bajo distintas condiciones de operación. Adicionalmente, se efectuaron pruebas en distintos ambientes, como aulas de la Facultad Politécnica, oficinas del CEMIT y exteriores, comprobando el correcto desempeño de los

prototipos en escenarios con diversas ocupaciones y condiciones ambientales.

- Con relación al monitoreo de forma remota, se logró representar los datos obtenidos por los sensores de manera exitosa a través de la plataforma ThingSpeak, mediante el uso del microcontrolador ESP32 que incorpora conectividad Wi-Fi.
- En cuanto a la viabilidad financiera del dispositivo, se demostró que la adquisición de este sistema resulta económicamente viable para el Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas, constituyendo una inversión importante para la Institución, en el marco de los planes de mitigación de los efectos de la calidad del aire en el personal, a fin de implementar soluciones de manera óptima en concordancia con lo establecido en la normativa vigente.

Por último, cumpliendo de esta forma con todos los objetivos planteados para este trabajo, se logró el desarrollo y la implementación exitosa de un sistema de monitoreo de calidad de aire preciso y confiable, que brinda solución a las necesidades del CEMIT de conocer las condiciones de calidad del aire en sus dependencias.

Referencias Bibliográficas

- [1] AIRE PARAGUAY. *Introducción* [en línea]. 2019 [consultado el 19 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://aireparaguay.org/>
- [2] Aprobado por Decreto N° 4541/2015 y Resolución S.G. N° 612 del 25 de agosto del 2015. *MSPyBS* [en línea] Consultado 12 oct. 2024. Disponible en: <https://www.mspbs.gov.py/dependencias/portal/adjunto/9753ad-POLITICANACIONALDESALUD.pdf>

- [3] AV ELECTRONICS. *Módulo Lector Micro SD* [en línea]. [sin fecha] [consultado el 30 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://avelectronics.cc/producto/modulo-micro-sd/>
- [4] BADINO, Giovanni. *The legend of Carbon Dioxide heaviness*. *Journal of Cave and Karst Studies* [en línea]. 2009, **71**(1) [consultado el 14 de julio de 2024]. Disponible en: <https://caves.org/wp-content/uploads/Publications/JCKS/v71/cave-71-01-100.pdf>
- [5] BOLDO, Elena. *La contaminación del aire* [en línea]. Madrid: Instituto de Salud Carlos III, 2016 [consultado el 29 de agosto de 2024]. ISBN 978-84-95463-55-5. Disponible en: doi:10.4321/repisalud.7274
- [6] CALEL OTZOY, Melvin Saúl. Diseño e implementación de un dispositivo modular de medición de concentración de dióxido de carbono en la atmósfera con sistema de ubicación GPS [en línea]. Trabajo de grado, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018 [consultado el 2 de agosto de 2024]. Disponible en: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/10956/>
- [7] CAMPANO, Miguel Ángel; FERNÁNDEZ-AGÜERA, Jessica y SENDRA, Juan José. *Calidad del aire interior en los edificios para el bienestar: estrategias de aplicación práctica* [en línea]. Barcelona, 2023 [consultado el 15 de agosto de 2024]. ISBN 978-84-19506-75-7. Disponible en: <https://octaedro.com/libro/calidad-del-aire-interior-en-los-edificios-para-el-bienestar-estrategias-de-aplicacion-practicas/>
- [8] CEMIT. *Destacan experiencia del CEMIT en cooperación con el sector privado* [en línea]. 16 de marzo de 2023 [consultado el 20 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://cemit.una.py/destacan-experiencia-del-cemit-en-cooperacion-con-el-sector-privado/>
- [9] CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO. NTP 358, *Olores: un factor de calidad y confort en ambientes interiores*. [sin fecha] [consultado el 26 de julio de 2024]. Disponible en: https://www.cso.go.cr/legislacion/notas_tecnicas_preventivas_insht/NTP%20358%20-%20Olores%20un%20factor%20de%20calidad%20y%20confort%20en%20ambientes%20interiores.pdf
- [10] CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES DE TRABAJO. NTP 742, *Ventilación general de edificios*. [sin fecha] [consultado el 26 de julio de 2024]. Disponible en: <https://preventoronline.com/images/bd/download/attach4324.pdf>
- [11] CINCELLI, Alessandra y MARTELLINI, Tania. Indoor Air Quality and Health. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [en línea]. 2017, **14**(11), 1286 [consultado el 25 de agosto de 2024]. ISSN 1660-4601. Disponible en: doi:10.3390/ijerph14111286
- [12] CO2METER. How does an NDIR CO2 Sensor Work? [en línea]. 9 de septiembre de 2024 [consultado el 13 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.co2meter.com/blogs/news/how-does-an-ndir-co2-sensor-work>
- [13] CUEVAS, Gustavo y GOTO, Raúl. *Sistema de trazabilidad de producción láctea de la división ganado bovino de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la UNA*. Trabajo de grado, Universidad Nacional de Asunción, 2022.
- [14] DA RÓZ, Alessandra L. et al. *Nanoscience and its Applications* [en línea]. Elsevier, 2016 [consultado el 19 de octubre de 2024]. ISBN 978-0-323-49780-0. Disponible en: <https://books.google.com.py/books?id=>

- ec_8DAAAQBAJ&dq=electrochemical+sensors+history&lr=&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- [15] ELECTROMER. *Fuente 5V 2A* [en línea]. [sin fecha] [consultado el 1 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://electromer.com.py/product/fuente/>
- [16] ELETROGATE. *Pantalla LCD de 16x2 con retroiluminación verde e I2C* [en línea]. [sin fecha] [consultado el 30 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.eletrogate.com/display-lcd-16x2-i2c-backlight-verde>
- [17] ESPINAL, Georgina y NIVAR, Sócrates. Estudio comparativo de las condiciones ambientales al interior de las viviendas en dos barrios de la Capital Dominicana. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal* [en línea]. 2004, 20(2) [consultado el 18 de agosto de 2024]. ISSN 0378-7680. Disponible en: <https://revistas.intec.edu.do/index.php/ciso/article/view/719>
- [18] Espressif Systems. *ESP32-WROOM-32E* [en línea]. Shanghai: Espressif Systems, 2023 [consultado el 26 de agosto de 2024]. Disponible en: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf
- [19] ESTADOS UNIDOS, Agencia de Protección Ambiental. *Descripción general de los gases de efecto invernadero* [en línea]. 7 de junio de 2023 [consultado el 15 de abril de 2024]. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>
- [20] ESTÁNDAR, ANSI ASHRAE 62.1.(2007). *Ventilación para una Calidad Aceptable de Aire Interior*. [en línea]. [consultado el 20 de junio de 2024]. Disponible en: https://www.ditar.cl/archivos/Normas_ASHRAE/T0120ASHRAE-62.1-2007-sp-Ventil-p-CAAI.pdf
- [21] FERREIRA, Nicolas; SANCHEZ, Matias y LOPEZ, Walter. IoT enabled indoor air quality monitoring system for sustainable health management in an industry laboratory, a case study. En: *6th North American International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* [en línea]. 2021 [consultado el 22 de marzo de 2024]. ISBN 978-1-7923-6130-2. Disponible en: <https://index.ieomsociety.org/index.cfm/article/view/ID/3928>
- [22] FRAIGI, L. et al. Sensores de gases semiconductores y electroquímicos: Un estudio comparativo. *ANALES AFA* [en línea]. 2001, 13 [consultado el 25 de julio de 2024]. Disponible en: <https://anales.fisica.org.ar/index.php/analesafa/article/view/641/644>
- [23] GARCÍA, Salvador Cristina. *Implementación de analizadores de protocolos de comunicaciones SPI, I2C* [en línea]. Trabajo de grado, Universidad Carlos III de Madrid, 2014 [consultado el 22 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/be601b8d-eaf7-45d6-a545-f094beacabb7/content>
- [24] GRIDLING, Gunther y WEISS, Bettina. *Introduction to Microcontrollers* [en línea]. Vienna, 2007 [consultado el 26 de julio de 2024]. Disponible en: <http://hopfen.topfen.net/uni/mc/MC-Things/Microcontroller.pdf>
- [25] GUILLÉN MEZA, Sandy Alexandra. Diseño, construcción y aplicación de un dispositivo electrónico basado en Arduino para monitoreo en tiempo real de parámetros ambientales. [en línea]. Tesis de Licenciatura, Universidad Estatal del Sur de Manabí, 2022 [consultado el 7 de agosto de 2024]. Disponible en:

- <https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/4351>
- [26] GUPTA, Sourav. *Transimpedance Amplifier - Current to Voltage Converter*. Circuit Digest [en línea]. 10 de julio de 2019 [consultado el 5 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://circuitdigest.com/tutorial/transimpedance-amplifier-design-working-and-applications>
- [27] IARC. *Outdoor Air Pollution* [en línea]. Lyon, 2016 [consultado el 30 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://publications.iarc.fr/538>
- [28] INDOBOT ACADEMY. *Aprendiendo Thingspeak: Explicación del menú y tutorial de IoT* [en línea]. 1 de septiembre de 2022 [consultado el 30 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://blog.indobot.co.id/belajar-thingspeak-penjelasan-menu-dan-tutorial-iot/>
- [29] INTN. NP 49 019 16, *Calidad de aire interior en instalaciones de aire acondicionado. Sistemas centrales y unitarios*. Asunción, 2016 [consultado el 25 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-nacional-de-asuncion/higiene-y-seguridad-industrial/np-49-019-16-calidad-del-aire-interior-en-instalaciones-de-aire-acondicionado/35349532>.
- [30] KASTILLO, Juan Pablo y BELTRAN, Robinson David. *Optimización Energética para el aprovechamiento de ventilación natural en edificaciones en climas cálidos del Ecuador* [en línea]. Trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, 2015 [consultado el 3 de septiembre de 2024]. Disponible en: doi:10.13140/2.1.1704.4803
- [31] LABSOL. *Medidor de partículas PCE-AQD 20* [en línea]. [sin fecha] [consultado el 24 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://www.labsol.com.py/producto/356/medidor-de-particulas-pce-aqd-20>
- [32] LARMAT GONZÁLEZ, Fernando Enrique. *Sensores electroquímicos. Teoría y aplicaciones*. Cali: Programa Editorial, 2022. ISBN 978-628-7566-66-8.
- [33] MAHYUDDIN, Norhayati y ESSAH, Emmanuel A. Spatial distribution of CO2 *Impact on the indoor air quality of classrooms within a University*. Journal of Building Engineering [en línea]. 2024, 89, 109246 [consultado el 17 de agosto de 2024]. ISSN 2352-7102. Disponible en: doi:10.1016/j.job.2024.109246
- [34] MARQUES, Gonçalo y PITARMA, Rui. IAQ Evaluation Using an IoT CO2 Monitoring System for Enhanced Living Environments. En: *Advances in Intelligent Systems and Computing* [en línea]. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 1169–1177 [consultado el 7 de marzo de 2024]. ISBN 9783319777115. Disponible en: doi:10.1007/978-3-319-77712-2_112
- [35] MECHATRONICSTORE. *Módulo Reloj RTC DS1302 chip extraíble* [en línea]. [sin fecha] [consultado el 29 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.mechatronicstore.cl/modulo-reloj-rtc-ds1302-chip-extraible/>
- [36] MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. *MADES inauguró primera estación de monitoreo de calidad del aire del Paraguay* [en línea]. 3 de marzo de 2021 [consultado el 19 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://www.mades.gov.py/2021/03/03/mades-inauguro-primera-estacion-de-monitoreo-de-calidad-del-aire-del-paraguay/>
- [37] MUNICIPALIDAD DE SAN LORENZO. *Prevención contra incendios* [en línea]. Ordenanza n.º 10 de 27 de marzo de 2019 [consultado el 31 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://www.sanlo.gov.py/index.php/normativas/ordenanzas>

- [38] NESCOLARDE LÓPEZ, Diego. *Diseño e implementación de un dispositivo IoT de bajo coste para la medida de la calidad del aire* [en línea]. Trabajo de grado, Universidad Miguel Hernández de Elche, 2023 [consultado el 19 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11000/30196>
- [39] Observatorio Regional de Planificación para el Desarrollo de América Latina y el Caribe. *Plan Nacional de Desarrollo: Paraguay 2030*. [en línea] Consultado 12 oct. 2024. Disponible en: <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/planes/plan-nacional-de-desarrollo-paraguay-2030>
- [40] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN. *ISO 9000, Sistemas de gestión de la calidad — Fundamentos y vocabulario*. Suiza, 2015 [consultado el 17 de abril de 2024]. Disponible en: https://dai.uas.edu.mx/pdfs/NORMA_ISO_9000-2015_FyV.pdf
- [41] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. *Carga de morbilidad derivada de los efectos conjuntos de la contaminación del aire en los hogares y en el ambiente en 2012*. Climate and Clean Air Coalition [en línea]. 2014 [consultado el 23 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://www.ccacoalition.org/resources/world-health-organization-burden-disease-joint-effects-household-and-air#:~:text=Joint%20Effects%20of%20HAP%20&%20AAP,and%202.3%20million%20deaths,%20respectively.>
- [42] ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. *Calidad del aire* [en línea]. [sin fecha] [consultado el 17 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
- [43] ORTEGA SEGURA, Diego Raúl. *Implementación de un prototipo para el Monitoreo de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄) en lugares residenciales utilizando el sistema operativo Android y Arduino* [en línea]. Trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, 2017 [consultado el 2 de marzo de 2024]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17554>
- [44] PALACIOS RIQUELME, Diego Fermín. *Informe Técnico sobre Calidad del Aire* [en línea]. San Lorenzo, agosto de 2017 [consultado el 15 de abril de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.conacyt.gov.py/xmlui/bitstream/handle/20.500.14066/3459/14-INV-386informe.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [45] PARAGUAY. Congreso Nacional. Biblioteca y Archivo del Congreso Nacional. *Ley N° 213/1993 Establece el código del trabajo* [en línea]. [consultado el 7 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/2608/ley-n-213-establece-el-codigo-del-trabajo>
- [46] PARAGUAY. Congreso Nacional. *Constitución Nacional de la República del Paraguay: 1992* [en línea]. [consultado el 13 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://www.bacn.gov.py/constitucion-nacional-de-la-republica-del-paraguay>
- [47] PARAGUAY. Congreso Nacional. *De la calidad del aire* [en línea]. Ley n.º 5211 de 3 de julio de 2014 [consultado el 25 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/4637/ley-n-5211-de-calidad-del-aire>
- [48] PARAGUAY. Decreto N.º 14390/92, *Reglamento General Técnico de Seguridad, Higiene y Medicina en el Trabajo*. Asunción, 1992 [consultado el 30 de agosto de 2024]. Disponible en:

- <https://www.mtess.gov.py/viceministerio-de-trabajo/direccion-de-salud-y-seguridad-ocupacional>
- [49] PARRALES, Abel. *Evaluación y control de los riesgos en espacios confinados para la prevención de accidentes laborales en la Empresa Eléctrica Pública Estratégica Corporación Nacional de Electricidad CNEL EP–Unidad de Negocio Santa Elena*. [en línea]. Tesis de grado, UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA, 2016 [consultado el 1 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/3617/1/UPSE-TII-2015-048.pdf>
- [50] Presidencia de la República del Paraguay. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología – CONACYT. *Política Nacional de Ciencia y Tecnología* [en línea]. Consultado 31 de oct. 2024. Disponible en: <https://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/politicasdecyt.pdf>
- [51] PROMART. *Caja de derivación con cono 15x15x7cm* [en línea]. [sin fecha] [consultado el 29 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.promart.pe/caja-de-derivacion-con-cono-15x15x7cm/p>
- [52] QUINTÁNS, Camilo. *Estructuras avanzadas de Convertidores Analógico-Digital: metodologías de diseño, simulación y enseñanza* [en línea]. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2008 [consultado el 3 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://apidspace.lindh.uned.es/server/api/core/bitstreams/2537b022-c3fb-46d1-89d3-89f04b1f86b1/content>
- [53] RICO MENDEZ, Favio; LÓPEZ CASTAÑARES, Rafael y JAIMES FIGUEROA, Ezequiel. *Daños a la salud por contaminación atmosférica* [en línea]. Toluca, 2001 [consultado el 17 de agosto de 2024]. ISBN 968-835-570-4. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=RBuVVIOyTq4C&oi=fnd&pg=PR11&dq=historia+de+la+contaminacion+atmosferica&ots=GCnnKbsyN1&sig=TZ5vL2GttKrVC8y-kmvE4v_wdSI#v=onepage&q=historia%20de%20la%20contaminacion%20atmosferica&f=false
- [54] ROMERO PLACERES, Manuel; DIEGO OLITE, Francisca y ÁLVAREZ TOSTE, Mireya. La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología* [en línea]. 2006, **44**(2) [consultado el 1 de septiembre de 2024]. ISSN 0253-1751. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223214848008>
- [55] Sensores electroquímicos. Academia Testo [en línea]. [sin fecha] [consultado el 13 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.academiatesto.com.ar/cms/sensores-electroquimicos>
- [56] SEVERINGHAUS, John W. *History of Respiratory Gas Monitoring in Anesthesia*. En: *The Wondrous Story of Anesthesia* [en línea]. New York, NY: Springer New York, 2014, pp. 745–759 [consultado el 18 de octubre de 2024]. ISBN 978-1-4614-8440-0. Disponible en: doi:10.1007/978-1-4614-8441-7_55
- [57] SOUTHLAND SENSING LTD. *OMD-351-O2-CO2 Ambient Air Oxygen/Carbon Dioxide Monitor* [en línea]. [sin fecha] [consultado el 1 de septiembre de 2024]. Disponible en: https://www.buysso2.com/products/omd-351-o2-co2-ambient-air-oxygen-carbon-dioxide-monitor?srsId=AfmBOop8-S2k55T_5l_5jBQpVPs06TSVsyb7Q6kj0sOe90j6KQ909ag0
- [58] Texas Instruments. *ADS1113,ADS1114,ADS1115* [en

- [línea]. Texas: Texas Instruments, 2009 [consultado el 15 de agosto de 2024]. Disponible en: https://www.ti.com/product/ADS1115?keyMatch=datasheet%20ADS1115&ti-search=universal_search
- [59] UNIT ELECTRONICS. Convertidor de Nivel Lógico 4 Canales Bidireccional 5V a 3.3V [en línea]. [sin fecha] [consultado el 27 de septiembre de 2024]. Disponible en: <https://uelectronics.com/producto/convertidor-de-nivel-logico-4-canales-bidireccional-5v-a-3-3v/>
- [60] UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN. Plan estratégico institucional 2021-2025. Asunción: Universidad Nacional de Asunción, 2021, p. 19-20. [consultado el 31 de octubre de 2024]. Disponible en: <https://www.una.py/wp-content/uploads/2021/06/Plan-Estrategico-UNA-Período-2021-2025.pdf>
- [61] VELEZ MIRABA, Karina Mercedes. *Estudio de factibilidad de un sistema inalámbrico con sensores para el monitoreo y medición de la calidad del aire ambiental en la Universidad Estatal del Sur de Manabí* [en línea]. Trabajo de grado, Universidad Estatal del Sur de Manabí, 2022 [consultado el 13 de marzo de 2024]. Disponible en: <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/3564>
- [62] VÉLEZ-GUERRERO, Angela Carolina; CALLEJAS-CUERVO, Mauro y ALARCÓN-ALDANA, Andrea Catherine. *The Evolution of Air Quality Monitoring: Measurement Techniques and Instruments*. Journal of Hunan University Natural Sciences [en línea]. 2023, 50(5) [consultado el 17 de agosto de 2024]. ISSN 1674-2974. Disponible en: doi:10.55463/issn.1674-2974.50.5.14
- [63] WALSH, Brian K. y SMALLWOOD, Craig D. *Pediatric Oxygen Therapy: A Review and Update*. Respiratory Care [en línea]. 2017, 62(6), 645–661 [consultado el 13 de septiembre de 2024]. ISSN 1943-3654. Disponible en: doi:10.4187/respcare.05245
- [64] WISCONSIN DEPARTMENT OF HEALTH SERVICES. *Carbon Dioxide* [en línea]. 29 de marzo de 2023 [consultado el 12 de julio de 2024]. Disponible en: <https://www.dhs.wisconsin.gov/chemical/carbondioxide.htm#:~:text=400-1,000%20ppm:%20typical%20level,stagnant,%20stale,%20stuffy%20air.>
- [65] ZHU, Sha et al. *An Exonuclease III Protection-Based Electrochemical Method for Estrogen Receptor Assay*. International Journal of Molecular Sciences [en línea]. 2013, 14(5), 10298–10306 [consultado el 14 de octubre de 2024]. ISSN 1422-0067. Disponible en: doi:10.3390/ijms140510298

Agradecimientos

Expresamos nuestro sincero agradecimiento al **Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas (CEMIT)** de la Universidad Nacional de Asunción, por su apertura, buena predisposición y confianza para la implementación de este proyecto en sus instalaciones.

Asimismo, agradecemos al **Grupo de Investigación en Electrónica y Mecatrónica (GIEM)** por brindar el espacio físico necesario y el apoyo técnico fundamental para el desarrollo de esta propuesta.