



**Análisis de estrategias de transferencia de calibración entre equipos comerciales
y prototipos de monitorización de variables medio ambientales**

Tay Lasso Enrique Luis

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica,

Automatización y Control

Ing. Guamán Novillo, Ana Verónica, PhD.

16 de febrero de 2024



Plagiarism and AI Content Detection Report

Revision CopyLeaks Tay Enrique.pdf

Scan details

Scan time: February 16th, 2024 at 13:58 UTC

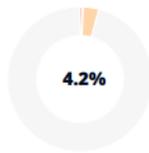
Total Pages: 76

Total Words: 18926

ANA
VERONICA
GUAMAN
NOVILLO

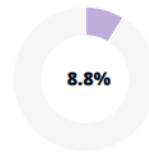
Firmado digitalmente por ANA VERONICA GUAMAN NOVILLO.
Fecha: 2024.02.16 09:09:58 -05'00'

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	0.5%	101
Minor Changes	0.1%	28
Paraphrased	3.4%	644
Omitted Words	3.2%	601

AI Content Detection



Text coverage		Words
AI text	8.8%	1671
Human text	91.2%	16654

[Learn more](#)



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería Electrónica y Automatización y Control

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: "**Análisis de estrategias de transferencia de calibración entre equipos comerciales y prototipos de monitorización de variables medio ambientales**" fue realizado por el señor **Tay Lasso, Enrique Luis**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, viernes 16 de febrero de 2024

Firma:



ANNA VERÓNICA GUAMAN
NOVILLO

.....
Ing. Guamán Novillo, Ana Verónica, PhD

C. C 1103996946



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería Electrónica y Automatización y Control

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Tay Lasso Enrique Luis**, con cédula de ciudadanía n°1720572369, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Análisis de estrategias de transferencia de calibración entre equipos comerciales y prototipos de monitorización de variables medio ambientales** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, viernes 16 de febrero 2024

.....
Tay Lasso, Enrique Luis

C.C.: 1720572369



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería Electrónica y Automatización y Control

Autorización de Publicación

Yo **Tay Lasso Enrique Luis**, con cédula de ciudadanía n°1720572369, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Análisis de estrategias de transferencia de calibración entre equipos comerciales y prototipos de monitorización de variables medio ambientales** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, viernes 16 de febrero 2024

.....
Tay Lasso, Enrique Luis

C.C: 1702572369

Dedicatoria

Este trabajo de titulación lo dedico a mi madre Sofía Lasso y a mi padre Enrique Tay Lee que siempre me han demostrado su apoyo y me han dado el privilegio de ser amado por ellos. A mis hermanas Erika Tay y Karem Tay, que siempre han estado ahí para mi cuando fue necesario. Al resto de mi familia que igualmente me han mostrado su cariño a través de mi vida. A mis amigos que sin su molestar incesante este trabajo no se hubiese realizado. Y principalmente este trabajo esta dedicado a Jessica Obaco que debió haberse graduado y cumplido sus deseos, pero la vida no lo permitió. Los amo mucho a todos.

Enrique Luis Tay Lasso

Agradecimiento

Agradezco a todas personas que conocí en este trayecto universitario, amigos, profesores y compañeros con los que trabajé a lo largo de este trayecto universitario. A mi familia que me apoyo todo este tiempo en todos los aspectos posibles. A mi madre que siempre se esforzó para que todos sus hijos tuvieran lo necesario para vivir. A mi padre que me apoyo a su manera. A mis hermanas que siempre apoyaron a la familia. A mis amigos y a toda mi familia que mostró su apoyo a lo largo de mi vida. Finalmente, un agradecimiento especial a la Ing. Ana Guamán, que sin su apoyo y paciencia este trabajo no se hubiese terminado.

Enrique Luis Tay Lasso

Contenido

Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Resumen	14
Abstract.....	15
Capitulo I. Introducción	16
Antecedentes.....	16
Justificación e Importancia.....	18
Alcance del proyecto	19
Objetivos	20
Objetivo General	20
Objetivos Específicos	20
Descripción del trabajo de titulación.....	20
Capítulo I.....	20
Capitulo II.....	21
Capitulo III.....	21
Capitulo IV.....	21
Capitulo II. Marco Conceptual	22
Variables Medioambientales	22
Temperatura	22
Monóxido de carbono (CO)	23
Partículas por millón	23
Radiación UV	23
Índice Ultravioleta.....	24
Sensores	24
Sensor de Temperatura	24

Termistor NTC	25
Termistor PTC	25
Termocupla.....	25
Sensor de temperatura de Resistencia (RTD)	26
Sensor semiconductor de temperatura	26
Sensor de Gas	26
Sensor de concentración de gas	27
Sensor de radiación UV.....	27
Calibración de sensores	28
Calibración Univariable	28
Calibración univariable lineal	28
Regresión Lineal Múltiple (MLR).....	29
Regresión de Componentes Principales	30
Partial Least Squares Regression (PLS).....	30
Transferencia de calibración	32
Piecewise Direct Standardization (PDS).....	33
Spectral Space Transformation (SST)	34
Unsupervised Dynamic Orthogonal Projection (uDOP).....	35
Capitulo III. Diseño e implementación	37
Introducción	37
Selección de Sensores	38
Rango de medición.....	39
Sensores de temperatura	39
Sensores de monóxido de carbono	41
Sensores de radiación UV	42
Selección del Procesador	43

	10
Elementos Varios.....	45
Diseño de la Placa.....	46
Diseño del Recubrimiento.....	48
Implementación	49
Programación para la adquisición de datos	50
Equipos de Referencia	52
Equipo de referencia de temperatura TEMTOP AIR QUALITY MONITOR.....	52
Equipo de referencia de PPM de CO CHNADKS - Detector de gas	53
Equipo de referencia de Radiación UV	53
Adquisición de Datos	54
Adquisición de datos de Temperatura.....	54
Protocolo para la adquisición de datos durante el aumento de temperatura	55
Protocolo para la adquisición de datos durante la disminución de temperatura.....	56
Adquisición de datos de PPM de Monóxido de Carbono (CO).....	58
Protocolo de adquisición de datos para el aumento y disminución de CO.....	58
Adquisición de datos de radiación de UV	60
Protocolo de adquisición de datos de radiación UV.....	60
Capitulo IV. Pruebas y Resultados	61
Adquisición de datos de temperatura.....	61
Resultados de los datos de Aumento de Temperatura	61
Resultados de los datos de Disminución de Temperatura.....	63
Adquisición de datos de PPM de Monóxido de Carbono (CO).....	65
Adquisición de datos de Índice de radiación UV	69
Procesamiento de Datos.....	73
Partición de datos.....	73
Transformación de datos	73

Calibración de los Equipos	74
Regresión por Partial Least Squares (PLS)	75
Transferencia de Calibración	78
Resultados de Calibración por Transferencia de Calibración	80
Conclusiones y Recomendaciones	83
Conclusiones.....	83
Recomendaciones.....	85
Referencias.....	87

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Tabla comparativa de sensores de temperatura</i>	40
Tabla 2 <i>Tabla Comparativa de los sensores de Monóxido de Carbono</i>	41
Tabla 3 <i>Tabla Comparativa de los sensores de radiación UV</i>	42
Tabla 4 <i>Tabla comparativa de procesadores</i>	43
Tabla 5 <i>Resultados de la regresión por Partial Least Squares del Equipo 1</i>	76
Tabla 6 <i>Resultados de la regresión por Partial Least Squares del Equipo 2</i>	77
Tabla 7 <i>Errores calculados de las transferencias de calibración</i>	80

Índice de Figuras

Figura 1 <i>Esquema del algoritmo PDS</i>	34
Figura 2 <i>Explicación algoritmo uDOP</i>	36
Figura 3 <i>Diagrama de conexión para la placa a usar</i>	47
Figura 4 <i>Dimensiones del encubrimiento del dispositivo</i>	48
Figura 5 <i>Implementación del dispositivo de adquisición de datos de sensores ambientales</i>	49
Figura 6 <i>Diagrama de Flujo de la programación para adquisición de datos</i>	51
Figura 7 <i>Adquisición de datos No. 1 de aumento de temperatura</i>	62
Figura 8 <i>Adquisición de datos No. 1 de aumento de temperatura</i>	63
Figura 9 <i>Adquisición de Datos No. 1 de disminución de temperatura</i>	64
Figura 10 <i>Adquisición de Datos No. 2 de disminución de temperatura</i>	65
Figura 11 <i>Adquisición de Datos No. 1 de variación de PPM de CO</i>	66
Figura 12 <i>Adquisición de Datos No. 2 de variación de PPM de CO</i>	67
Figura 13 <i>Adquisición de Datos No. 3 de variación de PPM de CO</i>	68
Figura 14 <i>Adquisición de Datos No. 4 de variación de PPM de CO</i>	69
Figura 15 <i>Adquisición de Datos No. 1 de variación de Radiación UV</i>	70
Figura 16 <i>Adquisición de Datos No. 2 de variación de Radiación UV</i>	71
Figura 17 <i>Adquisición de Datos No. 3 de variación de Radiación UV</i>	71
Figura 18 <i>Adquisición de Datos No. 4 de variación de Radiación UV</i>	72

Resumen

En el presente trabajo de titulación se muestra la efectividad del uso de la transferencia de calibración, para realizar la calibración de sensores de medidas medioambientales. Esto se debe a la naturaleza fluctuante que suelen presentar este tipo de sensores, por lo cual se busca encontrar un método por el cual se pueda realizar la calibración de estos sin tener la necesidad de altos costos y tiempo, que usualmente traen consigo los métodos tradicionales de calibración de sensores. Para esto se diseñó e implementó dos equipos de sensado gemelos, los cuales midan los valores de las variables: temperatura, concentración de partículas por millón de CO y radiación UV, medido a través del Índice de radiación UV. Después se obtiene los datos de estos dispositivos frente a distintas condiciones y una vez procesada esta información, se procede con la calibración multivariable de ambos equipos por el método Partial Least Squares Regression (PLS), y se realiza la transferencia de calibración multivariable al equipo dos por los métodos: Piecewise Direct Standardization (PDS), Spectral Space Transformation (SST) y Unsupervised dynamic Orthogonal Projection (uDOP). Se analizó los resultados de los errores de las distintas estrategias de calibración y se llegó a la conclusión de que los métodos Piecewise Direct Standardization y Spectral Space Transformation con una diferencia de error relativo comparada con el método tradicional Partial Least Squares Regression menor del 0.646% y 2.301% respectivamente, demostraron ser efectivos para la calibración de todos estos sensores ambientales que al aplicarse podría resultar en ahorros significativos tanto en tiempo y en costos asociados con la calibración multivariable tradicional.

Palabras clave: Calibración multivariable, transferencia de calibración, sensores ambientales.

Abstract

The present thesis demonstrates the effectiveness of using calibration transfer to calibrate environmental measurement sensors. This is due to the fluctuating nature often exhibited by such sensors, prompting the search for a method to calibrate them without incurring high costs and time, which are commonly associated with traditional sensor calibration methods. To achieve this, two twin sensor systems were designed and implemented, measuring the values of variables: temperature, concentration of particles per million of CO, and UV radiation measured through the UV radiation index. Subsequently, data from these devices were obtained under various conditions, and once this information was processed, multivariable calibration of both systems was performed using the Partial Least Squares Regression (PLS) method. Multivariable calibration transfer was then carried out on system two using the methods: Piecewise Direct Standardization (PDS), Spectral Space Transformation (SST), and Unsupervised dynamic Orthogonal Projection (uDOP). The results of the errors from the different calibration strategies were analyzed, concluding that the Piecewise Direct Standardization and Spectral Space Transformation methods, with a relative error difference compared to the traditional Partial Least Squares Regression method of less than 0.646% and 2.301% respectively, proved to be effective for calibrating all these environmental sensors. The application of these methods could lead to significant savings in both time and costs associated with traditional multivariable calibration.

Keywords: Calibration, Multivariable calibration, calibration transfer, environmental sensors.

Capítulo I. Introducción

Antecedentes

La importancia de la calibración radica en su capacidad para asegurar la precisión y confiabilidad de las mediciones realizadas por diversos instrumentos y dispositivos. Al establecer una relación confiable entre las mediciones obtenidas y los estándares de referencia, la calibración garantiza que los resultados sean consistentes, comparables y libres de sesgos. Esto es esencial en una amplia gama de aplicaciones, desde la investigación científica hasta la producción industrial, ya que las decisiones informadas y la calidad de los productos dependen directamente de la exactitud de las mediciones. Además, la calibración juega un papel crucial en la detección temprana de desviaciones en los instrumentos, lo que permite tomar medidas correctivas y mantener la calidad y precisión a lo largo del tiempo. Considerando la importancia de este proceso, es necesario analizar diversas técnicas y métodos para la calibración de equipos. Como es mencionado en el artículo "The Cost of Calibration", algunos equipos de calibración tradicional suelen llegar a costar \$100 000 mientras que los equipos que realizan pruebas de rendimiento llegan hasta \$1 000 000, y el costo de estos equipos se incluye dentro del precio de cada placa de circuito o instrumento creado (Braudaway, 2003). Por lo cual, en proyectos con recursos limitados se debería encontrar métodos de calibración económicamente viables para la realización de calibración de los sensores. Una estrategia sería la calibración por transferencia, en la cual se compara el instrumento a calibrar con otro instrumento de forma indirecta realizando la calibración de este a través de métodos matemáticos.

El análisis de estrategias de transferencia de calibración entre equipos certificados o comerciales y prototipos de monitorización de variables medioambientales se considera importante en el ámbito de la ciencia y la tecnología ambiental, debido a la necesidad de calibración de estos equipos por la variabilidad propia de los sensores y el alto costo de la

calibración por métodos tradicionales. Con el objetivo de garantizar mediciones precisas y confiables de estas variables ambientales, se vuelve importante realizar una transferencia de calibración efectiva entre los equipos de referencia, y los prototipos o instrumentos de monitoreo en desarrollo. En función con este método de calibración, el artículo “Método de calibración por transferencia, validación e incertidumbre”(Aranda et al., 2006) hace una comparación entre el método de comparación directa con el método de calibración por transferencia. Mientras la comparación directa implica la correspondencia de valores obtenidos por un instrumento de medición con un patrón de referencia dado, la calibración por transferencia compara los valores del instrumento con los de un patrón de referencia a través de otro patrón de transferencia, que se pueden obtener en diferentes momentos y lugares. Además, se evaluaron los métodos de comparación directa con los de transferencia simple y transferencia con deriva, considerando mediciones a corto plazo con y sin deriva. El estudio concluyó que los métodos de calibración por comparación directa y transferencia simple no son suficientemente robustos para compensar la deriva, a diferencia del método de transferencia con compensación de deriva que, aunque aumenta la complejidad, brinda mayor veracidad y repetibilidad.

En el ámbito del uso de sensores químicos para medir la contaminación ambiental y la transferencia de calibración, el artículo “Calibration transfer and drift counteraction in chemical sensor arrays using Direct Standardization” (Fonollosa et al., 2016) aborda la necesidad de calibrar sistemas de detección química de manera individual debido a la variabilidad inherente a los sensores químicos. El análisis se centra en la transferencia de calibración entre matrices de sensores químicos. Utilizando cinco unidades gemelas de detección con 8 sensores, se expusieron a diversos niveles de concentración de etanol, etileno, monóxido de carbono y metano. Se generaron modelos de calibración con una unidad maestra y luego se aplicó la normalización directa para evaluar la transferencia de modelos de calibración a otras unidades, midiendo en diferentes días. Los resultados mostraron que las señales pueden mapearse al

espacio en una unidad de referencia. Esto significa que los modelos de calibración entrenados pueden extenderse a las unidades esclavas, utilizando un número reducido de muestras de transferencia. Además, se logró mitigar los efectos de la deriva.

Estos artículos ilustran la aplicación de la transferencia de calibración mediante normalización directa en sistemas con sensores químicos, lo cual resulta esencial para la medición de variables ambientales.

Justificación e Importancia

La contaminación ambiental afecta de manera perjudicial la salud de los seres humanos, especialmente aquellos que pasan la mayor parte de su tiempo en ambientes cerrados, que actualmente constituyen entre un 80% y 90%. Dado que el punto más cercano de monitoreo de la calidad del aire con relación a la matriz ESPE se encuentra en el sector de Los Chillos, a kilómetros de distancia de otras estaciones de monitoreo en el Distrito Metropolitano de Quito, no es posible identificar microclimas ni patrones de contaminación en áreas más pequeñas. Por lo tanto, surge la necesidad de proponer la construcción de un sistema oficial de monitoreo en la universidad, que permita recoger datos sobre las condiciones ambientales tanto dentro como en los espacios abiertos del campus.

La ausencia de tal sistema se debe en gran medida a su alto costo, lo cual motiva este trabajo para encontrar una solución a través de técnicas como la transferencia de calibración, que aborda el problema de los costos generados por los métodos de calibración tradicionales. Este proyecto se enmarca en el proyecto de investigación propuesto por el Ing. Andrés Arcentales, titulado "Sistema de monitorización y análisis ambiental en interiores y exteriores usando IoT y microservicios como parte de una solución Smart Environment en el campus matriz de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE". Colaborará con el laboratorio de investigación del Grupo BIO4TECH para acceder a los equipos necesarios para las diversas pruebas, siguiendo las normativas vigentes del laboratorio y sus equipos.

Alcance del proyecto

El propósito de este trabajo de titulación es llevar a cabo un análisis e investigación exhaustivos de estrategias de transferencia de calibración. Además, se planea el desarrollo de dos sistemas prototipos gemelos con matrices de sensores destinados a la medición de condiciones ambientales. Uno de estos prototipos será calibrado utilizando dispositivos certificados y/o comerciales con certificación, mientras que el segundo será calibrado mediante la aplicación de estrategias de transferencia de calibración. El objetivo principal es evaluar y determinar la estrategia más eficaz para la transferencia de calibración en estos sistemas. Para lograr este propósito, se llevarán a cabo lo siguiente:

Diseño y fabricación de dos sistemas prototipos gemelos destinados a la medición de temperatura ambiental, CO, y radiación UV.

Investigación de varias estrategias de calibración y transferencias de calibración enfocado en la monitorización medio ambiental donde se elegirá las estrategias más adecuadas para este tipo de sistemas.

Diseño de al menos dos estrategias para la transferencia de calibración desde el prototipo calibrado hacia el prototipo no calibrado. Posteriormente, se llevarán a cabo pruebas con estas estrategias y se recopilarán los resultados derivados de su implementación.

Evaluación y análisis de los resultados obtenidos entre el equipo comercial el prototipo calibrado y el prototipo realizado la transferencia de calibración para obtener el mejor desempeño de sistema de medición de condiciones medioambientales con matrices de sensores.

Objetivos

Objetivo General

Analizar estrategias de transferencias de calibración entre equipos comerciales certificados y prototipos de monitorización de variables medioambientales

Objetivos Específicos

Identificar, a través de la investigación en la literatura, estrategias de calibración y transferencia de calibración apropiadas para estaciones de monitorización medioambiental.

Desarrollar dos prototipos para la medición de temperatura, CO y radiación UV haciendo uso de matrices de sensores.

Efectuar la calibración de los prototipos gemelos utilizando equipos comerciales certificados y aplicar las estrategias de transferencia desarrolladas del prototipo calibrado al prototipo no calibrado, con el fin de llevar a cabo una comparación exhaustiva entre los resultados.

Analizar el procedimiento y determinar la estrategia de transferencia de calibración más efectiva para los sistemas de monitorización medioambiental.

Descripción del trabajo de titulación

Capítulo I

En el primer capítulo del proyecto de titulación se abordaron aspectos preliminares fundamentales para comprender el alcance y la relevancia de la investigación. Se presentaron los antecedentes que fundamentan la necesidad de realizar el proyecto, así como la justificación que respalda su realización. Además, se definieron los objetivos que se buscan alcanzar con el trabajo y se delimitó el alcance del mismo, estableciendo los límites y las áreas específicas que serán abordadas en la investigación.

Capítulo II

En este capítulo se aborda la parte conceptual del trabajo de titulación, centrándose en los aspectos fundamentales para la medición de variables clave. Se analizan las variables a medir y los sensores utilizados para capturar estas medidas. Además, se estudia el proceso de calibración de los sensores. Finalmente, se describe la transferencia de calibración. Estos temas proporcionan el marco teórico necesario para comprender la implementación y análisis de los datos obtenidos en el proyecto de titulación.

Capítulo III

En este capítulo se describe la parte de desarrollo, diseño e implementación, donde se describe como se realizó el diseño de los dispositivos que se usarán para la adquisición de datos y medición de las variables ambientales, como los sensores y el procesador, junto con la parte de recubrimiento y el software usado para cumplir con esta función. También se explica los equipos que se usarán de referencia en las pruebas y se establece un protocolo de pruebas.

Capítulo IV

En este capítulo, se realizan las pruebas siguiendo el protocolo previamente establecido, y se muestran los resultados tanto de los datos obtenidos por los dispositivos como de la calibración, la transferencia de calibración y el análisis de estos resultados. Finalmente se termina el trabajo con las conclusiones y recomendaciones a las cuales se han llegado.

Capítulo II. Marco Conceptual

Variables Medioambientales

Las variables medioambientales son las características del entorno que pueden ser medidas y cuantificadas, estas cubren una alta gama, desde temperatura, humedad, presión atmosférica, calidad del aire (incluyendo concentraciones de contaminantes como CO₂, CO, partículas suspendidas), radiación solar, velocidad y dirección del viento, etc. Estas variables se usan para comprender y monitorear el medio ambiente y los cambios dentro de este. En este trabajo se trabajará con las variables de Temperatura, Radiación UV y PPM de CO.

Temperatura

La temperatura es una medida que indica el nivel de "calor" o "frío" de un cuerpo o sustancia. Aunque nuestras sensaciones nos permiten calificarla de manera cualitativa, asignar valores numéricos basados solo en estas sensaciones no es posible. Sin embargo, existen propiedades de los materiales que cambian de manera predecible con la temperatura, permitiendo su medición precisa. La transferencia de calor es un fenómeno relacionado, donde el calor se transfiere de cuerpos calientes a cuerpos fríos hasta alcanzar el equilibrio térmico. La ley cero de la termodinámica menciona que si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí, entonces si cambiamos el tercero por un termómetro se puede decir que dos cuerpos están en equilibrio térmico si tienen la misma temperatura (Çengel & Boles, 2015).

La temperatura tiene varias escalas que se usan al momento de medirlas, las más comunes Celsius y Fahrenheit, siendo Celsius la usada en el Ecuador.

La escala Celsius, es una escala de temperatura en la que el punto de congelación del agua se define como 0 °C y el punto de ebullición del agua como 100 °C a una presión atmosférica normal. Por otro lado, la escala Fahrenheit, es una escala de temperatura en la que

el punto de congelación del agua se define como 32 °F y el punto de ebullición del agua como 212 °F a una presión atmosférica normal (Çengel & Boles, 2015)

Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro, insípido e inodoro que se produce principalmente por la combustión incompleta de hidrocarburos como el carbón y el gas. La inhalación de grandes cantidades de esta puede ser mortal. La concentración de CO en la atmósfera generalmente es baja, aunque puede ser mayor en áreas urbanas (Bolaños Morera & Chacón Araya, 2017).

Partículas por millón

La relación entre la concentración de una sustancia y la concentración de otra se describe mediante una unidad de soluto disuelto en un millón de unidades de disolvente. Esta relación puede expresarse de diversas formas, como peso-peso, volumen-volumen u otras relaciones entre unidades de medida (Anderson Douglas et al., 2003). Por lo cual PPM de CO hace referencia a la cantidad de moléculas de CO presentes en un millón de moléculas de aire.

Radiación UV

La radiación ultravioleta (UV) es una parte del espectro electromagnético que abarca una gama de longitudes de onda desde 400 hasta los 100 nanómetros (nm). Se subdivide en tres regiones principales: UVA (400-320 nm), UVB (320-290 nm) y UVC (290-200 nm), cada una con diferentes efectos biológicos según su longitud de onda. Es importante distinguir entre "luz ultravioleta" y "radiación ultravioleta", ya que solo las longitudes de onda dentro del espectro visible provocan sensaciones visuales (Diffey, 2002).

Índice Ultravioleta

El índice UV es una herramienta clave para alertar al público sobre los posibles efectos perjudiciales de la radiación ultravioleta (UV) en la salud. Muestra el valor de la radiación UV del sol en un lugar y en un tiempo específicos. Usualmente se mide esta en una escala que va de 0 a 11 o más, donde valores más altos señalan una mayor intensidad de la radiación UV. Mientras el índice UV aumenta, aumenta con este el riesgo de sufrir quemaduras solares y otros problemas de salud relacionados con la exposición a la radiación UV. Este índice tiene en cuenta varios factores, como la posición del sol, la presencia de nubes y los niveles de ozono en la atmósfera. Su propósito es guiar a las personas a que tomen precauciones necesarias ante la exposición al sol (Abdel Baset et al., 2023).

Sensores

Un sensor es un dispositivo que detecta cambios en su entorno y convierte esas variaciones en señales eléctricas u otro tipo de señales cuantificables. Estos dispositivos pueden medir diferentes tipos de variables, como temperatura, presión, luz, sonido, humedad, entre otros. Los sensores son componentes fundamentales en una amplia gama de aplicaciones. Permiten monitorear y controlar condiciones ambientales, procesos industriales y sistemas tecnológicos, brindando información para la toma de decisiones y el funcionamiento de diversos sistemas.

Sensor de Temperatura

Un sensor de temperatura es un dispositivo diseñado para medir la temperatura de un entorno y convertir esta medida en una señal eléctrica, digital o analógica. Estos sensores son de varios tipos según su funcionamiento y el tipo de señal que envían.

Termistor NTC

Un termistor NTC es el tipo más común de sensor de temperatura de componentes discretos y suele ser el más económico. Su resistencia disminuye a medida que aumenta su temperatura. Este comportamiento se denomina coeficiente de temperatura negativo, que es la fuente del acrónimo NTC. Un termistor NTC es un semiconductor que experimenta una disminución en la resistencia a medida que aumenta la temperatura, debido a un aumento en el número de portadores de carga, los termistores NTC exhiben una resistencia que varía exponencialmente con la temperatura (Platt Charles & Fredrik Jansson, 2016)

Termistor PTC

Un termistor PTC, es un sensor de temperatura en el cual su resistencia aumenta junto a la temperatura. Se dividen en dos grupos: lineales y no lineales. Los lineales tienen un sensor de tamaño de chip basado en silicio y ofrecen una respuesta muy lineal. Los no lineales utilizan un sensor que contiene titanato de bario en un compuesto policristalino y aumentan bruscamente su resistencia por encima de una temperatura umbral (Platt Charles & Fredrik Jansson, 2016)

Termocupla

Un termopar emplea un par de cables fabricados con metales distintos para medir la temperatura. Estos cables se unen en un extremo, generalmente soldándolos, y debido a las diferentes características termoeléctricas de los metales, se genera un voltaje mínimo entre sus extremos libres. Este voltaje permite derivar la temperatura de los extremos unidos. Aunque no requiere una fuente de alimentación externa, el voltaje generado es muy bajo (medido en microvoltios) y altamente no lineal. Este principio se basa en el efecto Seebeck, que describe cómo un gradiente de temperatura a lo largo de un alambre genera una pequeña fuerza electromotriz, manifestada como una diferencia de potencial entre sus extremos (Platt Charles & Fredrik Jansson, 2016)

Sensor de temperatura de Resistencia (RTD)

Es un sensor cuya resistencia aumenta según la temperatura, cuyo elemento sensor es metal puro. Un RTD aprovecha el aumento fraccional en la resistencia eléctrica de un film metálico, filamento metálico o (en algunos casos) un film de carbono, cuando la temperatura del metal aumenta. En su forma más simple, un RTD es un dispositivo de 2 cables sin polaridad. El elemento sensor suele estar hecho de platino, ya que tiene una respuesta lineal a la temperatura en un amplio rango. Tienen alta precisión de más o menos 0.01 grados Celsius (Platt Charles & Fredrik Jansson, 2016)

Sensor semiconductor de temperatura

Un sensor de temperatura semiconductor es un dispositivo integrado que incluye un componente sensor compuesto por uniones de transistores. Su respuesta es generalmente lineal y su uso es sencillo. También puede ser llamado sensor de temperatura de brecha de energía, sensor de temperatura de diodo, sensor de temperatura de circuito integrado, entre otros nombres. Estos sensores pueden ser clasificados como sensores montados en placas de circuito, aunque muchos de ellos tienen cables y no están específicamente diseñados para esto. Cuando tienen una salida digital, a veces se les denomina sensor de temperatura digital o termómetro digital, lo que puede causar confusión, ya que otras variantes de sensores de temperatura también pueden ser digitalizadas con los componentes adecuados. En la mayoría de los casos, las características del dióxido de silicio limitan su rango de temperatura operativa a alrededor de -50 a +150 grados Celsius (Platt Charles & Fredrik Jansson, 2016)

Sensor de Gas

Un sensor de gas es un dispositivo que detecta la presencia de gases específicos en el ambiente y convierte esta información en una señal eléctrica, generalmente proporcionando una salida proporcional a la concentración del gas detectado. Los sensores de gas pueden ser sensibles a un gas específico o a una gama de gases, dependiendo de su diseño y aplicación.

Sensor de concentración de gas

Los sensores de gas basados en semiconductores proporcionan una manera rentable de detectar gases específicos presentes en el aire ambiente. Estos dispositivos alteran su resistencia eléctrica o capacitancia en función de la concentración del gas detectado, se usan para detectar gases como el propano o el monóxido de carbono. Las uniones n-p del semiconductor son sensibles a la presencia de ciertos gases en la atmosfera. El óxido de estaño se utiliza ampliamente en sensores de gas de estado sólido. Una capa sinterizada de este compuesto se deposita sobre un sustrato cerámico junto con otros compuestos como el óxido de antimonio. Esta capa funciona como un semiconductor de tipo n, aumentando la transferencia de electrones cuando ciertos gases se adsorben entre los granos. Cuando la concentración de gas disminuye, los átomos de oxígeno desplazan las moléculas de gas, devolviendo al sensor a su estado original. Cada sensor incluye un calentador resistivo para activar la reacción química. Los sensores de gas semiconductor son propensos a la sensibilidad cruzada, donde un sensor puede responder a varios gases. Los fabricantes abordan este problema agregando material de filtrado o ajustando las proporciones de dopantes en el semiconductor (Platt Charles & Fredrik Jansson, 2016).

Sensor de radiación UV

Los sensores UV son dispositivos que identifican la luz ultravioleta (UV) mediante el uso de materiales con una amplia brecha de banda integrados en diferentes configuraciones, como fotoconductores, diodos Schottky, uniones p-n y transistores de efecto de campo. Estos dispositivos están diseñados para medir la intensidad de la radiación UV en diversas aplicaciones y se emplean tanto en monitoreo ambiental como en sistemas avanzados de salud. Tienen un papel esencial en la detección y seguimiento de la radiación UV, la cual puede ser perjudicial para la salud humana y el entorno. Los sensores UV se utilizan en una variedad de aplicaciones, desde la monitorización del índice UV hasta el control de la calidad del agua y

el aire, así como en procesos de esterilización UV y seguimiento de la exposición a UV en entornos médicos (Pham et al., 2022)

Calibración de sensores

La calibración de sensores es el proceso de ajustar o validar la precisión y la confiabilidad de un sensor en relación con un estándar de referencia conocido. Este proceso implica comparar las lecturas del sensor con valores conocidos o medidas de referencia y realizar ajustes si es necesario para garantizar que las lecturas del sensor sean precisas y consistentes. La calibración es importante para garantizar que los sensores proporcionen mediciones precisas y confiables; esta puede dividirse en dos partes, calibración y predicción.

Calibración Univariable

La calibración univariante habla sobre un método de calibración en el cual se establece una relación matemática entre una única variable medida por el sensor y un valor conocido de la muestra. En esta metodología, se hace uso de un modelo matemático simple para correlacionar las lecturas del sensor con los valores de referencia. La calibración univariante es aplicada usualmente cuando solo se está midiendo una variable específica y no hay interacciones significativas con otras variables. Este método es normalmente aplicado en situaciones donde la relación entre la señal del sensor y la propiedad de interés es lineal y bien entendida. (Chu et al., 2022)

Calibración univariable lineal

Esta se expresa de la forma $y = b_0 + b \cdot x + \varepsilon$, donde x es la variable independiente, y es la variable dependiente b_0 y b son los coeficientes de regresión, y ε es el error de medición. En el análisis de la regresión, el objetivo principal es encontrar los mejores valores estimados de b_0 y b basados en un conjunto de n valores medidos (x_i, y_i) , de manera que se logre el

grado más cercano entre \hat{y} (el valor de medido) y y (el valor de referencia). Una vez calculados \hat{b}_0 y b , se pueden utilizar para análisis predictivos. Los valores estimados de b_0 y b generalmente se obtienen mediante el método de mínimos cuadrados, que implica minimizar la suma de los cuadrados de los errores hasta que se obtenga un valor con un error lo suficientemente bajo (Chu et al., 2022)

Regresión Lineal Múltiple (MLR)

Es un método estadístico usualmente empleado para analizar la relación entre múltiples variables independientes y una única variable dependiente. Expande sobre los principios de la regresión lineal simple para acomodar relaciones más complejas de sistemas que poseen múltiples predictores o variables independientes. El concepto básico es similar al de la regresión lineal simple, pero los cálculos involucrados en MLR se vuelven más extensos, especialmente a medida que aumenta el número de variables independientes. Típicamente, se utilizan computadoras para manejar la complejidad computacional asociada con MLR (Chu et al., 2022). Suponga que existen m variables independientes y se toman n datos. La estructura del modelo sería

$$\begin{aligned} y_1 &= b_0 + b_1x_{11} + b_2x_{12} + \dots + b_mx_{1m} + \varepsilon_1 \\ y_2 &= b_0 + b_1x_{21} + b_2x_{22} + \dots + b_mx_{2m} + \varepsilon_2 \\ &\dots \dots \dots \\ y_n &= b_0 + b_1x_{n1} + b_2x_{n2} + \dots + b_m + x_{nm} + \varepsilon_n \end{aligned}$$

Esta ecuación puede ser escrito en forma de matriz como: $y = Xb + \varepsilon$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} b_0 \\ \dots \\ b_m \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

El valor obtenido por el método de mínimos cuadrados es \hat{y} y el residual de sumas al cuadrado es $S_{res} = \varepsilon^T \varepsilon = (y - Xb)^T (y - Xb) = y^T y - b^T X^T y - y^T Xb + b^T X^T Xb$.

Para obtener el mínimo valor de S_{res} , b debe satisfacer la ecuación:

$$\frac{\partial S_{res}}{\partial b} = \frac{\partial}{\partial b} (y - Xb)^T (y - Xb) = 0, \text{ Que resuelto da la ecuación } X^T X b = X^T y$$

Resolviendo esta ecuación se obtiene los valores de los coeficientes de regresión

Este algoritmo es básico y sirve para sistemas simples con relación lineal. Su fórmula es directa y sencilla, pero no tiene en cuenta el efecto de la interferencia entre componentes. A pesar de sus ventajas, MLR presenta diversas limitaciones.

Regresión de Componentes Principales

Los primeros vectores de puntuación f obtenidos mediante el análisis de componentes principales de la matriz de espectros X se utilizan para formar una matriz $T = [t_1, t_2, \dots, t_f]$, en lugar de variables de absorbancia o regresión MLR. Luego se obtiene un modelo de regresión de componentes principales (PCR) como $y = Tb + E$. La solución de mínimos cuadrados del coeficiente de regresión b es $B = (T^T T)^{-1} T^T Y$. Para los espectros x de las muestras probadas, primero se obtiene el vector de puntuación a partir de la matriz de carga mediante análisis de componentes principales: $t = xP$. Luego, el resultado final se obtendrá a través del modelo PCR b como $y = tb$. PCR supera eficazmente el problema de resultados de cálculo inestables causados por MLR debido a la severa colinealidad (matriz patológica) entre las variables de entrada. En la premisa de maximizar la información útil en los espectros, también suprime la influencia del ruido de medición en el modelo al ignorar esos componentes principales secundarios y mejora aún más la predictibilidad de los modelos. Este método puede aplicarse a sistemas complejos, y los componentes objetivo pueden predecirse con mayor precisión sin conocer la presencia de componentes interferentes específicos (Chu et al., 2022).

Partial Least Squares Regression (PLS)

En Partial Least Squares (PLS), el objetivo principal es encontrar variables latentes que capturen de manera efectiva la varianza tanto en las variables predictoras (espacio X) como en

las variables de respuesta (espacio Y), al mismo tiempo que se maximiza la relación entre estos dos espacios. A diferencia de otros métodos que se centran únicamente en explicar la varianza en las variables predictoras, PLS considera tanto los espacios X como Y de manera simultánea. Esto significa que PLS tiene como objetivo identificar variables latentes que no solo capturan patrones subyacentes en las variables predictoras, sino que también se correlacionan bien con las variables de respuesta. Al optimizar estas variables latentes para capturar información de ambos espacios X e Y, PLS busca establecer una relación predictiva sólida entre las variables predictoras y de respuesta (*A Conceptual Explanation of PLS — Process Improvement Using Data*, n.d.)

La varianza Simple PLS extrae dos conjuntos de puntuaciones uno conjunto para X y otro para Y, cuyas puntuaciones para cada espacio se escriben como

$$t_a = X_a w_a, \quad \text{para el espacio X}$$

$$u_a = Y_a c_a, \quad \text{para el espacio Y}$$

El objetivo de PLS es extraer estas calificaciones para que tengan máxima covarianza.

La covarianza es

$$Cov(t_a, u_a) = \varepsilon\{(t_a - \bar{t}_a) - (u_a - \bar{u}_a)\}$$

Usando el hecho que estas calificaciones tienen un promedio de 0, la covarianza es proporcional (con un valor constante de escalación N) a $t'_a u_a$. Entonces, cada componente en PLS esta maximizando esa covarianza o el producto punto $t'_a u_a$

Mientras mayor la covarianza mayor es la relación o correlación entre dos vectores, entonces es mas informativo escribir la covarianza en termino de correlaciones y varianzas

$$Cov(t_a, u_a) = Correlacion(t_a, u_a) \times \sqrt{Var(t_a)} \times \sqrt{Var(u_a)}$$

$$Cov(t_a, u_a) = Correlacion(t_a, u_a) \times \sqrt{t'_a t_a} \times \sqrt{u'_a u_a}$$

Entonces maximizar la covarianza entre t'_a y u_a , de hecho maximiza la mejor explicación del espacio X dado por $t'_a t_a$, la mejor explicación del espacio Y dado por $u'_a u_a$ y la mejor relación entre los espacios X y Y dado por la correlación (t_a, u_a)

Estas calificaciones t'_a y u_a se encuentran sujetos a la restricción $w'_a w_a = 1.0$ y $c'_a c_a = 1.0$. Las cargas de X se llaman w_a y las cargas de Y se llaman c_a y se limitan a la unidad de longitud, es decir 1.0 (*A Conceptual Explanation of PLS — Process Improvement Using Data*, n.d.)

La regresión PLS puede dividirse en PLS1 y PLS2, aunque comparten el mismo algoritmo. La distinción fundamental entre ellos radica en que PLS1 calibra un único componente a la vez, mientras que PLS2 puede realizar la calibración de varios componentes simultáneamente. En PLS2, se utilizan las mismas puntuaciones T y la matriz de carga P para todos los componentes, lo cual puede resultar subóptimo para el vector de concentración Y. Por otro lado, en PLS1, las puntuaciones T y la matriz de carga P se optimizan para cada vector de concentración en Y, lo que mejora la precisión de la predicción, especialmente en sistemas con concentraciones variables entre los componentes calibrados. En el ámbito del análisis espectral, el término "PLS" generalmente se refiere al método PLS1, a menos que se especifique lo contrario (Chu et al., 2022).

Transferencia de calibración

La transferencia de calibración es al proceso de ajustar o adaptar un modelo de calibración desarrollado en un instrumento o espectrómetro primario o maestro para que se aplique de manera efectiva en un instrumento o espectrómetro secundario o esclavo. Esto se hace para compensar las diferencias entre los instrumentos que podrían afectar la precisión de las predicciones. La transferencia de calibración busca minimizar los errores al aplicar modelos multivariantes en diferentes instrumentos, lo que entrega una mayor coherencia y precisión en los resultados analíticos de las variables dependientes (Chu et al., 2022).

Piecewise Direct Standardization (PDS)

El algoritmo PDS divide el proceso de transferencia de espectros en segmentos, calculando coeficientes de transferencia para cada segmento. Los pasos tomados del algoritmo según Chu (Chu et al., 2022) son:

1. Selección de Espectros:

- Se elige la matriz espectral estándar de muestra $X_{ss,j+k+i}$ con una ventana de ancho $j+k+1$ como se muestra en la Figura 1 a ambos lados del punto de longitud de onda i del instrumento esclavo de los puntos $(i-j)$ a $(i+k)$, y la matriz espectral estándar de muestra $X_{ms,i}$ del punto de longitud de onda i del maestro.

2. Cálculo del Coeficiente de Transferencia F_i :

- Se utilizan estas matrices para calcular el coeficiente de transferencia F_i del punto de longitud de onda i en el algoritmo PDS.

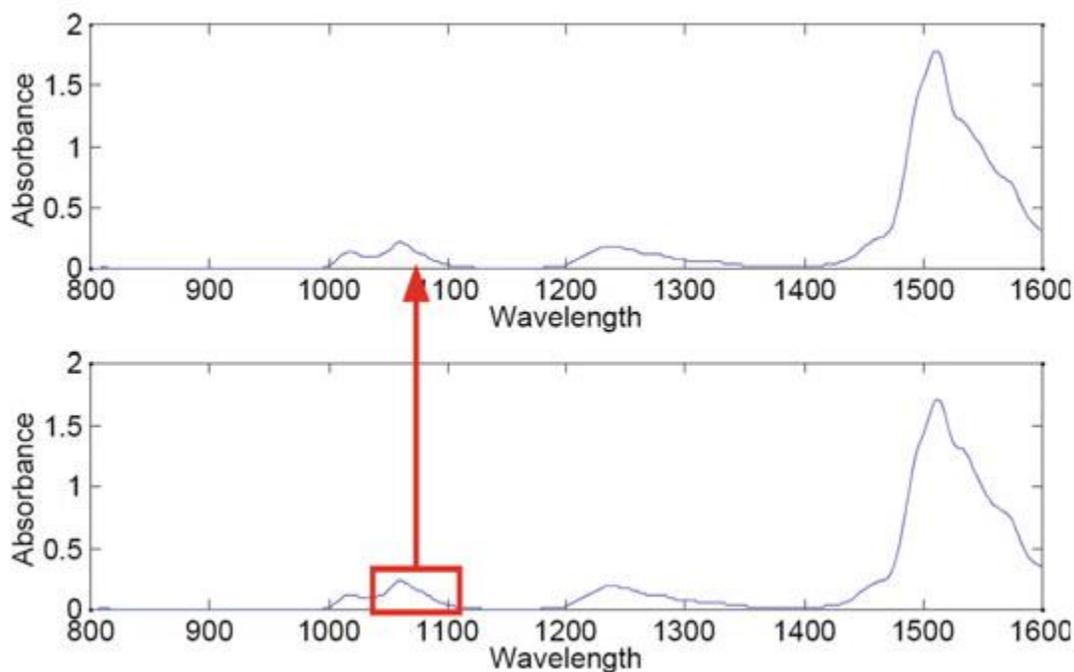
3. Cálculo de Matriz de Transferencia F:

- Se obtiene la matriz de transferencia F de todo el ancho de banda moviendo punto por punto a través de i con los coeficientes F_i calculados.

Al calcular la matriz de transferencia F, además del método PLS, se pueden utilizar otros métodos como las redes neuronales artificiales.

Figura 1

Esquema del algoritmo PDS



Nota. Esta gráfica muestra la matriz espectral de la muestra patrón, con el ancho de ventana de $(j+k+1)$. Tomado de *Chemometric Methods in Analytical Spectroscopy Technology*, (p.455) por Xiaoli Chu, 2022.

Spectral Space Transformation (SST)

La Transformación Espacial Espectral (SST) es un método que obtiene una matriz de espectros combinada $X_{comb} = [X_m, X_s]$ al combinar los espectros de conjuntos estándar X_m y X_s medidos por el maestro y el esclavo, respectivamente (Chu et al., 2022). A continuación, se explica el proceso detallado:

1. Combinación de Espectros Estándar:

- Los espectros estándar X_m y X_s medidos por el maestro y el esclavo, respectivamente, se combinan para formar la matriz de espectros combinada.

$$X_{comb} = [X_m, X_s]$$

2. PCA en la Matriz de Espectros Combinada:

- Se realiza Análisis de Componentes Principales (PCA) en la matriz de espectros combinada $X_{comb} = T[P_m^t, P_s^t] + E$
- Donde P_m^t y P_s^t son las cargas de las matrices maestra y esclava, respectivamente.

3. Cálculo de la Matriz de Transferencia F:

- Se calcula la matriz de transferencia F utilizando las cargas obtenidas en el paso anterior $F = I + (P_s^t)^+ (P_m^t - P_s^t)$
- Donde I es la matriz identidad.

4. Transferencia del Espectro del Esclavo al Maestro:

- Se utiliza la matriz de transferencia (F) para transferir el espectro del esclavo (x_{un}) al espectro del maestro. Que puede ser expresado: $x_{un}^P = x_{un} F$

La estructura del algoritmo SST es relativamente simple de calibrar y aún puede mantener resultados de predicción con un bajo número de muestras estándar

Unsupervised Dynamic Orthogonal Projection (uDOP)

El "Unsupervised Dynamic Orthogonal Projection" (uDOP) es una técnica utilizada en análisis multivariante que combina elementos de aprendizaje automático y proyección ortogonal para explorar y visualizar conjuntos de datos complejos.

En el contexto del uDOP, "Unsupervised" significa que la técnica no requiere etiquetas o información previa sobre las clases de los datos, lo que significa que busca patrones o estructuras intrínsecas en los datos sin la guía de etiquetas externas. La técnica utiliza un enfoque dinámico para la proyección ortogonal, lo que significa que adapta la proyección de los datos a lo largo del tiempo o a medida que se producen cambios en los datos. Esto puede ser especialmente útil para datos que exhiben cambios temporales o dinámicos. La proyección ortogonal se refiere a la transformación de los datos en un nuevo espacio en el que las variables están descorrelacionadas o son ortogonales entre sí. Esto puede facilitar la

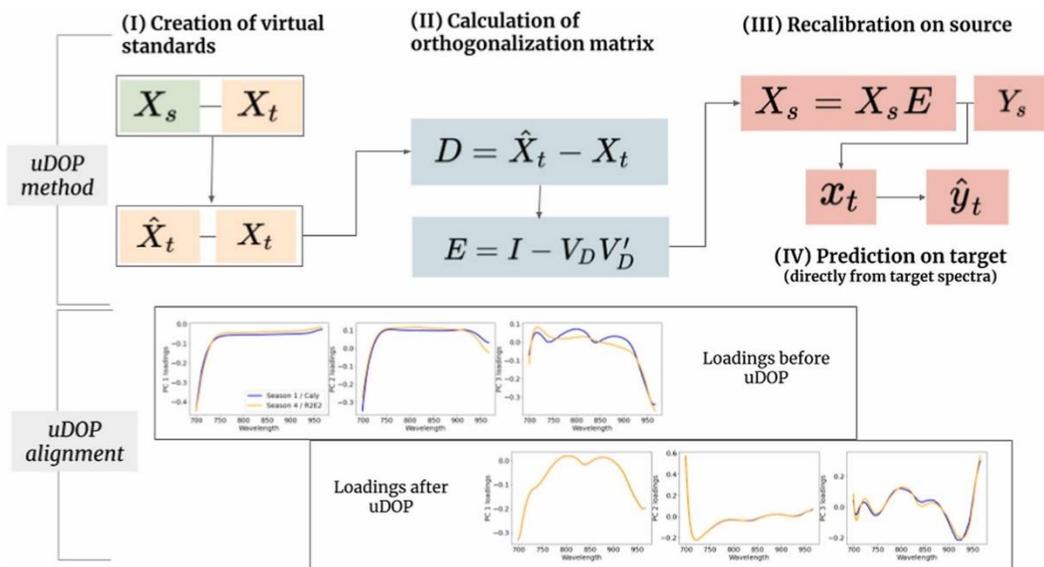
identificación de patrones o relaciones complejas entre las variables (Fonseca Diaz et al., 2022).

El algoritmo se representa en la Figura 2, donde se muestra los pasos tomados en el algoritmo que son:

1. Se tiene los datos para calibración del esclavo X_s y el maestro X_t
2. Se le resta al valor promedio del maestro que es \bar{X}_t el valor del maestro X_t
3. Se descompone en valores singulares (SVD) esta diferencia, y se obtiene V_D
4. Para lo cual se calcula finalmente la matriz E restando de la matriz Identidad $V_D V_D'$
5. Una vez obtenido E, se puede realizar la recalibración directamente en la fuente, y realizar las predicciones.

Figura 2

Explicación algoritmo uDOP



Nota. Este diagrama da una idea básica del funcionamiento del algoritmo uDOP. Tomada de *Unsupervised dynamic orthogonal projection. An efficient approach to calibration transfer without standard samples*, por Valeria Diaz, 2022, Analytica Chimica Acta .

Capítulo III. Diseño e implementación

Introducción

En este capítulo, se adentra en el proceso exhaustivo de diseño e implementación de dos dispositivos gemelos con el objetivo primordial de obtener datos precisos y confiables sobre variables ambientales críticas: monóxido de carbono (CO), índice de radiación ultravioleta (UV) y temperatura. Se centra en la búsqueda meticulosa de la mejor estrategia de transferencia para estos sensores ambientales, debido al considerable costo asociado con la necesidad de calibrar cada sensor de manera individual, se hace imperativo desarrollar una estrategia eficiente que permita la calibración simultánea o colectiva de los sensores.

La optimización de las estrategias de transferencia busca asegurar la consistencia y precisión de los datos recopilados entre los dispositivos gemelos. Tal precisión es importante para poder realizar la calibración y no obtener datos erróneos que podrían afectar la toma de decisiones en las distintas áreas donde estos equipos puedan ser utilizados.

Cada variable ambiental será medida por dos sensores del mismo modelo por cada equipo, lo cual nos da una comparación directa y validación continua de las variables de medioambientales de un área; aunque esto requiere una inversión adicional en recursos, ofrece una capa adicional de fiabilidad y robustez en la recolección de datos medioambientales, que pueden variar en distintas partes de una zona, dependiendo de las condiciones en las cuales se posicionen los sensores.

En el diseño de estos dispositivos gemelos, buscará realizar el análisis de los elementos clave, como los sensores y el procesador. Se llevará a cabo una evaluación de las características y especificaciones de cada componente y comparación con otros equipos similares para garantizar que sea la elección correcta en el contexto del monitoreo ambiental. Se considerarán la precisión y la sensibilidad de los sensores junto con el rango de funcionamiento de estos ante condiciones ambientales variables. Además, se analizará el

procesador para asegurar que sea capaz de coleccionar eficientemente los datos obtenidos de los sensores, realizar cálculos necesarios y transmitir la información de manera confiable de los sensores a los sistemas de recolección y análisis de datos.

A través del diseño e implementación, se busca dar una solución integral que responda a las necesidades de monitoreo ambiental y a los problemas que presenta la zona de monitoreo en este momento. Por lo cual se tiene en cuenta los aspectos clave del diseño y la implementación de estos dispositivos gemelos, principalmente su funcionamiento en los rangos medioambientales establecidos de la zona de Sangolquí.

Selección de Sensores

Al seleccionar los sensores para integrar en el diseño del equipo se debe considerar el entorno ambiental en el que el dispositivo estará operando, en este caso la ciudad de Sangolquí, principalmente en la zona de la matriz de la Universidad de las Fuerzas Armadas. Esto significa comprender las condiciones climáticas y geográficas particulares de la región, así como también la variabilidad de las variables ambientales a lo largo del tiempo.

También, se tiene en cuenta la disponibilidad de los sensores en el mercado, asegurándose de seleccionar aquellos que estén fácilmente disponibles y que cumplan con los estándares de calidad y precisión requeridos para el proyecto. Esto garantiza la viabilidad y la continuidad del proyecto, evitando posibles problemas en la adquisición de componentes o la necesidad de realizar modificaciones en el diseño debido a la falta de disponibilidad de ciertos sensores.

Asimismo, se analizan otros aspectos técnicos relevantes, como la compatibilidad de los sensores con el resto de los componentes del equipo, la robustez y durabilidad de estos, así como también cualquier consideración de costos asociados. Es importante seleccionar sensores que no solo sean precisos y confiables, sino también que sean capaces de funcionar

de manera estable y consistente en las condiciones ambientales específicas de Sangolquí, minimizando así la necesidad de ajustes o calibraciones frecuentes.

Rango de medición

Temperatura. Según el documento de Estadística Agroclimática Decadal del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), correspondiente al mes de septiembre, en la región de Pichincha, específicamente en el sector de La Tola, ubicado a aproximadamente 11.6 km de la Universidad de las Fuerzas Armadas sede principal en Sangolquí, los límites de temperaturas que existen son entre los 26°C y los 6°C (Estudios & Desarrollo Hidrometeorológico, 2022)

Radiación UV. Los niveles de radiación ultravioleta (UVI) en Quito, Ecuador, frecuentemente superan los 11.0, con una tendencia similar observada desde 1979 hasta 2018 (Parra et al., 2019), por lo que se busca sensores capaces de medir radiación UV entre un rango de 0 a 11 en el índice de radiación UV.

Monóxido de Carbono (CO). Según el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) de Estados Unidos, Exposiciones de 80 a 100 ppm durante 1 a 2 horas pueden causar disminución en la tolerancia al ejercicio y, en individuos susceptibles, dolor en el pecho y latidos irregulares. Concentraciones de 100 a 200 ppm provocan dolor de cabeza, náuseas y confusión. Concentraciones de 700 ppm o más pueden llevar al coma o la muerte (NIOSH, 1996), por lo cual se busca sensores capaces de medir en un rango desde 20 PPM de CO hasta 1000 PPM de CO.

Sensores de temperatura

Para la elección de los sensores de temperatura para usarse en este trabajo se realizó una tabla comparativa, teniendo en cuenta las características más importantes de estos para los sensores DHT11, DHT22, LM35DZ y DS19B20.

Tabla 1

Tabla comparativa de sensores de temperatura

Características	DHT11	DHT22	LM35DZ	DS18B20
Rango de Temperatura	0°C a 50°C	-40 ~ 80°C	-55°C a +150°C	-55°C a +125°C
Precisión de Temperatura	±2°C	<±0.5°C	+0.25C	±0.5°C
Voltaje de Alimentación	3V a 5.5V DC	3.3-6V DC	4V a 30V	3.0V a 5.5V
Corriente de Operación	0.5mA (máximo durante la conversión)	-	Baja	Baja
Comunicación	Un solo cable de datos	Señal digital a través de bus único	-	Interfaz One-Wire
Frecuencia de Muestreo	1 Hz (una lectura por segundo)	Promedio: 2 segundos	Constante	-
Resolución	16 bits para temperatura y 16 bits para humedad	0.1% HR y 0.1°C	-	Ajustable (9, 10, 11, 12 bits)
Datos (Data)	Salida Digital	Salida Digital	Salida análoga	Salida Digital
Tipo de Sensor	Termistor	Termistor	Sonda de silicio integrada	Semiconductor

Nota. La información mostrada en esta tabla fue adquirida de los Datasheets, de cada uno de estos sensores: para el DHT11 (ETC, n.d.), del DHT22(Liu, n.d.), LM35DZ (Texas Instruments, 1999) y (Dallas, n.d.)

Teniendo en cuenta todas las características de estos sensores mostrada en la Tabla 1, se optó por el sensor digital DS18B20. Este sensor fue elegido debido a su capacidad para

cubrir el rango deseado de funcionalidad, ofreciendo una precisión de medición con un margen de error de solo $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Además, su interfaz One-Wire permite la conexión de múltiples sensores de este tipo en diferentes ubicaciones dentro de la zona de interés, lo que facilita la obtención de lecturas más precisas de la temperatura ambiental en diferentes puntos. Para este sensor se utiliza un integrado con una resistencia de 4.7K de pull up y 10nF entre VCC y GND para eliminar ruido de estos sensores. Este sensor transmite digitalmente el valor en centígrados que se encuentra midiendo con una resolución de 2 decimales.

Sensores de monóxido de carbono

Para la elección de los sensores de temperatura para usarse en este trabajo se realizó una tabla comparativa, teniendo en cuenta las características más importantes de estos para los sensores MQ-7, MQ-9, MQ-135, MiCS-5524, Alphansense CO-B4.

Tabla 2

Tabla Comparativa de los sensores de Monóxido de Carbono

Sensor	MQ-7	MQ-9	MQ-135	MiCS-5524
Tipo	Analógico	Analógico	Analógico	Digital
Rango de detección	20 a 2000 ppm	10 a 1000 ppm	10 a 1000 ppm	1 a 1000 ppm
Gases a los cuales es sensible	CO H2 LPG CH4 Alcohol	CO, CH4 y LPG	CO2 CO Alcohol Amonio Tolueno Acetona	CO, H2, CH4, y C2H5OH
Interfaz	Analógica	Analógica	Analógica	Digital I2C

Nota. La información mostrada en esta tabla fue adquirida de los Datasheets, de cada uno de estos sensores: MQ-7 (HANWEI, n.d.), MQ-9(Hanwei Electronics, n.d.), MQ-135(HANWEI ELECTRONICS, n.d.) y *MiCS-5524* (ETC2, n.d.)

Teniendo en cuenta la información mostrada en la Tabla 2 y el precio de los sensores y su disponibilidad se optó ir por el sensor MQ-7 siendo uno de los más comunes dentro del

mercado, además que se enfoca principalmente en la medición de gas CO, a diferencia de los otros que pueden medir otros gases también. También tiene un amplio rango de detección de 20 a 2000ppm, que está dentro de nuestro rango de 20 a 1000 ppm, igualmente es fácil de usar y envía datos de manera analógica.

Sensores de radiación UV

Para la elección de los sensores de radiación UV para usarse en este trabajo se realizó una tabla comparativa, teniendo en cuenta las características más importantes de estos para los sensores ML8511, VEML6075, UVM-30A y GUVA-S12SD.

Tabla 3

Tabla Comparativa de los sensores de radiación UV

	ML8511	VEML6075	UVM-30A	GUVA-S12SD
Tipo	Analógico	Digital	Analógico	Analógico
Rango de Longitud de Onda (nm)	280 - 390	200 - 400	200 - 370	200 - 370
Interfaz	Analógica	Digital I2C	Analógica	Analógica
Características adicionales	Sensible a UV-B y UV-A	Alta precisión, UV-A y UV-B	Sensible a UV-B y UV-A	Sensible a UV-B y UV-A

Nota. La información mostrada en esta tabla fue adquirida de los Datasheets, de cada uno de estos sensores: ML8511 (LAPIS, 2013), VEML6075(Vishay, n.d.) , UVM-30A (Wiltronics, n.d.), GUVA-S12SD(Roithner LaserTechnick, 2011)

Considerando la información presentada en la Tabla 3 se selecciona el sensor GUVA-S12SD debido a que posee la capacidad de medir dentro del rango deseado de 0 a 11 Índice de radiación UV. Su salida analógica permite una fácil integración en sistemas electrónicos existentes, mientras que su precisión y sensibilidad garantizan mediciones confiables. Además de su amplia disponibilidad en el mercado.

Selección del Procesador

Para la selección del procesador encargado de recibir la información de los sensores GUVA-S12SD, DS18B20 y MQ-7, es crucial considerar varios factores. Se busca un procesador con la capacidad de manejar múltiples entradas analógicas y digitales para los sensores respectivos, así como una potencia de procesamiento suficiente para realizar cálculos y operaciones en tiempo real. Además, se valora la disponibilidad de interfaces de comunicación adecuadas, como en este caso, 2 entradas digitales para los sensores de temperatura DS18B20 y 4 análogas para los 2 sensores MQ-7 y GUVVA-S12SD, para facilitar la conexión y la transmisión de datos entre los sensores y el procesador. Otro aspecto importante es la compatibilidad con el entorno de desarrollo preferido y la disponibilidad de recursos de soporte, como bibliotecas y herramientas de desarrollo. En resumen, se busca un procesador que ofrezca la combinación óptima de capacidad de procesamiento, capacidad de entrada/salida y facilidad de integración para satisfacer las necesidades específicas del sistema de monitoreo ambiental.

Tabla 4

Tabla comparativa de procesadores

Características	Arduino Nano	Raspberry Pi Zero	ESP32
Microcontrolador	ATmega328P	Broadcom BCM2835	ESP32 dual-core Xtensa LX6
Velocidad de reloj	16 MHz	1 GHz	160 MHz (hasta 240 MHz)
Memoria Flash	32 KB	-	-
Memoria RAM	2 KB	512 MB	520 KB
Entradas/Salidas (E/S)	14 digitales, 8 analógicas	40 GPIO	36 GPIO
Interfaces de comunicación	UART, I2C, SPI	UART, I2C, SPI, USB	UART, I2C, SPI, Wi-Fi, Bluetooth
Facilidad de uso	Muy alta	Alta	Alta
Disponibilidad	Muy alta	Moderada	Moderada

Características	Arduino Nano	Raspberry Pi Zero	ESP32
Potencia de procesamiento	Baja	Moderada	Moderada a alta
Conectividad	No tiene	Wi-Fi, USB	Wi-Fi, Bluetooth

Nota. Esta información se recopiló de los manuales de usuario de cada procesador: Arduino Nano (Arduino® Nano, n.d.), Raspberry Pi Zero (Raspberry Pi Zero, n.d.), ESP32 (ESP32 Series Datasheet 2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth® + Bluetooth LE SoC Including, 2023)

Para una aplicación de adquisición de datos, donde la complejidad de las operaciones de procesamiento no es necesariamente alta, el Arduino Nano posee una serie de ventajas que lo convierten en una opción ideal en comparación del ESP32 y Raspberry Pi como se muestra en la Tabla 4.

En primer lugar, es fácil de manejar ya que el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino es conocido por su simplicidad y accesibilidad, lo que facilita la programación. Esto facilita el proceso de prototipado y desarrollo de proyectos.

Además, la compatibilidad del Arduino Nano con una variedad de sensores y módulos disponibles en el mercado amplía significativamente sus capacidades, ya que todos los sensores seleccionados son capaces de funcionar con este procesador y se puede realizar la integración de datos para recopilar información ambiental de manera eficiente.

Aunque el Arduino Nano tiene menor capacidad de procesamiento como se observa en la Tabla 4, esta es lo suficiente para manejar las tareas requeridas de la aplicación de adquisición de datos. Ya que manejar múltiples entradas de sensores, realizar cálculos básicos sin problemas y su programación es bastante simple.

También se tiene en cuenta el aspecto económico. El Arduino Nano es una opción accesible en comparación con los otros procesadores analizados, lo que lo hace atractivo para proyectos con presupuestos limitados.

Por último, la amplia disponibilidad del Arduino Nano y el apoyo de una gran comunidad de usuarios respaldan su elección. Con acceso a una amplia gama de recursos, como

tutoriales, bibliotecas de código y foros de discusión, es más fácil abordar desafíos y resolver problemas durante el desarrollo del proyecto.

En resumen, el Arduino Nano ofrece una combinación de facilidad de uso, compatibilidad, capacidad de procesamiento adecuada, bajo costo y soporte que lo hacen adecuado para la aplicación deseada.

Elementos Varios

Para que nuestro dispositivo funcione como se desea, se hará el uso de varios otros elementos los cuales son:

- Cable de datos, UTP Categoría 6
- Fuente de 5V, 2A
- Terminal para la fuente
- Interruptor para prender el dispositivo
- Switch para iniciar la toma de datos
- Cable USB mini-B para el Arduino.
- Pantalla LCD OLED I2C 128x64 0.96 Pulgadas

Los cables de los sensores se han seleccionado con una longitud de 3 metros para permitir la toma de datos en varias ubicaciones dentro de un cuarto. Esta longitud adicional facilita la colocación de los sensores en diferentes áreas del entorno a monitorear, lo que contribuye a obtener mediciones más representativas y precisas. Al usar dos sensores por variable, distribuidos estratégicamente en diferentes lugares, se logra una mayor cobertura y se reduce la posibilidad de sesgos localizados, lo que resulta en una evaluación más exacta de las condiciones ambientales del entorno. El tamaño de estos cables no afectaría de manera notable a los datos recibidos, igualmente junto con la calibración que se busca realizar se eliminaría la mínima varianza que se podría presentar por esto.

Diseño de la Placa

Se optó por el uso de una placa para facilitar la conexión de todos los elementos al procesador, ya que proporciona una estructura organizada y eficiente para interconectar los componentes del sistema. Esta placa actúa como un concentrador central que permite una conexión ordenada de los cables y módulos, lo que simplifica la configuración y redundancia en una mayor fiabilidad.

Para el diseño de esta se tiene en cuenta las varias entradas y salidas necesarias para el procesador de este proyecto las cuales son:

- 4 conexiones analógicas para los sensores de gas y radiación UV (MQ-7 y GUVAS12SD).
- 2 conexiones digitales para el sensor de temperatura DS18B20.
- 1 conexión digital para el switch de inicio de toma de datos.
- 2 conexiones (SCL y SDA) para la pantalla.
- Conexiones adicionales de 5V y GND para cada dispositivo según sea necesario.

Teniendo en cuenta se realiza el siguiente diagrama, en la página web EasyEDA que permite realizar el diagrama de conexión y el diseño de placas de forma gratuita y online.

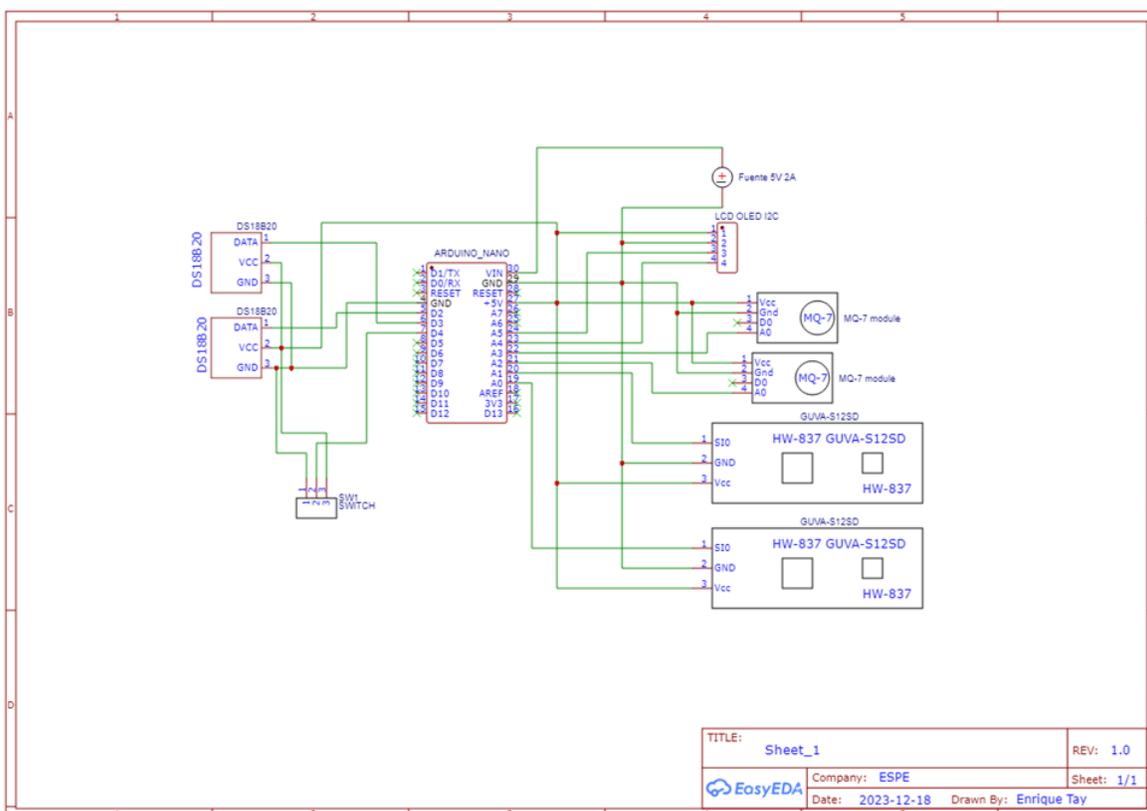
En la Figura 3 se muestra el diagrama de conexiones que tendrán las placas de nuestros sistemas de adquisición de datos, la cual posee los siguientes elementos conectados a sus entradas y salidas:

- Fuente de poder VCC al terminal VIN
- Fuente de poder GND al terminal GND
- Pantalla LCD OLED
 - SCL al terminal SCL en A5
 - SDA al terminal SCL en A4

- Sensores GUVA-S12SD
 - Sensor GUVA-S12SD número 1 a la entrada análoga A0
 - Sensor GUVA-S12SD número 2 a la entrada análoga A1
- Sensores MQ-7
 - Sensor MQ-7 número 1 a la entrada análoga A3
 - Sensor MQ-7 número 2 a la entrada análoga A2
- Sensores DS18B20
 - Sensor DS18B20 número 1 a la entrada digital D2
 - Sensor DS18B20 número 2 a la entrada digital D3
- Entrada del Switch de envío de datos a la entrada digital D4

Figura 3

Diagrama de conexión para la placa a usar



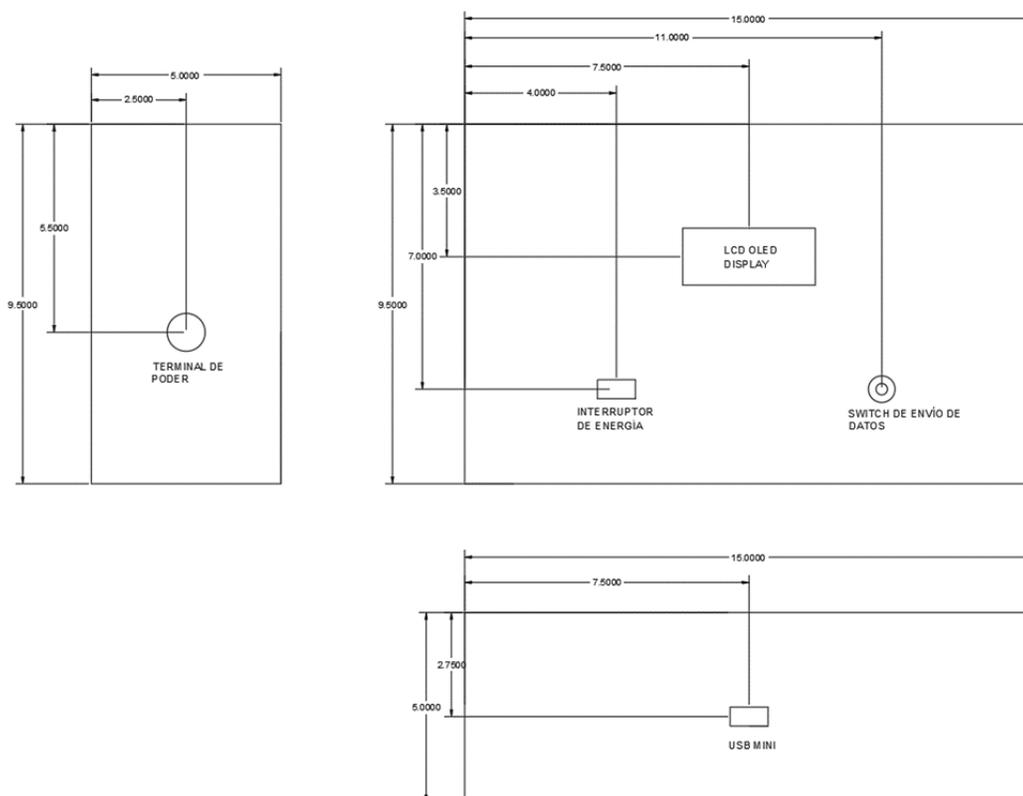
Nota. El diagrama presentado realizado en el software EasyEDA, se usará para generar el diseño de la placa a la cual irán conectados los elementos

Diseño del Recubrimiento

Se optó por utilizar una caja rectangular de plástico como recubrimiento, la cual fue diseñada con huecos específicos para alojar los elementos con los que se interactuará. Esta caja proporciona una protección física y estructural para la placa, el procesador y los elementos interiores del dispositivo. Además, la presencia de salidas de cables en la caja permite una conexión ordenada de los cables y proporciona una barrera adicional contra daños y elementos externos que puedan afectar el funcionamiento del sistema. En conjunto, este recubrimiento ofrece una solución eficaz para proteger y organizar los componentes del dispositivo, garantizando su integridad y funcionamiento adecuado en su entorno de uso.

Figura 4

Dimensiones del encubrimiento del dispositivo



Nota. Usando estas medidas se implementó el hardware del dispositivo

En la Figura 4 se ilustra el tamaño y la disposición de los diversos elementos del sistema de adquisición de datos. Se incluye un interruptor de alimentación que regula el flujo de energía desde el terminal de alimentación hacia el sistema. Además, se encuentra un interruptor de envío de datos que, cuando se coloca en la posición derecha, envía una señal digital al Arduino, iniciando la transmisión de datos a través del terminal USB Mini. Este último facilita la programación del Arduino y la recepción de información en modo serial. Por último, se integra un display LCD que muestra información variada según las necesidades específicas del sistema. Se tiene en cuenta que, en un lado del dispositivo, todos los cables de los sensores se enrutan hacia el interior de la caja, lo que resulta en la ausencia de una pared en este lado del dispositivo.

Implementación

El sistema fue implementado de una forma correcta cumpliendo con todas las partes anteriores del diseño como se puede observar en la Figura 5.

Figura 5

Implementación del dispositivo de adquisición de datos de sensores ambientales



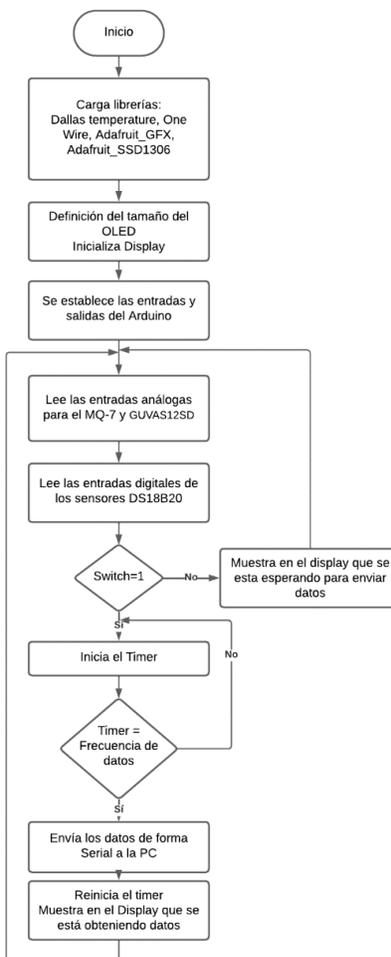
Nota. Se puede observar cómo ambos equipos fueron realizados con los mismos elementos de los mismos fabricantes, junto con los cables que saldrían a los sensores

Programación para la adquisición de datos

En el proyecto, se llevó a cabo la programación utilizando el lenguaje específico de Arduino, aprovechando las funcionalidades ofrecidas por el entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino versión 2.2.1. Durante este proceso, se hizo uso de las librerías disponibles para garantizar la correcta adquisición de datos de los sensores MQ-7, DS18B20 y GUVAS12SD, además del funcionamiento de la pantalla LCD OLED. La selección y utilización adecuada de las librerías contribuyó significativamente a simplificar el desarrollo del código y asegurar el funcionamiento óptimo del sistema de adquisición de datos.

Figura 6

Diagrama de Flujo de la programación para adquisición de datos



Nota. Se observa que se hace uso de las diferentes librerías que se encuentran disponibles para la fácil adquisición de datos de los sensores.

En la Figura 6 se muestra el diagrama de flujo usado para la programación para obtener los datos de los sensores, en este se puede cambiar la frecuencia que se busca recibir los datos según los equipos que se usarán para obtener los valores de referencia en las pruebas. Para los sensores MQ-7 y GUVAS-12SD se toma los datos de forma análoga, por el Arduino, entonces se tendrá valores de 0 a 1024 bits según los voltios que reciban los sensores, es decir, de 0V recibe analógicamente 0 bits y de 5V recibe analógicamente 1023 bits. En cambio,

del sensor de temperatura DS18B20, se recibe digitalmente la temperatura directamente en centígrados con una resolución de 10 bits y 2 decimales.

Equipos de Referencia

Para llevar a cabo las pruebas y la calibración de los equipos, así como la transferencia de calibración entre dispositivos gemelos, se tiene previsto emplear equipos certificados específicamente diseñados para la obtención precisa de las variables ambientales involucradas. Estos equipos certificados garantizan mediciones confiables y precisas de las variables ambientales, lo que es fundamental para establecer referencias precisas y confiables durante el proceso de calibración.

Equipo de referencia de temperatura TEMTOP AIR QUALITY MONITOR

Para el obtener el valor de referencia se hará uso del equipo TEMTOP M2000 que es un monitor de calidad del aire diseñado para proporcionar mediciones precisas y confiables de varios parámetros ambientales importantes. Este dispositivo está equipado con sensores avanzados que pueden detectar una amplia gama de contaminantes del aire, incluyendo partículas finas (PM2.5 y PM10), dióxido de carbono (CO2) y formaldehído (HCHO) además de temperatura y humedad. El TEMTOP M2000 cuenta con una pantalla LCD de alta resolución que muestra en tiempo real las mediciones de los diferentes parámetros de calidad del aire. Además, este dispositivo está diseñado con una interfaz de usuario intuitiva que permite una fácil navegación y configuración de las opciones de visualización y ajustes. Una característica destacada del TEMTOP M2000 es su capacidad para almacenar y analizar datos históricos de calidad del aire, lo que permite realizar un seguimiento a largo plazo de la evolución de la calidad del aire en un entorno determinado (M2000 Series Air Quality Monitor User Manual, n.d.)

Este sensor es capaz de funcionar en un ambiente de operación con un rango de 0°C a 50°C con un porcentaje de humedad de 0 a 90%RH y una presión atmosférica de 1 atm.

Además, este equipo es capaz de medir en un rango de temperatura de 0°C a 50°C con una resolución de 0.1°C y una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$ y es capaz de tomar medidas automáticas y guardarlas con una frecuencia de 1 minuto hasta 60 minutos (M2000 Series Air Quality Monitor User Manual, n.d.)

Equipo de referencia de PPM de CO CHNADKS - Detector de gas

El equipo CHNADKS es un detector de gas diseñado para la detección de múltiples gases en entornos industriales, comerciales y de seguridad. Este dispositivo cuenta con la capacidad de monitorear cuatro gases diferentes de forma simultánea: Ex (explosivos), H₂S (sulfuro de hidrógeno), CO (monóxido de carbono) y O₂ (oxígeno). El CHNADKS está equipado con sensores especializados para cada uno de estos gases, lo que permite una detección precisa y confiable en tiempo real. Los sensores están diseñados para detectar concentraciones peligrosas de los gases objetivo, lo que ayuda a proteger la salud y seguridad de las personas (CHNADKS - Detector de Gas Manual de Usuario, n.d.)

Este equipo cuenta con el estándar estadounidense de regulación para calibrar dispositivos de alarma de prueba de monóxido de carbono JJC915-2008, también posee un rango de medición de PPM de CO entre 0-1000 PPM con una resolución de 1 PPM y dos alarmas, una baja que se activa a los 50 PPM y una alta que se activa a los 200 PPM, junto con un error indicado de $\pm 10\%$. Funciona en un ambiente con una temperatura de -20°C a 50°C y una humedad menor a 95%RH (CHNADKS - Detector de Gas Manual de Usuario, n.d.)

Equipo de referencia de Radiación UV

Debido a la falta de disponibilidad de un equipo certificado específico para tomar mediciones de radiación ultravioleta (UV), se tomó la decisión de utilizar el semáforo solar ubicado en el Parque Bicentenario como una alternativa. Estos semáforos solares son dispositivos que indican los niveles de radiación UV en tiempo real y están instalados estratégicamente para proporcionar información precisa sobre la intensidad de la radiación

solar en un área determinada. Estos equipos son capaces de medir radiación ultravioleta mediante sensores ópticos y filtros UV tienen una altura de 2,5 metros y una anchura de 50 centímetros (*El Solmáforo Identifica El Nivel de Radiación Solar En Dos Parques Metropolitanos*, n.d.). Y los datos del índice de radiación solar se pueden acceder a través de la página web de Índice Ultravioleta (IUV) del Distrito Metropolitano de Quito, que recopila y presenta los datos de radiación UV obtenidos por los semáforos solares en diferentes ubicaciones de la ciudad que son actualizados regularmente (*ÍNDICE ULTRAVIOLETA (IUV) Distrito Metropolitano de Quito*, n.d.).

Adquisición de Datos

Toda la adquisición de datos planificados se llevará a cabo con una metodología que garantice la sincronización de la adquisición de datos de los dispositivos gemelos, junto con los datos de referencia. Este enfoque permitirá realizar comparaciones precisas entre las mediciones obtenidas por los sensores gemelos y los datos de referencia, lo que será fundamental para realizar la calibración de los sensores. Estos datos también serán utilizados durante el proceso de transferencia de calibración. De esta manera, se podrán comparar los errores presentados al calibrar un equipo mediante el método típico de calibración con aquellos observados al utilizar la transferencia de calibración. Esta comparación permitirá evaluar la eficacia y la precisión de ambos métodos de calibración y determinar qué tan viable es la transferencia de calibración para los sensores de medición de variables ambientales.

Adquisición de datos de Temperatura

Para obtener los valores de temperatura necesarios para la calibración y transferencia de calibración de los sensores de temperatura, se pretende simular un entorno con variaciones térmicas. Se busca generar un rango de temperaturas desde 6°C hasta 42°C para recopilar los datos necesarios que permitan realizar la calibración y transferencia de manera precisa y

efectiva, este valor abarca el rango de temperatura previamente establecida que se tienen en Sangolquí.

Protocolo para la adquisición de datos durante el aumento de temperatura

Este protocolo tiene como objetivo incrementar la temperatura ambiente en un entorno controlado mediante el uso de aire caliente. Se utilizará una caja de vidrio de medidas 30.5x31.7x51 cm para crear estas condiciones, permitiendo así el aumento gradual de la temperatura en su interior. Durante el proceso, se tomarán medidas periódicas para registrar los cambios de temperatura a medida que se va incrementando el suministro de aire caliente. Los pasos tomados fueron:

1. Preparación de la caja de vidrio:
 - a. Verificar que la caja esté limpia y seca.
 - b. Colocar el equipo de medición de referencia TEMTOP M2000 dentro de la caja prendido y guardando los datos cada minuto.
 - c. Sellar la caja colocando la tapa
2. Instalación de los sensores:
 - a. Insertar los sensores de temperatura de ambos dispositivos de adquisición de datos a través de los huecos en la caja.
 - b. Utilizar cinta tipo para sellar el espacio restante alrededor de los sensores, asegurando un sellado hermético.
3. Calentamiento de la caja:
 - a. Utilizar una secadora de cabello para generar aire caliente.
 - b. Introducir el aire caliente a través del orificio presente en la caja, aumentando gradualmente la temperatura interior.
4. Registro de datos:

- a. Establecer la frecuencia de envío de datos del dispositivo a un minuto para los dispositivos gemelos, como el equipo de referencia
 - b. Iniciar el registro de datos en la computadora activando el switch de los dispositivos gemelos y anotar la hora a la cual se empieza la adquisición de datos.
 - c. Utilizar el software CoolTerm para registrar continuamente las lecturas de temperatura de los sensores que se reciben vía comunicación Serial.
5. Calentamiento hasta la temperatura objetivo:
- a. Ajustar la temperatura del aire caliente para elevar gradualmente la temperatura interior de la caja hasta alcanzar los 42 grados Celsius.
 - b. Una vez alcanzada la temperatura deseada, se toma igualmente los datos de temperatura mientras se van enfriando hasta que este ya no disminuya
 - c. Para el enfriamiento primero se destapan los huecos sellados y después se quitan la tapa

Protocolo para la adquisición de datos durante la disminución de temperatura.

Este protocolo tiene como objetivo disminuir la temperatura ambiente en un entorno controlado mediante el uso de aire frío. Se utilizará un cooler y hielo para disminuir la temperatura dentro del cooler, igualmente usar aire frío enviado por una secadora mientras se va registrando los cambios de temperatura. Los pasos tomados fueron:

1. Preparación del cooler:
 - a. Limpiar el cooler para asegurar que esté libre de residuos y seco.
 - b. Colocar una capa de hielo en la parte inferior del cooler.
2. Preparación de los sensores de temperatura:

- a. Realizar huecos en la tapa del cooler para permitir el ingreso de los sensores de temperatura.
 - b. Colocar los sensores de temperatura de los dispositivos gemelos en los huecos preparados, asegurándose de que estén bien posicionados sin topar el hielo directamente para medir la temperatura interna del cooler.
 - c. Colocar el equipo medición de referencia TEMTOP M2000 en un envase encima del hielo evitando el contacto directo con este para tomar las mediciones cada minuto.
3. Instalación del sistema de enfriamiento:
- a. Realizar otro hueco en la tapa del cooler para permitir la entrada de aire enfriado.
 - b. Conectar la secadora en modo de aire frío para enviar aire por el nuevo hueco.
4. Sellado del cooler:
- a. Cerrar la tapa del cooler para evitar la fuga de aire frío.
 - b. Sellar los huecos donde se instalaron los sensores de temperatura y el sistema de enfriamiento con cinta adhesiva para garantizar un sellado.
5. Registro de datos:
- a. Iniciar el envío de datos a la computadora activando el switch de los dispositivos gemelos y anotar la hora a la cual se empieza la adquisición de datos
 - b. Utilizar un sistema de adquisición de datos para registrar continuamente las lecturas de temperatura de los sensores colocados dentro del cooler.
 - c. Utilizar el software CoolTerm para registrar continuamente las lecturas de temperatura de los sensores que se reciben vía comunicación Serial.
6. Enfriamiento hasta la temperatura objetivo:

- a. Encender el sistema de enfriamiento para comenzar el proceso de enfriamiento del interior del cooler.
- b. Ajustar la velocidad del sistema de enfriamiento según sea necesario para alcanzar gradualmente la temperatura deseada, en este caso, 6 grados centígrados.

Adquisición de datos de PPM de Monóxido de Carbono (CO).

Para simular un ambiente con un incremento gradual de partes por millón (PPM) de monóxido de carbono (CO), se llevará a cabo un proceso controlado de aumento de la concentración de CO en el entorno. Este enfoque permitirá obtener los datos requeridos para realizar con precisión la calibración y transferencia de calibración de los sensores de CO. Se busca que el total de estas pruebas abarquen un rango desde 0 PPM hasta 1000 PPM de CO. Mediante este procedimiento, se podrá establecer una correlación entre las lecturas de los sensores y los niveles de CO presentes, lo que resulta fundamental para garantizar la fiabilidad y precisión de los dispositivos de detección de CO en diversas condiciones ambientales.

Protocolo de adquisición de datos para el aumento y disminución de CO.

1. Preparación del entorno:
 - a. Conectar el equipo y mantenerlo energizado previamente por 48 horas, ya que estos sensores necesitan ser precalentados antes
 - b. Ubicar la caja de vidrio en un área bien ventilada y segura para llevar a cabo el experimento.
 - c. Prender el carbón previamente.
 - d. Se colocan los sensores MQ-7 y el equipo de referencia de medición de PPM de CO pegadas a un lado dentro de la caja a una altura de 30cm.
2. Aumento de CO:
 - a. Colocar el carbón prendido dentro de la caja

- b. Cerrar herméticamente la tapa de la caja de vidrio.
 - c. Permitir que el carbón genere CO dentro de la caja, aumentando gradualmente la concentración de CO en su interior.
 - d. Registrar periódicamente las lecturas de CO con los dispositivos de adquisición de medidas automáticos y realizar mediciones manuales con el dispositivo de referencia para comparación.
3. Estabilización:
- a. Continuar generando CO hasta que la concentración dentro de la caja se estabilice en el nivel deseado.
 - b. Registrar las lecturas estabilizadas de CO con todos los dispositivos de medición.
4. Disminución de CO:
- a. Abrir la tapa de la caja de vidrio de forma parcial para permitir la salida controlada del CO.
 - b. Registrar las lecturas de CO a medida que disminuye la concentración de CO en el interior de la caja.
 - c. Realizar mediciones manuales con el dispositivo de referencia para comparar con las lecturas automáticas.
5. Registro de datos:
- a. Registrar todas las lecturas de CO obtenidas durante el proceso de aumento y disminución utilizando los dispositivos automáticos y manuales.
 - b. Utilizar el software CoolTerm para registrar continuamente las lecturas de PPM de CO de los sensores que se reciben vía comunicación Serial.

- c. Documentar las lecturas en intervalos regulares para obtener una representación precisa de la variación de la concentración de CO en el tiempo

Adquisición de datos de radiación de UV

Debido a limitaciones de recursos, no es factible llevar a cabo la simulación de un entorno controlado para la medición y control de la radiación ultravioleta (UV). Por ende, se optará por realizar la adquisición de datos bajo la luz solar directa como fuente de radiación UV. Se busca obtener datos suficientes para abarcar el rango desde 0 a 11 en el índice de radiación UV. Aunque esta aproximación no permite un control exhaustivo de las condiciones, proporciona un escenario práctico y realista para evaluar el rendimiento de los dispositivos de medición en condiciones ambientales reales.

Protocolo de adquisición de datos de radiación UV.

1. Selección de la ubicación y condiciones climáticas:
 - a. Elegir una ubicación al aire libre que esté expuesta a la luz solar directa durante el período de adquisición de datos.
 - b. Verificar que no haya sombras proyectadas sobre la zona de medición para garantizar una exposición uniforme a la radiación UV.
2. Registro de datos:
 - a. Iniciar la toma de mediciones de radiación UV utilizando los sensores colocados en la ubicación designada al mover el switch de los dispositivos.
 - b. Registrar las mediciones de radiación UV a intervalos regulares durante un período de tiempo específico, lo suficientemente largo para obtener una muestra representativa de la exposición a la radiación UV.

- c. Utilizar el software CoolTerm para registrar continuamente las lecturas de PPM de CO de los sensores que se reciben vía comunicación Serial.
3. Comparación con el semáforo de radiación UV:
 - a. Obtener mediciones adicionales de radiación UV utilizando el semáforo de radiación UV ubicado a una distancia de 800 metros del semáforo.
 - b. Entrar la página web del IUV del distrito metropolitano de quito para obtener los datos medidos por los semáforos.

Capitulo IV. Pruebas y Resultados

Adquisición de datos de temperatura

Para recopilar datos, se realizaron dos sesiones de adquisición de datos para aumentar la temperatura y otras dos para disminuirla. Estas sesiones se diseñaron con el propósito de evaluar el desempeño de los sensores en condiciones de calor y frío, y para proporcionar datos comparativos que faciliten el ajuste y la validación de los dispositivos de medición en un amplio rango de temperaturas.

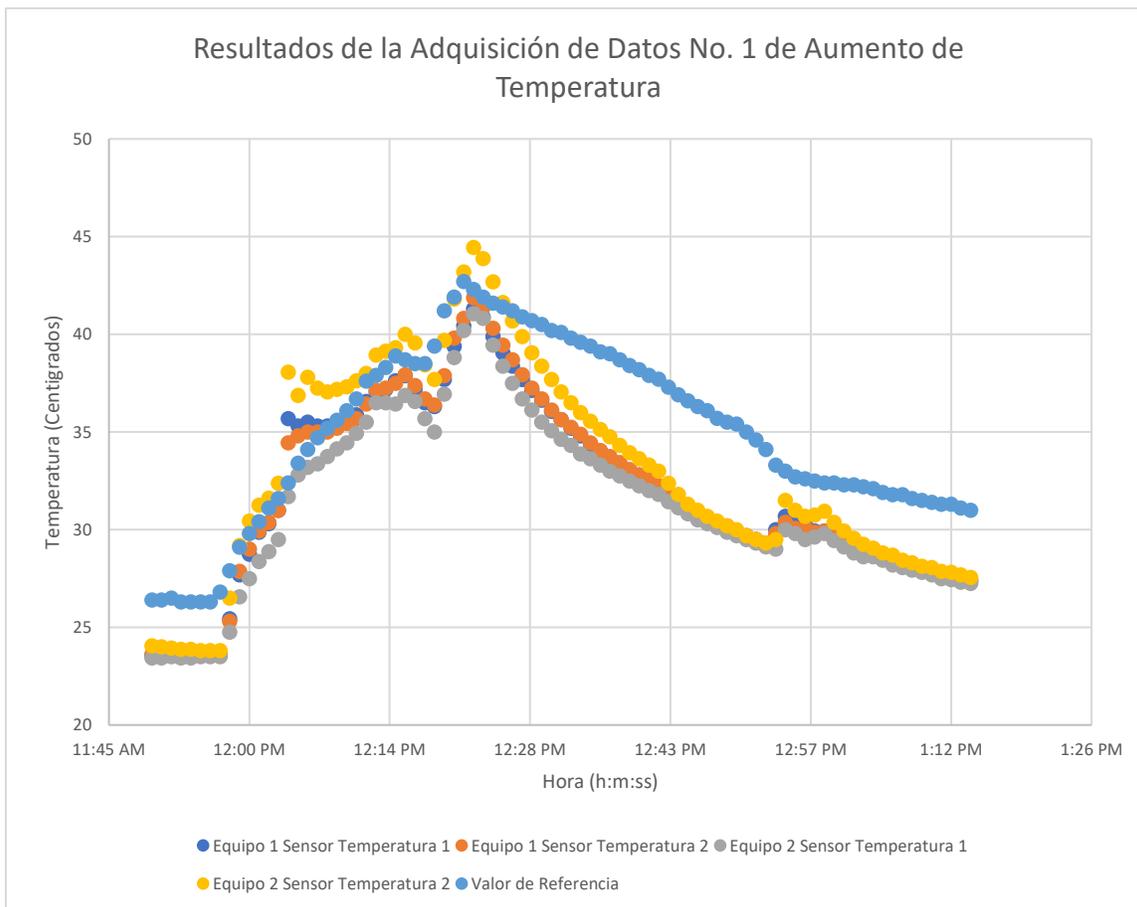
Resultados de los datos de Aumento de Temperatura

En la Figura 7 y Figura 8 presentadas se muestra el aumento de temperatura y los resultados obtenidos durante este proceso. Los primeros datos se adquirieron el 24/01/2024 de 11:49 am a 1:14 pm, obteniendo datos cada minuto, mientras que la segunda adquisición de datos se realizó el 25/01/2024 de 10:41 am a 11:25 am, también con mediciones cada minuto. En ambas ocasiones, se observó una mayor inestabilidad en los resultados durante el aumento de temperatura en comparación con el descenso. Estas fluctuaciones pueden atribuirse al método utilizado para elevar la temperatura, que consistió en el uso de aire caliente proveniente de una secadora. Por otro lado, se observó una mayor estabilidad en los resultados durante el descenso de temperatura. Esto sugiere que el ambiente se enfría de

manera más uniforme y controlada, lo que conduce a mediciones más consistentes y fiables durante la disminución de temperatura.

Figura 7

Adquisición de datos No. 1 de aumento de temperatura

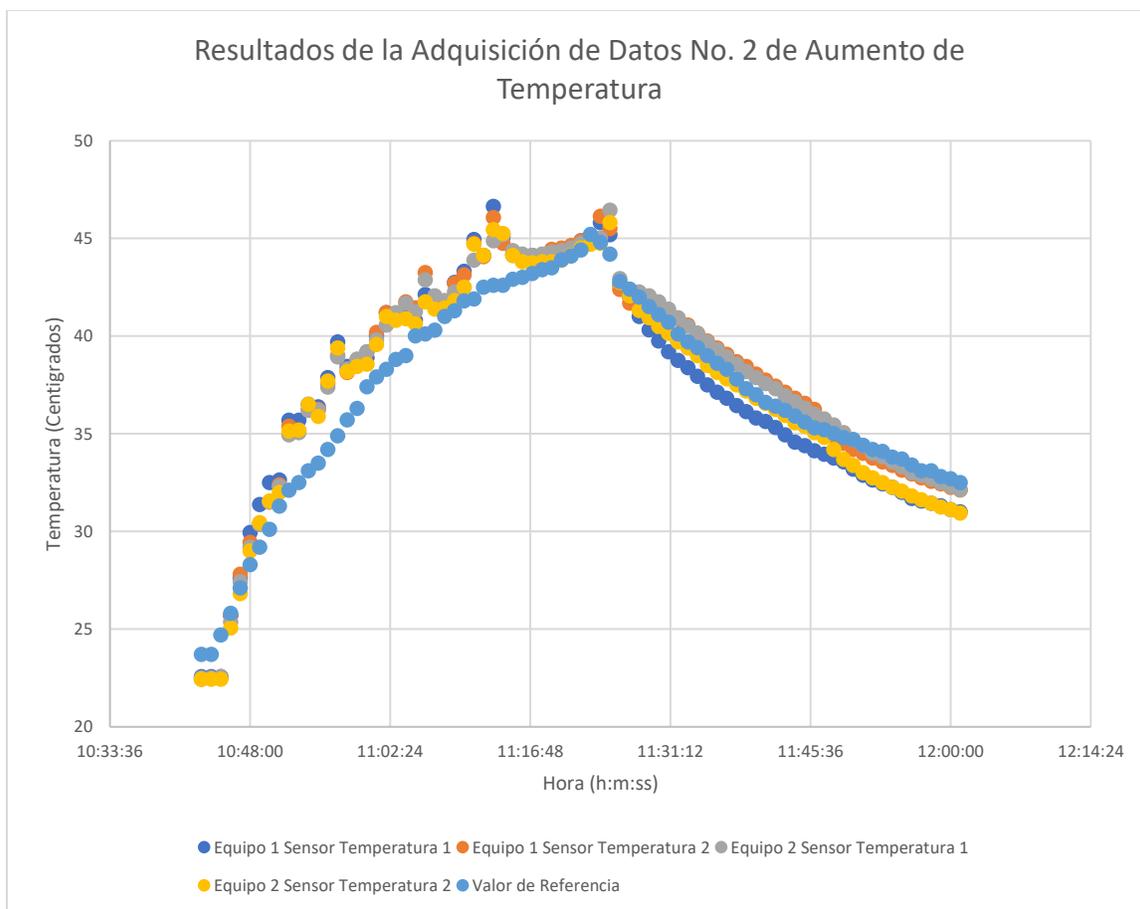


Nota. En esta prueba se obtuvo 84 datos por cada dispositivo.

Igualmente, se muestra en la Figura 7 y 8 que los datos fueron adquiridos correctamente, con la sincronización necesaria entre los dos equipos y el equipo de referencia, demostrando el funcionamiento de los sensores DS18B20 de manera efectiva y confiable

Figura 8

Adquisición de datos No. 1 de aumento de temperatura



Nota. En esta prueba se obtuvo 78 datos por cada dispositivo

Resultados de los datos de Disminución de Temperatura

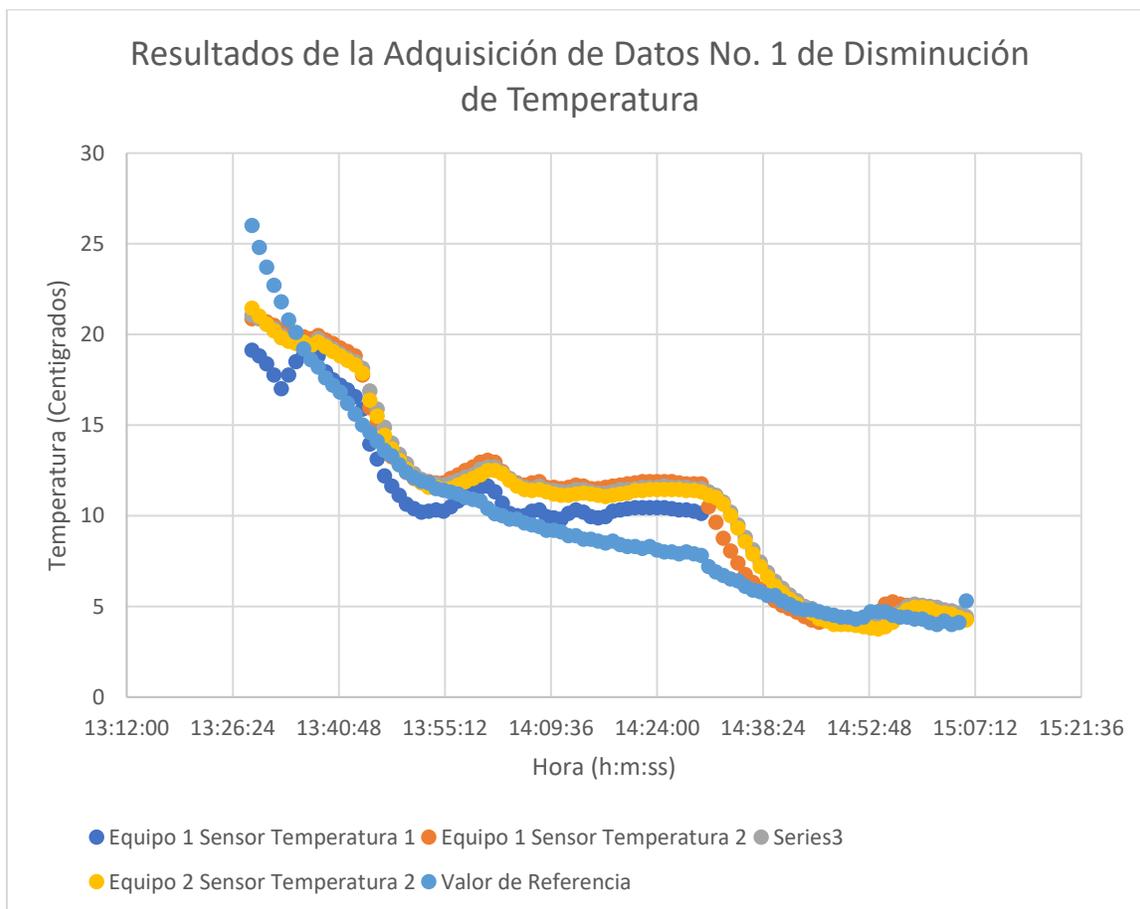
Se llevaron a cabo dos sesiones de adquisición de datos de disminución de temperatura para evaluar el comportamiento de los sensores en condiciones de enfriamiento. La primera sesión se realizó el 24/01/2024 desde las 13:29 hasta las 15:06, con mediciones tomadas cada minuto. La segunda sesión tuvo lugar el mismo día, desde las 14:39 hasta las 15:29, con el mismo intervalo de tiempo para la toma de datos.

En las Figuras 9 y 10 para ambas sesiones de adquisición de datos de disminución de temperatura, se observa una mayor variación en los resultados en comparación con las

sesiones de aumento de temperatura. Esta variación puede atribuirse tanto a la forma en que se redujo la temperatura como a las diferencias en la sensibilidad entre los sensores y el equipo de referencia utilizado. Estos hallazgos resaltan la importancia de comprender y tener en cuenta las distintas variables que pueden influir en la precisión de las mediciones de temperatura.

Figura 9

Adquisición de Datos No. 1 de disminución de temperatura



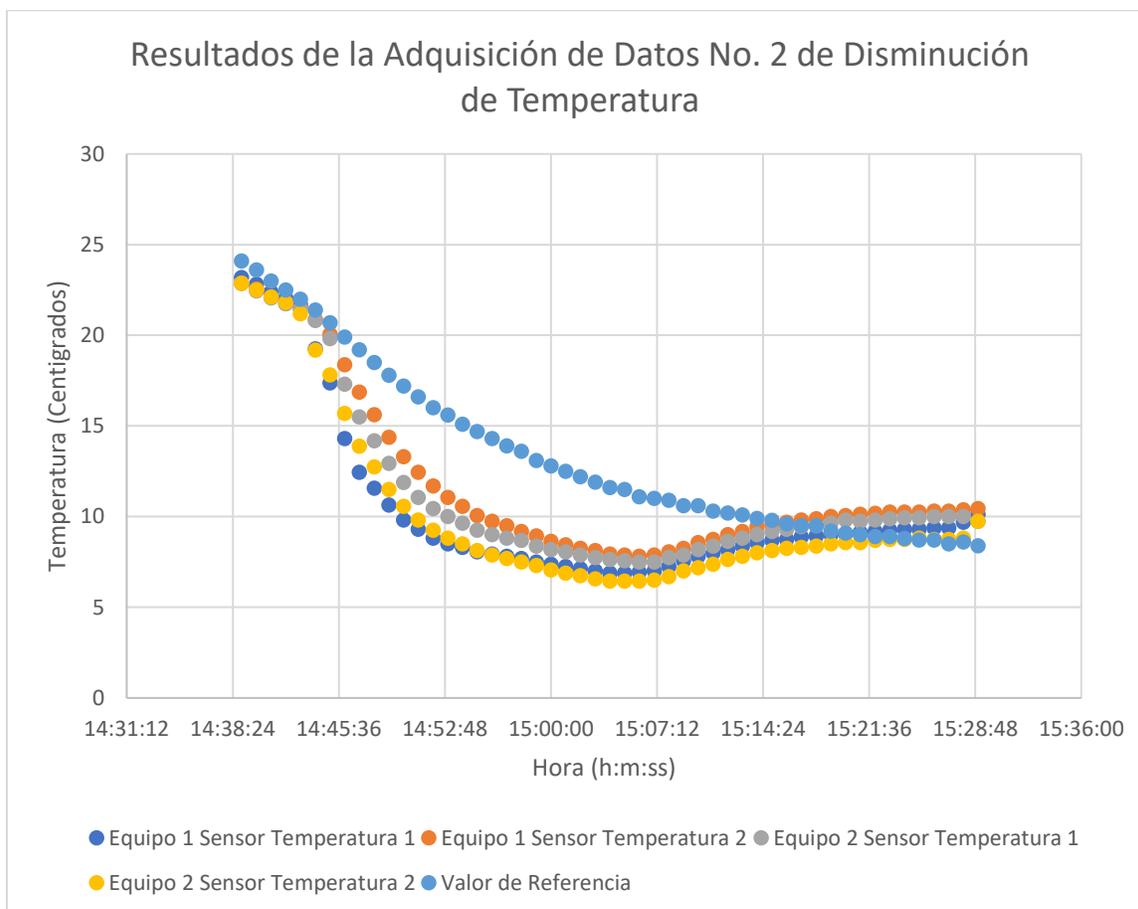
Nota. En esta prueba se obtuvo 97 datos por cada dispositivo

Se observa que las figuras demuestran el funcionamiento de los sensores en temperaturas bajas, y con estas medidas, se completa la obtención de los datos en el rango desde 6°C a 42°C. Este amplio espectro de temperaturas abordado en el estudio proporciona

una comprensión integral del rendimiento de los sensores en diversas condiciones ambientales, lo que valida su utilidad y fiabilidad en aplicaciones prácticas.

Figura 10

Adquisición de Datos No. 2 de disminución de temperatura



Nota. En esta prueba se obtuvo 64 datos por cada dispositivo

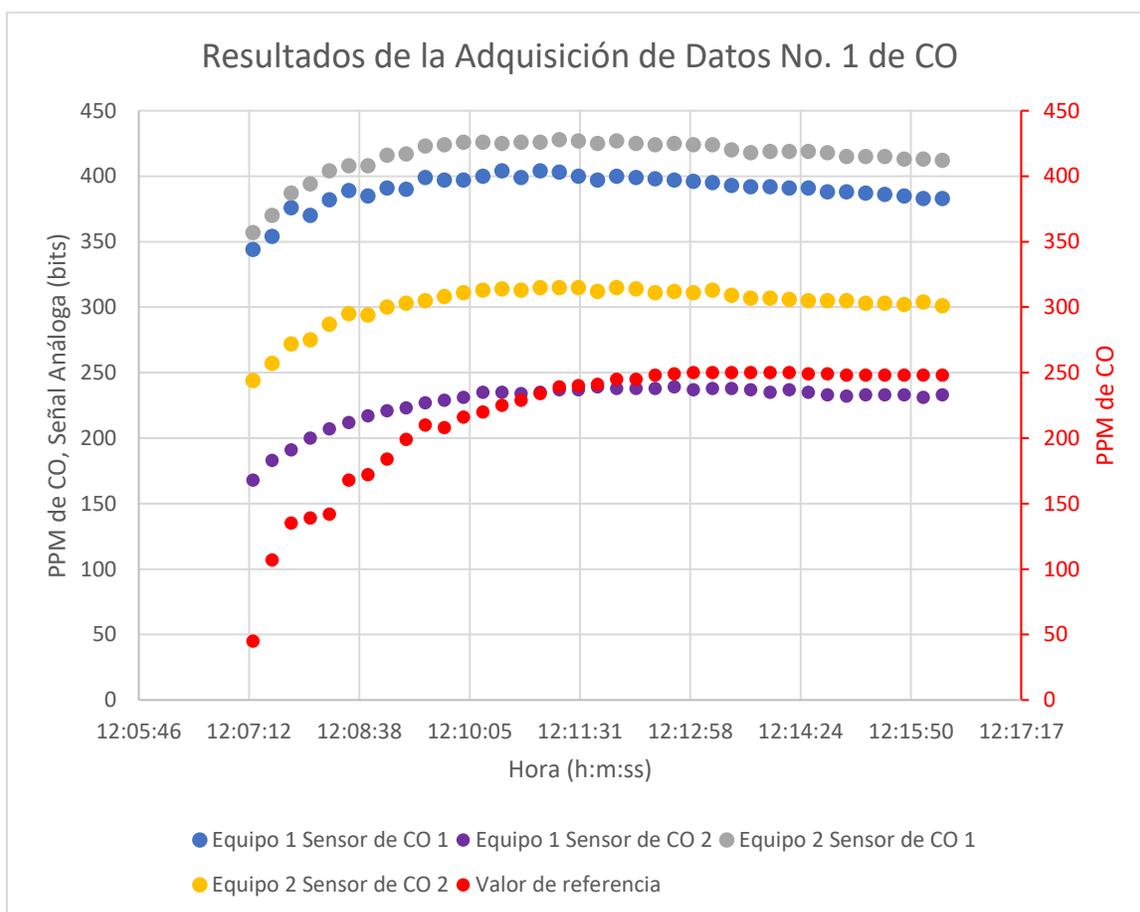
Adquisición de datos de PPM de Monóxido de Carbono (CO)

La primera sesión de adquisición de datos con los sensores de PPM de CO y el equipo de referencia se llevó a cabo el 15/01/2024. Durante esta sesión, se tomaron medidas cada 15 segundos mientras se encendía ligeramente un carbón para aumentar la concentración de CO en el ambiente. El proceso de adquisición de datos se realizó desde las 12:07:15 hasta las

12:16:15. En los resultados obtenidos, se observó una respuesta satisfactoria por parte de los sensores, mostrando una su capacidad para detectar cambios en la concentración de CO. Además, se nota en la Figura 11 un ligero offset entre los sensores, lo cual es esperado debido a la naturaleza ligeramente variable de estos sensores de PPM de CO.

Figura 11

Adquisición de Datos No. 1 de variación de PPM de CO



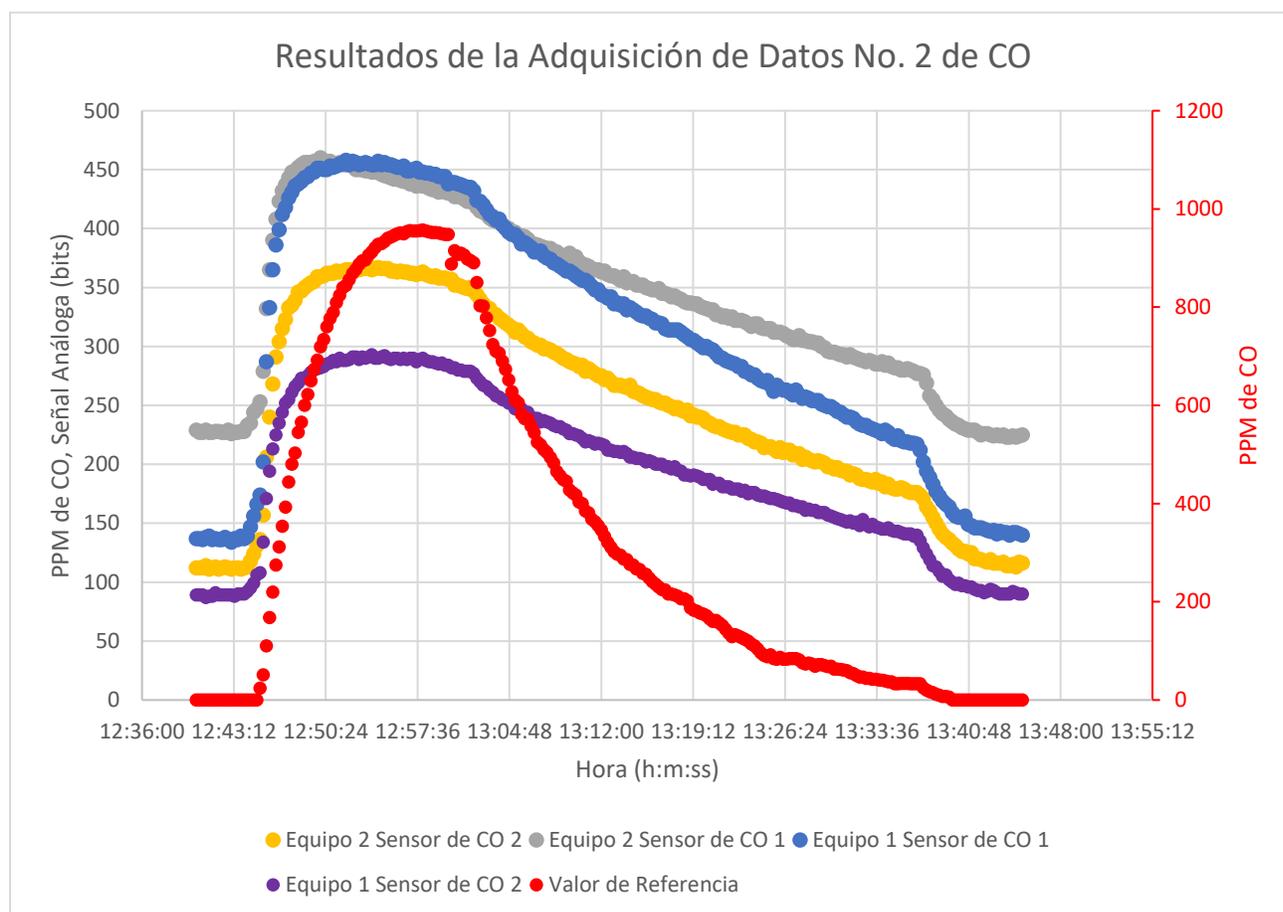
Nota. En esta prueba se obtuvo 36 datos por cada dispositivo

La segunda sesión de adquisición de datos con los sensores de PPM de CO y el equipo de referencia se llevó a cabo el 25/01/2024. Durante esta sesión, se tomó una medida cada 15 segundos desde las 12:40:15 hasta las 13:45:00. En esta ocasión, el objetivo era evaluar la respuesta de los sensores cuando la concentración de CO se acercaba al valor máximo de corte del equipo de referencia, que es de 1000 PPM. Una vez alcanzado este valor, se abrió la

caja gradualmente para permitir que la concentración de CO disminuyera de manera controlada. En la Figura 12 se puede observar cómo los sensores respondían a niveles cercanos al límite superior y cómo se comportaban durante la disminución de la concentración de CO en el ambiente.

Figura 12

Adquisición de Datos No. 2 de variación de PPM de CO



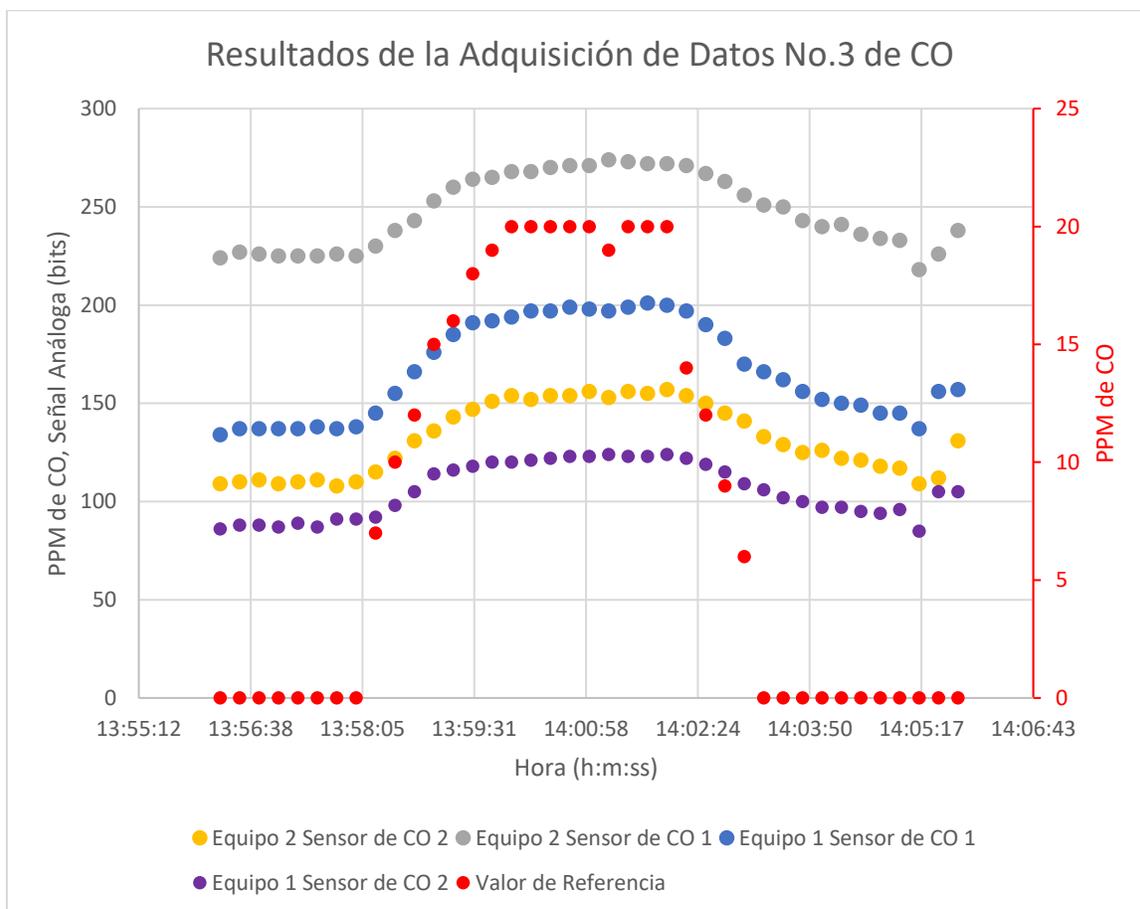
Nota. En esta prueba se obtuvo 259 datos por cada dispositivo

En la tercera sesión de adquisición de datos, realizada el 25/01/2024, se llevó a cabo un seguimiento desde las 13:56:15 hasta las 14:05:45, tomando mediciones cada 15 segundos. En esta ocasión, se encendió muy poco carbón, con el propósito de observar cómo reaccionaban los sensores ante un leve aumento en los PPMs de CO. Se pudo notar en la Figura 13 que los valores de los sensores, así como los del equipo de referencia, aumentaron,

aunque con una sensibilidad ligeramente menor en comparación con las sesiones anteriores. Este resultado indica que los sensores son capaces de detectar incluso pequeñas variaciones en la concentración de CO en el ambiente.

Figura 13

Adquisición de Datos No. 3 de variación de PPM de CO



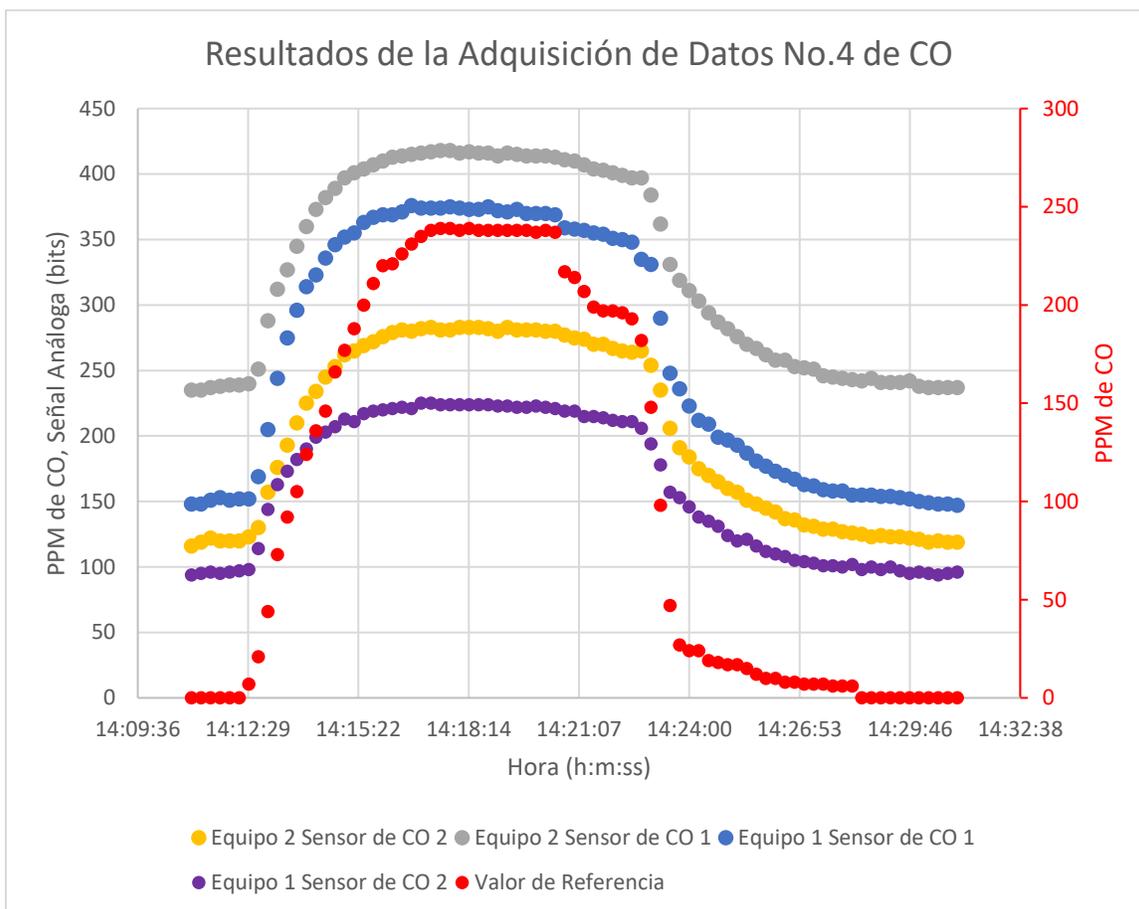
Nota. En esta prueba se obtuvo 38 datos por cada dispositivo

En la cuarta sesión, realizada también el 25/01/2024, se llevó a cabo un seguimiento desde las 14:11:00 hasta las 14:31:00, con mediciones cada 15 segundos. En esta ocasión, el objetivo fue obtener datos ante una cantidad media de PPM de CO en el ambiente. Se encendió una cantidad moderada de carbón y se registraron las mediciones, las cuales alcanzaron un pico de 238 PPM como se nota en la Figura 14. Este conjunto de datos permitió

evaluar cómo respondían los sensores ante niveles intermedios de concentración de CO, lo que es relevante para comprender su comportamiento en condiciones típicas.

Figura 14

Adquisición de Datos No. 4 de variación de PPM de CO



Nota. En esta prueba se obtuvo 80 datos por cada dispositivo

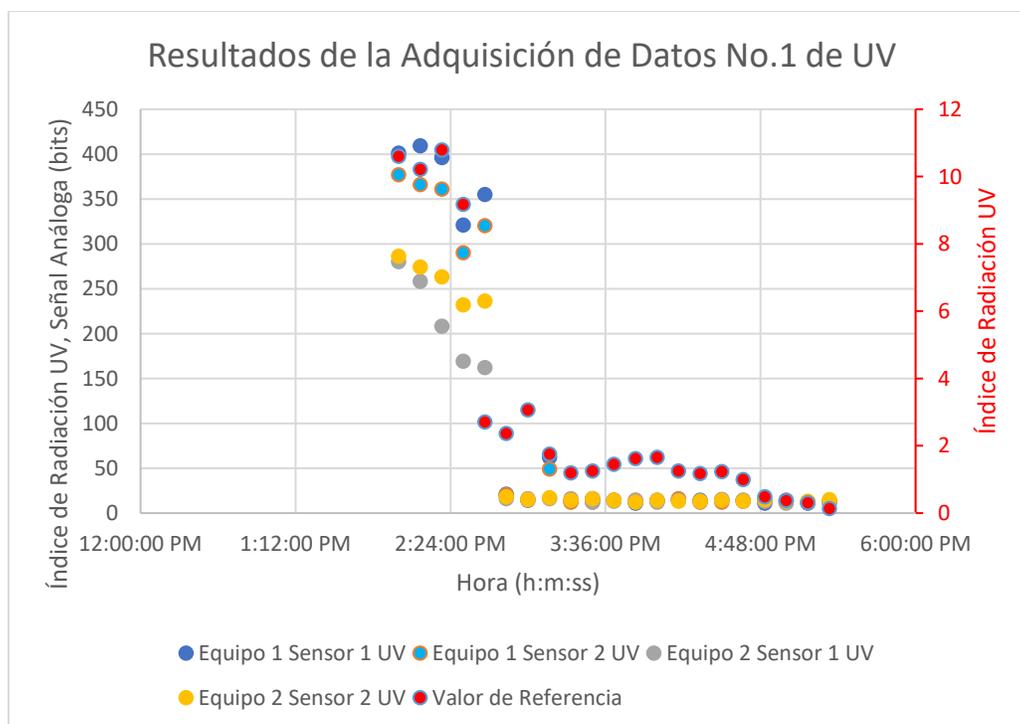
Adquisición de datos de Índice de radiación UV

Se llevarán a cabo diversas pruebas para obtener datos de radiación ultravioleta (UV) para la calibración y transferencia de calibración. Estos datos se compararán con el valor de referencia proporcionado por la página de Índice UV (IUV) del Distrito Metropolitano de Quito, específicamente obtenido del semáforo del parque del Bicentenario

Durante el curso del estudio, se llevaron a cabo cuatro mediciones de radiación UV para obtener datos sobre el funcionamiento de los sensores y su relación con el semáforo de referencia. La primera medida tuvo lugar el 1 de febrero de 2024, desde las 14:00 hasta las 17:20, con intervalos de 10 minutos entre cada medición. La segunda medición se realizó el 2 de febrero, desde las 9:50 hasta las 11:30, con el mismo intervalo de tiempo. La tercera medida se llevó a cabo el 6 de febrero, desde las 9:30 hasta las 11:00, y la última medida se tomó el 8 de febrero, con mediciones realizadas desde las 9:00 hasta las 9:30 y luego desde las 12:10 hasta las 17:40, también cada 10 minutos. En todas las gráficas generadas en las Figuras 15, Figura 16, Figura 17 y Figura 18, el valor de referencia de la radiación UV, obtenido del equipo de referencia del parque del Bicentenario, está representado en rojo en el segundo eje Y, permitiendo una fácil comparación con los datos recopilados por los sensores.

Figura 15

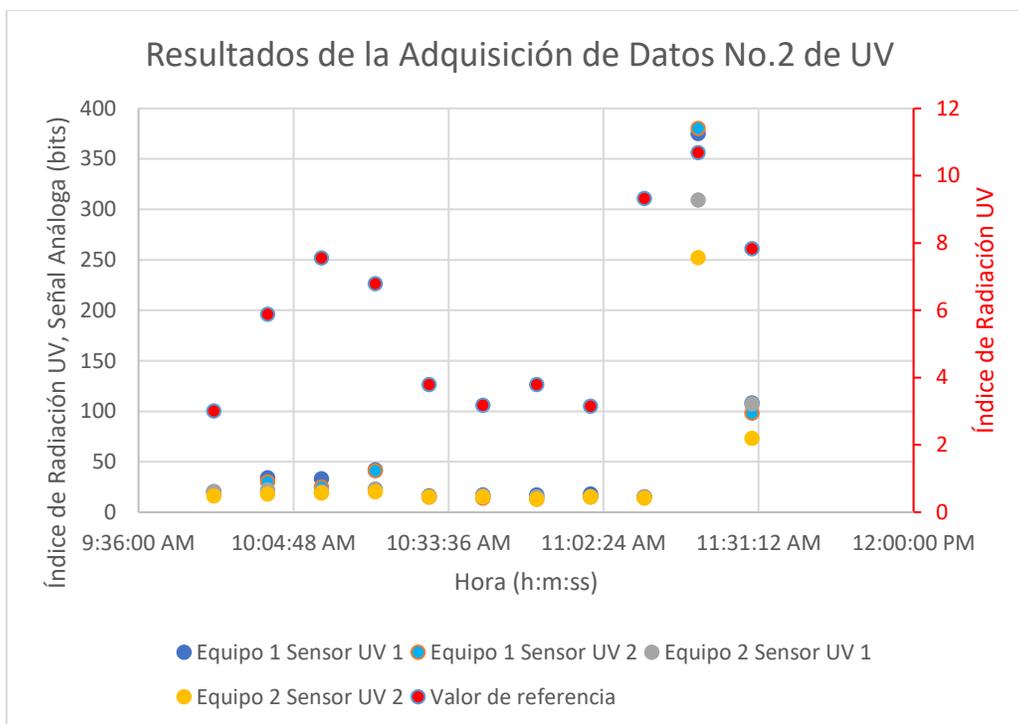
Adquisición de Datos No. 1 de variación de Radiación UV



Nota. En esta prueba se obtuvo 20 datos por cada dispositivo

Figura 16

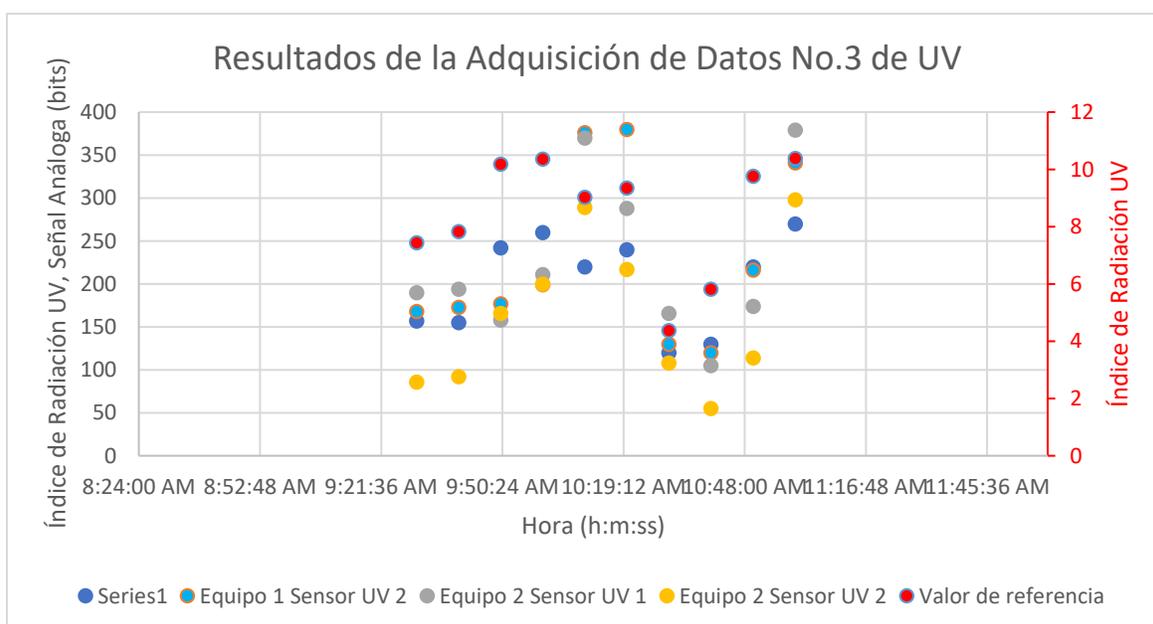
Adquisición de Datos No. 2 de variación de Radiación UV



Nota. En esta prueba se obtuvo 10 datos por cada dispositivo

Figura 17

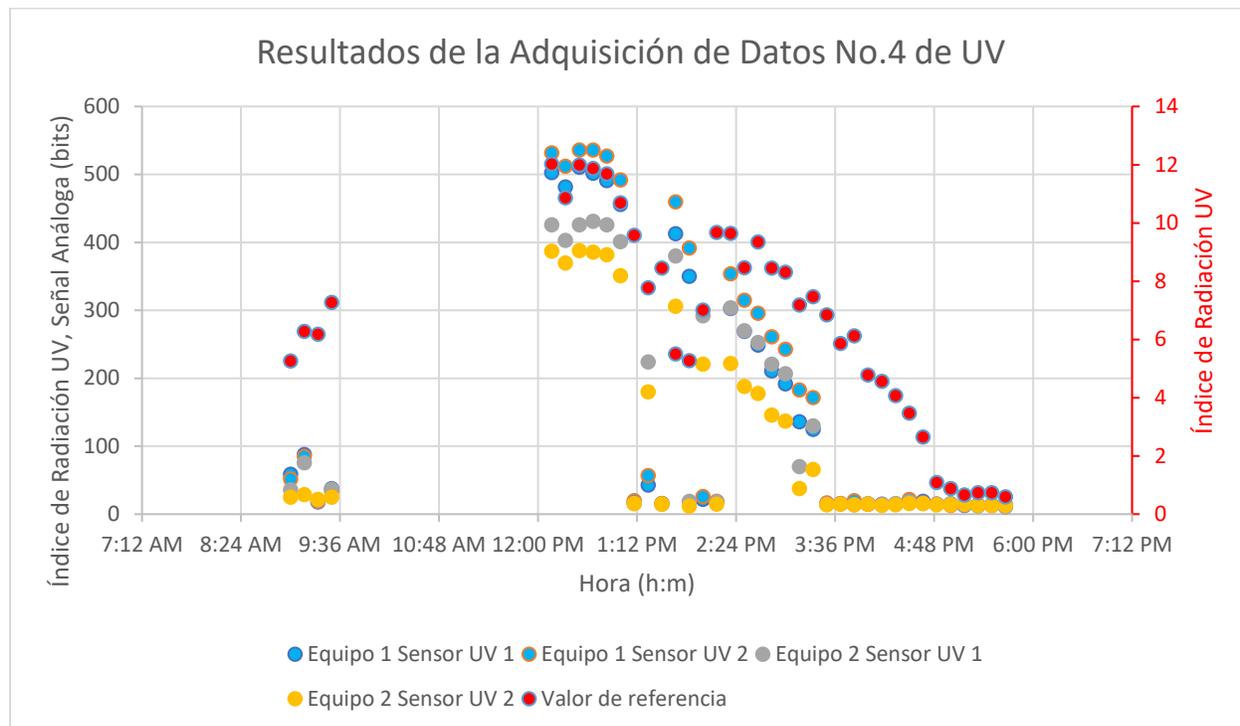
Adquisición de Datos No. 3 de variación de Radiación UV



Nota. En esta prueba se obtuvo 9 datos por cada dispositivo

Figura 18

Adquisición de Datos No. 4 de variación de Radiación UV



Nota. En esta prueba se obtuvo 37 por cada dispositivo

Se llevaron a cabo estas pruebas con el objetivo de recopilar suficientes datos que permitieran realizar la calibración y la transferencia de calibración de los sensores GUVAS12SD. La disponibilidad de un conjunto completo y diverso de datos es fundamental para garantizar la precisión y la fiabilidad de cualquier proceso de calibración. Al abordar una amplia gama de condiciones y escenarios de medición, se asegura que la calibración resultante sea lo más precisa y aplicable posible en una variedad de entornos y situaciones

Procesamiento de Datos

Partición de datos

Una vez recopilados todos los datos de las mediciones, se procedió a unificarlos y a realizar una revisión visual para identificar y eliminar cualquier valor atípico o outlier. Este proceso de eliminación se llevó a cabo con el objetivo de garantizar la fiabilidad y precisión de los datos utilizados en la calibración y la transferencia de calibración de los sensores. Después de este proceso de limpieza de datos se procede a realizar la partición de datos.

Usando la función de Matlab 'cvpartition' se realiza la partición de los datos medidos por cada sensor, junto con sus valores de referencia respectivos. La partición se lleva a cabo de manera no estratificada, dividiendo los datos en un 70% para la calibración y transferencia de calibración, y un 30% para verificar el error presente en estos procesos. Se optó por realizar la partición de los datos de forma no estratificada para asegurar una distribución equitativa de los datos de entrenamiento y prueba. La razón de esta elección radicó en que la estratificación, al dividir los datos en grupos basados en rangos específicos, podría limitar la representación de ciertos rangos en el conjunto de prueba. Al evitar la estratificación, se garantizó una muestra completa y representativa para el conjunto de prueba, lo que mejoró la validez y la robustez de la evaluación del modelo.

Una vez realizada la limpieza de datos se obtuvo 332 datos por dispositivo de temperatura divididos entre 233 datos para entrenar y 99 datos para las pruebas; también se tiene 315 datos por dispositivo para el monóxido de carbono divididos entre 221 datos para entrenar y 94 datos para las pruebas y para la radiación UV se tiene 137 datos por dispositivo divididos entre 96 datos para entrenar y 41 datos para las pruebas.

Transformación de datos

La transformación de los datos de CO del sensor su variable de referencia y los valores de los sensores de UV al logaritmo natural se realiza para mejorar la linealidad en la relación

entre los datos obtenidos por el sensor y los valores de referencia. Esto se debe a que el algoritmo PLS (Partial Least Squares) asume una relación lineal entre las variables independientes y dependientes para encontrar la ecuación de calibración. Sin embargo, el sensor MQ-7 y GUVVA-S12SD tiende a tener una respuesta más exponencial en relación con el valor de referencia. Al transformar los datos al logaritmo natural, se ajusta la distribución de los datos del sensor a una forma más lineal, lo que facilita la aplicación del algoritmo PLS y la obtención de una ecuación de calibración precisa y confiable. De esta manera, se puede lograr una mejor correspondencia entre las mediciones del sensor y los valores de referencia, lo que resulta en una calibración más efectiva y precisa.

Calibración de los Equipos

Para iniciar el proceso de transferencia de calibración, se llevará a cabo la regresión PLS (Partial Least Squares) del Equipo 1, utilizando como variables independientes los valores obtenidos por sus dos sensores para cada variable medida, y como variable dependiente los valores de referencia correspondiente. Se decide hacer uso PLS (Partial Least Squares) debido a la naturaleza de los datos, donde se tienen dos variables independientes (las mediciones de los sensores) y una variable dependiente (los valores de referencia). PLS es adecuado para este tipo de relaciones en las que hay múltiples variables independientes que están altamente correlacionadas entre sí y con la variable dependiente.

Además, para poder de realizar la transferencia de calibración de manera ideal, obtener los coeficientes de regresión, conocidos como valores de Beta y el término de error para establecer la relación entre las mediciones de los sensores y los valores de referencia.

De igual forma se realizará la calibración por PLS del Equipo 2 para comparar los errores de estos con los errores de la transferencia de calibración.

Regresión por Partial Least Squares (PLS)

Para llevar a cabo la calibración y la transferencia de calibración, se hace uso de un programa desarrollado en Python. En este programa, se empleará la función `PLSRegression` de la biblioteca `sklearn.cross_decomposition` para la etapa de calibración, este algoritmo usado se basa en el enfoque de PLS2 (Partial Least Squares 2), que es la variante más comúnmente utilizada de PLS (Pedregosa et al., 2011).

Usando esta función, se busca encontrar los valores de la ecuación de predicción.

$$Y = X * B + E$$

Donde:

- Y es la matriz de variables dependientes (también conocida como variable de respuesta)
- X es la matriz de variables independientes (también conocida como matriz de diseño)
- B es la matriz de coeficientes de regresión
- E es el término de error

Para lo cual se usa la función `PLSRegression` para encontrar el valor de la matriz de coeficientes de regresión y para el error se usa la ecuación:

$$E = \bar{Y} - \bar{X} \cdot B$$

Una vez que se han obtenido los valores para la ecuación de predicción mediante el algoritmo PLS, se procede a realizar el testeo de esta ecuación para evaluar su desempeño. Para ello, se utiliza un conjunto de datos de testeo provenientes del equipo 1, que no se utilizaron durante el proceso de calibración. Se calcula el error cuadrático medio de la raíz (RMSE) entre las predicciones obtenidas con la ecuación de calibración y los valores de referencia proporcionados por el equipo 1 y el valor relativo del error cuadrático medio de la raíz (RRMSE).

Los valores calculados se muestran en la Tabla 5

Tabla 5

Resultados de la regresión por Partial Least Squares del Equipo 1

	Variables independientes	Variables dependientes	Coefficientes de Regresión	Término de Error	RMSE	RRMSE
Temperatura	Sensor 1 de Temperatura Sensor 2 de Temperatura	Valores del Equipo de Referencia de Temperatura	$\begin{bmatrix} -0.218 \\ 1.265 \end{bmatrix}$	-1.025	2.914 °C	6.589%
CO	Sensor 1 de CO Sensor 2 de CO	Valores del Equipo de Referencia de CO	$\begin{bmatrix} -2.553 \\ 7.151 \end{bmatrix}$	-17.965	61.102 PPM	8.123%
UV	Sensor 1 de UV Sensor 2 de UV	Valores del Equipo de Referencia de UV	$\begin{bmatrix} 1.992 \\ 0.613 \end{bmatrix}$	-5.684	1.3325	8.317%

Nota. Estos resultados se obtuvieron con el parámetro de 2 componentes que mantener para la realización del PLS

Se realizó la regresión PLS para el Equipo 2 con el propósito de comparar el Root Mean Square Error (RMSE) y el Relative Root Mean Square Error (RRMSE) con los resultados obtenidos después de completar la transferencia de calibración. Al calcular el RMSE y RRMSE tanto antes como después de la transferencia de calibración, se puede determinar el impacto de este proceso en la capacidad de calibración de los sensores.

Los valores calculados se muestran en la Tabla 6

Tabla 6

Resultados de la regresión por Partial Least Squares del Equipo 2

	Variables independientes	Variables dependientes	Coefficientes de Regresión	Término de Error	RMSE	RRMSE
Temperatura	Sensor 1 de Temperatura Sensor 2 de Temperatura	Valores del Equipo de Referencia de Temperatura	$\begin{bmatrix} 0.478 \\ 0.563 \end{bmatrix}$	-0.607	2.805 °C	6.825%
CO	Sensor 1 de CO Sensor 2 de CO	Valores del Equipo de Referencia de CO	$\begin{bmatrix} -2.938 \\ 6.349 \end{bmatrix}$	-12.644	51.277 PPM	5.398%
UV	Sensor 1 de UV Sensor 2 de UV	Valores del Equipo de Referencia de UV	$\begin{bmatrix} 0.886 \\ 2.062 \end{bmatrix}$	-6.536	0.9382	7.918%

Nota. Estos resultados se obtuvieron con el parámetro de 2 componentes que mantener para la realización del PLS

Como se puede observar en la Tabla 5 y Tabla 6 de resultados, se una diferencia entre los valores de RMSE para la temperatura y el monóxido de carbono (CO). Mientras que los valores de RMSE para la temperatura se sitúan consistentemente por debajo de los 3°C con un RRMSE de aproximadamente 7% para ambos, indicando una precisión satisfactoria en las mediciones de temperatura, los valores de RMSE para el CO son considerablemente mayores, alcanzando los 61 PPM para el equipo 1 y los 51 PPM para el equipo 2. Esta diferencia en los valores de RMSE del CO muestra una mayor variabilidad en las mediciones de este gas, lo cual podría atribuirse a diversos factores, como la sensibilidad del sensor, las condiciones ambientales y la presencia de interferencias, principalmente la sensibilidad del sensor ya que esta es diferente al usado en el equipo de referencia.

No obstante, al analizar el RRMSE, se muestra que a pesar de los valores relativamente superiores de RMSE para el CO, el RRMSE se mantiene en niveles bajos, siendo del 8.123% para el equipo 1 y del 5.398% para el equipo 2. Este porcentaje de desviación relativa indica

que, aunque los valores absolutos de RMSE puedan ser significativos, la discrepancia en relación con el rango de valores observados es relativamente pequeña, lo que sugiere una consistencia en la precisión de las mediciones.

En cuanto al índice de radiación UV, se observa un RMSE de 1.3325 para el equipo 1 y de 0.9382 para el equipo 2. Es importante tener en cuenta que se está midiendo el nivel de radiación solar, donde incluso pequeños cambios pueden tener afectar la salud debido a la exposición a la radiación solar. Aun así, al analizar el RRMSE, que se calcula en un 8.317% para el equipo 1 y 7.918% para el equipo 2, se nota una precisión aceptable en las mediciones de radiación UV, lo que sugiere que los sensores están proporcionando mediciones consistentes y confiables en relación con el valor de referencia.

Teniendo en cuenta estos valores de RMSE y RRMSE, se dice que el método PLS para calibración de estos sensores si es viable para ser aplicada en la transferencia de calibración.

Transferencia de Calibración

La transferencia de calibración se plantea realizarla mediante tres modelos diferentes: Piecewise Direct Standardisation (PDS) basado en PLSR, Spectral Space Transformation(SST) y Unsupervised dynamic orthogonal projection (uDOP). Estos diferentes enfoques se justifican por la necesidad de explorar y comparar distintas técnicas para obtener la transferencia más precisa y efectiva entre los distintos equipos y sensores. Cada modelo tiene ventajas y problemas únicos, lo que permite analizar varios aspectos de la transferencia de calibración y evaluar su desempeño en diversas condiciones. Igualmente, estas tres estrategias presentarían información sobre la efectividad de los algoritmos tradicionales de transferencia de calibración (PDS), y la efectividad de algoritmos más nuevos (SST, uDOP)

El método de piecewise direct standardisation PDS busca calibrar directamente cada parte de los datos siguiendo una ventana que analiza todo el rango del espectro, lo que posibilita ajustar la calibración a las particularidades específicas de cada parte y reducir los

efectos de la variabilidad entre los diferentes dispositivos. El enfoque SST Spectral Space Transformation transforma los datos en un espacio espectral compartido, lo que simplifica la comparación y la transferencia de calibración entre los diversos equipos, principalmente cuando tienen diferencias notables los sensores en sus características espectrales (Chu et al., 2022). Por último, el método de Unsupervised dynamic orthogonal projection (uDOP) se basa en proyectar los datos en un espacio ortogonal en constante cambio, lo que posibilita identificar patrones y estructuras subyacentes en los datos sin necesidad de tener información previa sobre las clases o categorías de estos (Fonseca Diaz et al., 2022).

Se calcula los valores de RMSE y RRMSE para las tres estrategias de transferencia de calibración, utilizando diferentes parámetros en cada una para observar cual de estas estrategias sería la mejor para la calibración vía transferencia de calibración de cada uno de estos sensores.

Para la transferencia de calibración, se utilizó la librería caltransfer, que incluye los algoritmos necesarios para las tres estrategias que se van a emplear. Esta librería facilita la obtención de los valores necesarios para llevar a cabo la transferencia de calibración de un equipo a otro. Para utilizar estos métodos, solo se requiere la matriz espectro del equipo esclavo y del equipo maestro, los valores de coeficiente de regresión y término de error del equipo maestro, junto con los parámetros que los algoritmos utilizarán para realizar los cálculos.

Teniendo en cuenta que el método PDS y el método SST entrega una matriz de estandarización y un offset, mientras que el uDOP entrega una matriz de ortogonalización, una vez obtenido estos valores se usan el coeficiente de regresión y el término de error previamente calculados en la calibración por PLS del Equipo 1 para encontrar los nuevos parámetros de calibración coeficientes de regresión y término de error para el Equipo 2.

Resultados de Calibración por Transferencia de Calibración

Se generó una tabla con los valores de Error Cuadrático Medio (RMSE) y Error Cuadrático Medio Relativo (RRMSE) después de realizar la transferencia de calibración al equipo 2. Para esto, se utilizaron las matrices espectrales de los datos de los sensores del equipo 1 y del equipo 2, separadas específicamente para este propósito. Posteriormente, utilizando los datos de prueba, se calculó el RMSE y RRMSE con los valores obtenidos de la transferencia de calibración y se compararon con los valores de referencia.

Tabla 7

Errores calculados de las transferencias de calibración

Tipo de Transferencia	Parámetros	Temperatura		CO PPM		Índice UV	
		RMSE Test 2 (°C)	RRMS E Test 2 (%)	RMSE Train 2 (PPM)	RRMS E Test 2 (%)	RMSE Train 2 (Índice)	RRMS E Test 2 (%)
Piecewise Direct standardization (PDS, DS)	Ancho de ventana: 3 Número de variables latentes para los modelos PLSR: 2	2.831	6.888	61.103	6.432	1.194	10.072
	Ancho de ventana: 3 Número de variables latentes para los modelos PLSR: 1	2.802	6.819	101.425	10.676	1.192	10.057
	Ancho de ventana: 1 Número de variables latentes para los modelos PLSR: 2	2.996	7.290	46.573	4.902	1.211	10.219
	Ancho de ventana: 1 Número de variables latentes para	2.996	7.290	46.573	4.902	1.211	10.219

Tipo de Transferencia	Parámetros	Temperatura		CO PPM		Índice UV	
		RMSE Test 2 (°C)	RRMS E Test 2 (%)	RMSE Train 2 (PPM)	RRMS E Test 2 (%)	RMSE Train 2 (Índice)	RRMS E Test 2 (%)
	los modelos PLSR: 1						
Spectral Space Transformation (SST)	Número de componentes principales: 0	3.089	7.516	150.659	15.859	1.052	8.881
	Número de componentes principales: 1	3.031	7.374	51.130	5.382	1.015	8.564
	Número de componentes principales: 2	10.130	24.647	102.945	10.836	90.450	763.288
	Número de componentes principales: 3	12.903	31.395	247.996	26.105	4.048	34.157
	Número de componentes principales: 4	13.473	32.780	271.250	28.553	4.108	34.667
Unsupervised dynamic orthogonal projection (uDOP)	Número de componentes DOP a eliminar: 1 Número de componentes para SVD: 20	2.793	6.796	381.728	40.182	1.136	9.590
	Número de componentes DOP a eliminar: 2 Número de componentes para SVD: 20	3.097	7.535	1616.32	170.14	1.103	9.306
	Número de componentes DOP a eliminar: 0 Número de componentes para SVD: 20	3.097	7.535	1616.32	170.14	1.103	9.306
	Número de componentes DOP a eliminar: 1 Número de	3.389	8.245	381.060	40.112	47.760	403.03

Tipo de Transferencia	Parámetros	Temperatura		CO PPM		Índice UV	
		RMSE Test 2 (°C)	RRMS E Test 2 (%)	RMSE Train 2 (PPM)	RRMS E Test 2 (%)	RMSE Train 2 (Índice)	RRMS E Test 2 (%)
	componentes para SVD: 1						
	Número de componentes DOP a eliminar: 1 Número de componentes para SVD: 0	9.694	23.586	288.806	30.401	6.506	54.903

Nota. Estos datos fueron calculados usando los datos separados para las pruebas del Equipo 2, que serían 99 datos para la temperatura, 94 para el monóxido de carbono y 41 para el índice de radiación UV

Al analizar los resultados de la Tabla 7, se observa que la estrategia de transferencia de calibración que ofrece el menor error RMSE y RRMSE para los sensores de temperatura del Equipo 2 es la estrategia uDOP con 1 componente a eliminar y 20 para el Singular Value Decomposition (SVD). Esta estrategia produce un RMSE de 2.793 °C y un RRMSE DE 6.796%, que es menor por 0.029% que los errores calculados por el método de calibración PLS, que fue de RMSE 2.805 °C y RRMSE de 6.825%.

Para los sensores de CO del Equipo 2, se encontró que el método de transferencia de calibración con menor error fue PDS con un ancho de ventana de 1 y 2 variables latentes para el modelo PLSR. Este método registró un RMSE de 46.573 PPM y un RRMSE de 4.902%, valores menores por 0.49% en comparación con el RRMSE del método de calibración tradicional PLS, que fue de 5.398%.

En cuanto a los sensores de radiación UV del Equipo 2, se observa que la mejor estrategia de calibración es el método SST, que produjo un RRMSE de 8.564 % y un RMSE de 1.015 para el índice de radiación UV. Aunque este RRMSE es ligeramente superior por 0.643%

al valor de calibración por el método PLS (7.918%), la diferencia en el error es menor al 1%, lo que indica que la estrategia SST sigue siendo viable para la calibración de estos sensores.

Para aplicar una sola estrategia general de transferencia de calibración, se puede optar por SST con un parámetro de número de componentes de 1, ya que presenta un error bajo en la calibración de todos los sensores siendo el RRMSE más grande entre las tres variables de 8.564 % en radiación UV en comparación con el error presentado por el método de calibración PLS de 7.918%. Alternativamente, la estrategia PDS con un ancho de ventana de 1 y 2 variables latentes también presenta el RRMSE más grande entre las tres variables de 10.219% en radiación UV en comparación con el error, presentado por el método de calibración PLS de 7.918%.

Estos resultados indican que es posible realizar la calibración de estos sensores medioambientales a través de la transferencia de calibración de utilizando diversas estrategias existentes. Estas estrategias proporcionarían una diferencia de error mínima en comparación con la calibración mediante métodos más tradicionales, que implicarían un mayor consumo de tiempo y recursos financieros.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Se llevó a cabo un análisis comparativo de tres estrategias de transferencia de calibración: Piecewise Direct Standardization (PDS), Spectral Space Transformation (SST) y Unsupervised Dynamic Orthogonal Projection (uDOP), para calibrar los sensores de dos equipos gemelos. Estos equipos se sometieron a condiciones controladas para medir la temperatura y la concentración de CO en partes por millón mientras que la radiación UV se obtuvo naturalmente proveniente del sol. Los resultados se compararon con los obtenidos mediante el método de calibración multivariable, Partial Least Squares Regression (PLS). El análisis de los errores de estas estrategias demuestra la viabilidad de la transferencia de

calibración para los sensores de variables medioambientales DS18B20, MQ-7 y GUVA-S12SD, evidenciando mejoras en la precisión de la calibración, como se observa en los resultados donde se logró reducir el RRMSE en un 0.029% para la temperatura mediante uDOP, en un 0.49% para la concentración de CO mediante PDS, y se obtuvo un aumento de error no muy significativo de 0.643% para la radiación UV mediante SST, en comparación con los errores calculados por el método PLS.

Se completo el diseño e implementación de dos equipos de medición de variables medioambientales, incluyendo temperatura, PPM de CO y radiación UV. Estos equipos gemelos fueron construidos utilizando sensores medioambientales capaces de detectar y registrar estas variables de manera precisa. El análisis realizado demostró que los sensores usados son adecuados para capturar datos relevantes, los cuales son fundamentales para llevar a cabo la calibración de los sensores de los equipos gemelos en función de los equipos de referencia y tras las pruebas para la adquisición de datos en ambientes, donde se cambió a estas variables dentro de los rangos establecidos en ambientes controlados, se notó el funcionamiento de ambos equipos, junto a una respuesta equivalente a la obtenida por los equipos de referencia

Se ejecutó la calibración de los equipos 1 y 2 utilizando el método Partial Least Squares Regression (PLS), después de realizar la partición de los datos de los sensores y los valores de referencia. Se calcularon la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Error Relativo de la Raíz del Error Cuadrático Medio (RRMSE) para evaluar la precisión de las mediciones. Se observó que ambos equipos mostraron valores de RMSE para los sensores de CO de 61.102 PPM y 51.277 PPM respectivamente y los sensores de radiación UV de 1.3325 y 0.9382 de índice de radiación UV, posiblemente atribuibles a diferencias en la sensibilidad entre los sensores y el equipo de referencia o a la estrategia de adquisición de datos usada. Sin embargo, los errores relativos de 8.123% y 5.3298% para los sensores de CO y 8.317% y 7.918% para los sensores de radiación UV, indican una precisión consistente en las

mediciones, lo que sugiere una pequeña discrepancia en relación con el rango de mediciones realizadas. En resumen, los resultados respaldan la fiabilidad y precisión de los equipos de medición una vez realizada la calibración mediante PLS.

Después de llevar a cabo la transferencia de calibración y calcular los errores con los datos de prueba, se pudo determinar la viabilidad de los métodos Piecewise Direct Standardization (PDS), Spectral Space Transformation (SST) y Unsupervised Dynamic Orthogonal Projection (uDOP) para la calibración de estos sensores. Se observó que, dependiendo de los parámetros utilizados en cada estrategia, se obtuvieron errores comparables o incluso inferiores a los obtenidos mediante el método de calibración multivariable común PLS. Si se busca encontrar una sola estrategia de transferencia de calibración para aplicar a todos los sensores, y no tener un gran aumento de error en comparación con el método PLS se recomienda el método SST con el parámetro “número de componentes” de 1, ya que el RRMSE más grande entre las tres variables es de 8.564% en el índice de radiación UV, en comparación con el error del método PLS, que es del 7.918%, con un aumento solo de 0.646%. Por otro lado, la estrategia PDS con parámetros de “ancho de ventana” de 1 y 2 variables latentes también puede ser recomendada con el RRMSE más grande entre las tres variables, con un 10.219% en radiación UV, en comparación con el error presentado por el método de calibración PLS, que es de 7.918% con un aumento de error de 2.301%. Lo que muestra la viabilidad de estas estrategias, que al aplicarse en la calibración de sensores de medición de variables medioambientales podría resultar en ahorros significativos tanto en tiempo como en costos asociados con la calibración tradicional multivariable.

Recomendaciones

Se recomienda verificar que los sensores adquiridos hayan sido manufacturados por la misma compañía y que sean idénticos. En caso contrario, los equipos no podrían considerarse gemelos y la transferencia de calibración no sería tan efectiva.

Es importante recordar que estos equipos están destinados a la monitorización medioambiental. Por lo tanto, al variar las variables ambientales, como la temperatura, se deben simular condiciones naturales de forma adecuada. Por ejemplo, para alterar la temperatura medida por los sensores, se deben utilizar métodos que imiten los cambios ambientales reales, en lugar de exponer los sensores directamente a agua fría o caliente.

Para obtener mediciones precisas de CO, se recomienda utilizar carbón para incrementar gradualmente las partes por millón (PPM) en el entorno controlado. A diferencia del humo de cigarrillo u otras fuentes de CO, el carbón permite un aumento más controlado de las concentraciones de CO, lo que facilita la obtención de datos suficientes para la calibración sin exceder los límites del equipo de referencia.

Para la adquisición óptima de datos de CO, se sugiere el uso de un compresor de monóxido de carbono, lo que garantiza una distribución uniforme del gas en el entorno controlado y una mayor precisión en las mediciones.

Para una calibración más precisa de los sensores UV, se recomienda utilizar espectrorradiómetros UV de baja luz rasante como dispositivos de referencia y lámparas ultravioleta para simular variaciones en la radiación UV.

Se debe tener en cuenta que los errores calculados no son absolutos y pueden variar según la muestra obtenida para la realización de pruebas

Referencias.

- A conceptual explanation of PLS — Process Improvement using Data.* (n.d.). Retrieved February 13, 2024, from <https://learnche.org/pid/latent-variable-modelling/projection-to-latent-structures/conceptual-mathematical-and-geometric-interpretation-of-pls>
- Abdel Baset, Y., Hamed, S., Reda, S., Farag, H., Ghany, H. A. A., & Faramawy, S. (2023). Design and metrological studies of a reference UV- index detector. *Physica Scripta*, 98(4). <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acc288>
- Anderson Douglas, Keith Jeff, Novak Patricia, & Elliot Michelle. (2003). *Diccionario Mosby: medicina, enfermería y ciencias de la salud.* Elsevier Science.
- Aranda, V., Velasco, N., Aranda, G., Medrano, S., & Gutierrez, N. (2006). MÉTODO DE CALIBRACIÓN POR TRANSFERENCIA, VALIDACIÓN E INCERTIDUMBRE. *La Guía Metas #12.*
- Arduino® Nano. (n.d.). Retrieved February 9, 2024, from <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf>
- Bolaños Morera, P., & Chacón Araya, C. (2017). REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA INTOXICACION POR MONOXIDO DE CARBONO. *Medicina Legal de Costa Rica*, 34(1).
- Braudaway, D. W. (2003). The costs of calibration. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 52(3), 738–741. <https://doi.org/10.1109/TIM.2003.814704>
- Çengel, Y., & Boles, M. (2015). *Termodinamica* (8va ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- CHNADKS - Detector de gas Manual de Usuario. (n.d.).
- Chu, X., Huang, Y., Yun, Y. H., & Bian, X. (2022). Chemometric Methods in Analytical Spectroscopy Technology. In *Chemometric Methods in Analytical Spectroscopy Technology*. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-1625-0>
- Dallas. (n.d.). *DS18B20 DALLAS*. Retrieved February 9, 2024, from www.dalsemi.com

Diffey, B. L. (2002). Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*, 28(1).

[https://doi.org/10.1016/S1046-2023\(02\)00204-9](https://doi.org/10.1016/S1046-2023(02)00204-9)

El solmáforo identifica el nivel de radiación solar en dos parques metropolitanos. (n.d.).

Retrieved February 11, 2024, from [https://www.quitoinforma.gob.ec/2022/09/26/el-](https://www.quitoinforma.gob.ec/2022/09/26/el-solmaforo-identifica-el-nivel-de-radiacion-solar-en-dos-parques-metropolitanos/)

[solmaforo-identifica-el-nivel-de-radiacion-solar-en-dos-parques-metropolitanos/](https://www.quitoinforma.gob.ec/2022/09/26/el-solmaforo-identifica-el-nivel-de-radiacion-solar-en-dos-parques-metropolitanos/)

ESP32 Series Datasheet 2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth® + Bluetooth LE SoC Including. (2023).

www.espressif.com

Estudios, D. DE, & Desarrollo Hidrometeorológico, I. Y. (2022). 2022 * 11-20 / SEPTIEMBRE

ESTADÍSTICA AGROCLIMÁTICA DECADAL.

ETC. (n.d.). *DHT11 Humidity & Temperature Sensor.* Retrieved February 9, 2024, from

<https://html.alldatasheet.es/html-pdf/1440068/ETC/DHT11/596/9/DHT11.html>

ETC2. (n.d.). *MICS-5131.* Retrieved February 9, 2024, from [https://html.alldatasheet.es/html-](https://html.alldatasheet.es/html-pdf/228057/ETC2/MICS-5131/98/1/MICS-5131.html)

[pdf/228057/ETC2/MICS-5131/98/1/MICS-5131.html](https://html.alldatasheet.es/html-pdf/228057/ETC2/MICS-5131/98/1/MICS-5131.html)

Fonollosa, J., Fernández, L., Gutiérrez-Gálvez, A., Huerta, R., & Marco, S. (2016). Calibration

transfer and drift counteraction in chemical sensor arrays using Direct Standardization.

Sensors and Actuators, B: Chemical, 236. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.05.089>

Fonseca Diaz, V., Roger, J. M., & Saeys, W. (2022). Unsupervised dynamic orthogonal

projection. An efficient approach to calibration transfer without standard samples. *Analytica*

Chimica Acta, 1225, 340154. <https://doi.org/10.1016/J.ACA.2022.340154>

HANWEI. (n.d.). *MQ-7.* <http://www.hwsensor.com>

Hanwei Electronics. (n.d.). *MQ-9 Semiconductor Sensor for CO/Combustible Gas.*

www.hwsensor.com

HANWEI ELECTRONICS. (n.d.). *MQ-135.* <http://www.hwsensor.com>

ÍNDICE ULTRAVIOLETA (IUUV) Distrito Metropolitano de Quito. (n.d.). Retrieved January 14,

2024, from <https://iuv.quito.gob.ec/>

- LAPIS. (2013). *ML8511-00FC*. <https://html.alldatasheet.es/html-pdf/537994/ETC2/ML8511-00FC/100/1/ML8511-00FC.html>
- Liu, T. (n.d.). *Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22*. Retrieved February 9, 2024, from <https://html.alldatasheet.es/html-pdf/1132459/ETC2/DHT22/109/1/DHT22.html>
- M2000 Series Air Quality Monitor User Manual*. (n.d.). Retrieved February 9, 2024, from <https://manuals.plus/temtop/m2000-series-air-quality-monitor-manual>
- NIOSH. (1996). *Prevención de envenenamiento con monóxido de carbono producido por herramientas y equipos con motores pequeños de gasolina*. https://www.cdc.gov/spanish/niosh/docs/96-118_sp/default.html
- Parra, R., Cadena, E., & Flores, C. (2019). Maximum UV Index Records (2010–2014) in Quito (Ecuador) and Its Trend Inferred from Remote Sensing Data (1979–2018). *Atmosphere* 2019, Vol. 10, Page 787, 10(12), 787. <https://doi.org/10.3390/ATMOS10120787>
- Pedregosa, F., Michel, V., Grisel OLIVIERGRISEL, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Vanderplas, J., Cournapeau, D., Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Thirion, B., Grisel, O., Dubourg, V., Passos, A., Brucher, M., Perrot and Édouardand, M., Duchesnay, and Édouard, & Duchesnay EDOUARD DUCHESNAY, Fré. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python Gaël Varoquaux Bertrand Thirion Vincent Dubourg Alexandre Passos PEDREGOSA, VAROQUAUX, GRAMFORT ET AL. Matthieu Perrot. In *Journal of Machine Learning Research* (Vol. 12). <http://scikit-learn.sourceforge.net>.
- Pham, T. A., Dinh, T., Nguyen, N., & Phan, H. (2022). Wide Bandgap Nanowires. *Wide Bandgap Nanowires*. <https://doi.org/10.1002/9781119774419>
- Platt Charles, & Fredrik Jansson. (2016). *Encyclopedia of electronics components Volume 3* (1st ed., Vol. 3). Maker Media.
- Raspberry Pi Zero*. (n.d.). <https://learn.adafruit.com/introducing-the-raspberry-pi-zero>

Roithner LaserTechnick. (2011). *GUVA-S12SD UV-B*. <https://html.alldatasheet.es/html-pdf/712047/ROITHNER/GUVA-S12SD/387/1/GUVA-S12SD.html>

Texas Instruments. (1999). *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*. www.ti.com

Vishay. (n.d.). *UVA and UVB Light Sensor with I 2 C Interface*. www.vishay.com/doc?91000

Wiltronics. (n.d.). *UV Detection Sensor*. www.wiltronics.com.auPhone: