

RONNA

JULIO
2024

Metrología fundamental y aplicada

Volumen 2 | Ejemplar 2 | Primer semestre 2024



LABORATORIO
COSTARRICENSE
DE METROLOGÍA

GOBIERNO
DE COSTA RICA

www.cetm.gov.cr

Revista Ronna

Volumen 1. Ejemplar 1. Primer semestre de 2024.

Imágen de portada: Elaboración propia - Laboratorio Costarricense de Metrología

Índice de contenidos

Editorial.....	2
Apreciación con respecto al JCGM GUM-1:2023 Guía para la expresión de la incertidumbre de medida – Parte 1: Introducción.....	3
Diseño de un medidor de presión diferencial con componentes digitales para el Laboratorio Costarricense de Metrología.....	7

Editorial

El pasado 20 de mayo del 2024 se celebraron 149 años de la firma de la Convención del Metro y fundación del Buró Internacional de Pesas Y Medidas (BIPM). Durante todo este tiempo, la metrología ha evolucionado, adaptándose a los cambios tecnológicos y sociales que han revolucionado la forma en la que se brinda la trazabilidad y se define la competencia técnica. Hoy en día, la organización se ha planteado la pregunta: “¿Cómo va a ser la metrología en 50 años?” y ha desarrollado un proyecto para involucrar a los “Jóvenes Metrólogos”, aquellos que participaran de la construcción de la metrología de cara a los 200 años de la firma de la Convención del Metro.

Mucho se está comentando y desarrollando en temas de digitalización, tecnología cuántica, y el uso de inteligencia artificial entre otros temas que tendrán un impacto en la redefinición del SI, la realización de calibraciones, la realización de comparaciones internacionales (ensayos de aptitud), el intercambio de información entre otros. En esta corta edición presentamos 2 artículos que sirven como ejemplo de esos cambios que se están dando. El primero, de carácter informativo, sobre los cambios y actualizaciones que se están realizando a la Guía de Estimación de Incertidumbre de Medida (GUM). El segundo es un artículo sobre una aplicación de la digitalización en la metrología para la medición de presiones absolutas y diferenciales en sistemas de calibración de sensores de punto de rocío o escarcha y sensores de humedad relativa. Espero que estos artículos sean de su agrado.



Fernando J. Andrés Monge / *Director General*
LACOMET

Apreciación con respecto al JCGM GUM-1:2023 Guía para la expresión de la incertidumbre de medida – Parte 1: Introducción

Francisco Sequeira-Castro. Profesional del Departamento de Metrología Física, LACOMET, Costa Rica. Email: fsequeira@lcm.go.cr

Palabras clave:

Resumen

El Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) realiza la coordinación técnica para el cumplimiento de sus funciones a través de la creación de comités consultivos (CC) asociados al Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) y del Comité Conjunto para las Guías en Metrología (JCGM). En este último caso, el JCGM tiene como misión mantener y promover el uso de la *Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM)* y el *Vocabulario Internacional de Metrología – Conceptos Básicos y Generales y Términos Asociados (VIM)*. En el caso de la GUM, el JCGM trabaja bajo la coordinación del Grupo de Trabajo 1 (WG1). El WG1 también se encarga de ampliar los alcances de GUM mediante la producción de documentos complementarios que cubren los temas relacionados en mayor detalle y que permiten, bajo una nueva perspectiva, redefinir GUM como el conglomerado de guías, que incluyen JCGM 100:2008 y el resto que la complementan. El propósito del artículo es explicar la nueva perspectiva del JCGM-WG1 y el contexto, así como presentar los cambios mayores presentes en el documento JCGM GUM-1:2023.

1. Contexto

El JCGM se crea en 1997 y tiene como responsabilidad revisar y actualizar la *Guía para la expresión de la Incertidumbre de Medida*. En el 2008, el JCGM- WG1 publica el JCGM 100:2008 *Guía para la expresión de la Incertidumbre de Medida*, que corresponde a una versión revisada y con correcciones menores de la guía modificada, publicada en 1995. Un año más tarde, se publica el JCGM 104:2009 *Evaluación de los Datos de Medida -Una introducción a la “Guía para la expresión de la Incertidumbre de Medida” y documentos relacionados*, cuyo propósito era promover la evaluación de la incertidumbre de medida a través del uso de la GUM y proveer una introducción a los suplementos a la GUM y a otros documentos, ayudando con

la interpretación de la GUM y la mejora de su aplicación.

En 2017, el JCGM- WG1 cambia el nombre de los documentos que había generado hasta entonces, con el fin de cambiar la perspectiva de que GUM no corresponde únicamente al JCGM 100:2008, si no que abarca el conglomerado de documentos totales producidos por el WG1. El conglomerado *per se*, tiene como alcance la evaluación y la expresión de la incertidumbre de medida, así como su aplicación en ciencia, para intercambio comercial, la salud, la seguridad y otras actividades. Como parte de las actividades para el cambio de perspectiva planteado, surge la necesidad de reemplazar el JCGM 104:2009 por JCGM GUM-1:2023.

El documento JCGM GUM-1:2023 es la introducción a la GUM como compilado de

documentos, preparados con el propósito del tratamiento de la incertidumbre de medida. A criterio del autor, es una versión más corta, simple y clara que la anterior JCGM 104:2009, por lo que es más comprensible como documento introductorio, además de que es accesible a usuarios menos experimentados en temas de metrología. También, al incluir un indicador numérico en la codificación del documento, es más intuitivo con respecto al orden de consulta.

Como complemento, se incluye la descripción del contenido de la sección 4 y 5 del documento que corresponde al cambio más sustancial entre versiones; además de la transcripción del resumen de la GUM tomado del anexo A, que relaciona el nuevo contexto de GUM con las referencias y las guías originales.

CUADRO I

Resumen del proceso de evaluación de la incertidumbre y las componentes de la nueva GUM descritas en las secciones 4 y 5 respectivamente de JCGM GUM-1:2023.

Proceso de evaluación de la incertidumbre	Aspectos incluidos en GUM
Pondera el conocimiento, la experiencia y el pensamiento crítico.	Uso de la ley de propagación de la incertidumbre.
Especifica que el método debe ser adecuado al uso.	Evaluación de la conformidad.
Indica los resultados de salida esperados.	Desarrollo de modelos de medición.
Indica la información de entrada requerida.	Propagación de distribuciones.
Dependencia de la selección de método de evaluación con respecto a la información disponible.	Extensión a cualquier cantidad de magnitudes de salida.
Pondera el esfuerzo de cálculo contra el resultado de salida.	

CUADRO II

Anexo A de la JCGM GUM-1 en español: Nueva perspectiva del compendio GUM.

Parte de la GUM	Referencia vieja	Título
JCGM GUM-1 ¹	JCGM 104	Guía para la expresión de la incertidumbre de medida – Parte 1: Introducción
JCGM GUM-2 ²		Guía para la expresión de la incertidumbre de medida – Parte 2: Conceptos
JCGM GUM-3 ³	JCGM 100	Guía para la expresión de la incertidumbre de medida – Parte 3: GUM:1995 con correcciones menores
JCGM GUM-4 ⁴	JCGM 106	Guía para la expresión de la incertidumbre de medida – Parte 4: El papel de la incertidumbre de medida en la evaluación de la conformidad
JCGM GUM-5 ⁵	JCGM 110 ⁶	Guía para la expresión de la incertidumbre de medida – Parte 5: Ejemplos
JCGM GUM-6 ⁷	JCGM 103 ⁸	Guía para la expresión de la incertidumbre de medida – Parte 6: Desarrollo y uso de modelos de medición
JCGM GUM-7 ⁹	JCGM 101	Guía para la expresión de la incertidumbre de medida – Parte 7: Propagación de distribuciones usando el método de Monte Carlo
JCGM GUM-8 ¹⁰	JCGM 102	Guía para la expresión de la incertidumbre de medida – Parte 8: Extensión a cualquier cantidad de magnitudes de salida
JCGM GUM-9 ¹¹		Guía para la expresión de la incertidumbre de medida – Parte 9: Modelos estadísticos y análisis de datos para estudios interlaboratoriales

¹ JCGM 104:2009 fue reemplazado por este documento

² Planeado

³ Disponible como JCGM 100:2008

⁴ Disponible como JCGM 106:2012

⁵ Planeado

⁶ Referencia del borrador del comité

⁷ Disponible como JCGM GUM-6:2020

⁸ Referencia del borrador del comité

⁹ Disponible como JCGM 101:2008

¹⁰ Disponible como JCGM 102:2011

¹¹ Planeado

JCGM GUM-10 ¹²	Guía para la expresión de la incertidumbre de medida – Parte 10: Aplicaciones del método de mínimos cuadrados
JCGM GUM-11 ¹³	Guía para la expresión de la incertidumbre de medida – Parte 11: Métodos Bayesianos
JCGM GUM-12 ¹⁴	Guía para la expresión de la incertidumbre de medida – Parte 12: Métodos básicos para la propagación de la incertidumbre

2. Referencias

- [1] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 100:2008. URL: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf.
- [2] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM). Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 200:2012. (3rd edition). URL: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200_2012.pdf.
- [3] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Evaluation of measurement data – An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM 104:2009. URL: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_104_2009.pdf/19e0a96c-6cf3-a056-4634-4465c576e513.
- [4] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML. Guide to the expression of uncertainty in measurement – Part 1: Introduction. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM GUM-1:2023.

¹² Planeado

¹³ Planeado

¹⁴ Planeado

Diseño de un medidor de presión diferencial con componentes digitales para el Laboratorio Costarricense de Metrología.

Mauricio Brenes-Siles¹⁵. *Área Académica de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Email: jmbrenes@outlook.com*

Carolina Herrera-Ruiz. *Profesional del Departamento de Metrología Física, LACOMET, Costa Rica. Email: cherrera@lcm.go.cr*

Resumen

Se presenta el diseño de un medidor de presión diferencial para satisfacer las necesidades del Laboratorio de Humedad Relativa del Departamento de Metrología Física del Laboratorio Costarricense de Metrología. El proceso de diseño abarca desde la identificación de necesidades del cliente hasta la elaboración y validación de un prototipo funcional. Los sensores utilizados (BME/P 280) son capaces de medir, aparte de la presión atmosférica, la humedad relativa y la temperatura ambiental. El dispositivo tiene la capacidad de almacenar la información en una base de datos y una memoria extraíble, también puede funcionar localmente haciendo uso únicamente de la memoria. Implementa internet de las cosas mediante una interfaz digital que permite realizar configuraciones personalizadas para la adquisición de datos, así como la consulta y descarga de la información almacenada en la base de datos de manera remota. Mediante una serie de pruebas se validó el correcto funcionamiento del prototipo funcional. Este proyecto aporta innovación a la comunidad metrológica mediante la fusión de internet de las cosas con la metrología, agilizando los procesos del Laboratorio de Humedad Relativa del Departamento de Metrología Física del Laboratorio Costarricense de Metrología a bajo costo; alineado igualmente a las tendencias de transformación digital y nuevos servicios digitales en la comunidad metrológica mundial.

Palabras clave: Internet de las cosas, metrología, microcontrolador ESP32, dotnet, presión diferencial.

¹⁵ Autor principal
REVISTA RONNA

1.Introducción y generalidades

De acuerdo a la capacidad instalada del laboratorio de humedad relativa del LACOMET, el sensor de temperatura de punto de rocío ($t > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$) y/o temperatura de escarcha ($t < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$), según corresponda, de los espejos enfriados que se utilizan como patrón durante las calibraciones de instrumentos que miden o registran la humedad relativa, no se puede colocar dentro de la cámara con condiciones controladas donde se tienen los instrumentos de control y los equipos sujetos a calibración. Por otro lado, se tienen diferencias de presión asociadas a las pérdidas en las tuberías por fricción y/o debidas a las eventuales diferencias de altura entre la toma de las mediciones de la presión en la cámara de condiciones controladas y el punto de medición en el espejo enfriado, por lo que estas diferencias necesitan ser cuantificadas. Adicionalmente, en vista de que en el laboratorio se utilizan las ecuaciones de la presión de vapor establecidas en la ITS90 [1] para asignar el valor de referencia en la magnitud de humedad relativa, para las calibraciones que se realizan empleando como patrón un espejo enfriado, en pro del aseguramiento de la validez de los resultados, es de especial importancia que el laboratorio de humedad relativa cuente con trazabilidad al Sistema Internacional de Unidades (SI), no sólo para las magnitudes de temperatura ambiental y temperatura de punto de rocío y/o temperatura de punto de escarcha, según corresponda, sino que además, se requiere trazabilidad al SI, para las mediciones realizadas en la magnitud de presión.

Según se describe en la Directriz DKD-R-5-8, para la calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa [2], y específicamente para los higrómetros de punto de rocío se tiene que, el valor de referencia de la humedad relativa se obtiene de la siguiente relación:

$$HR = e(td, f)f(p, td, f)/e(t)f(pt)$$

Donde, $e(td, f)$ y $e(t)$, son respectivamente las presiones de vapor a la temperatura de punto de rocío y/o temperatura de punto de escarcha, y a la temperatura ambiental de la muestra [1]; mientras que, $f(p, td, f)$ y $f(p, t)$, son respectivamente los factores de mejora a la presión y temperatura de punto de rocío y/o temperatura de punto de escarcha y el factor de mejora a la presión y temperatura ambiental [1].

Por lo antes descrito, en el laboratorio de humedad relativa del LACOMET, se detectó la necesidad de agilizar la metodología de monitoreo y registro de datos de presión diferencial durante las calibraciones para así optimizar el uso del tiempo en las actividades cotidianas. El equipamiento que cumple esta función en el laboratorio de humedad relativa es: el barómetro del registrador de condiciones ambientales VAISALA PTU300 [3], el sensor de presión del espejo enfriado RH973[CH1] y el módulo de presión absoluta Fluke 750PA5 [4], los cuales se calibran internamente en el LACOMET y ofrecen diferentes métodos de adquisición de datos sin ningún tipo de respaldo adicional. Los equipos comercialmente disponibles en el mercado que puedan cumplir esta función y mejorar la metodología actual son limitados y costosos. Por tanto, el laboratorio requiere de medidores de presión diferencial que incorporen componentes de la transformación digital que permitan agilizar el monitoreo y registro de datos durante la prestación de servicios de calibración, monitoreo de las condiciones ambientales del laboratorio (acorde a los requisitos de la versión vigente de la norma INTE/ISO/IEC 17025) y/o para la caracterización de cámaras climáticas.

Para establecer y priorizar las características técnicas y funcionales de diseño de la primera versión de un dispositivo innovador, de bajo costo, capaz de medir y registrar la presión

diferencial, se tomó como punto de partida la priorización de los requerimientos, según las necesidades de medición establecidas por el personal técnico del laboratorio a través de encuestas desarrolladas empleando la metodología para el diseño y desarrollo de productos de Ulrich y Eppinger [5], así como las especificaciones técnicas disponibles en cuanto al desempeño de los equipos que actualmente se utilizan y esto se contrastó con las características de los componentes electrónicos que dieron origen al prototipo funcional que se obtuvo con la realización de este proyecto orientado a la mejora.

2. Diseño del módulo de adquisición de datos

2.1. Código del microcontrolador

El código del microcontrolador realiza las tareas que son ejecutadas únicamente en la primera iteración cuando se enciende el dispositivo como lo son "set up hardware" y "set up software" que se observan en la Figura 1 y Figura 2 respectivamente.

A diferencia de las tareas anteriores, la sección "loop" mostrada en la Figura 3 itera indefinidamente hasta detectar un cambio en el estado del botón y seguidamente hace lectura del DIPSWITCH lo que desencadena la selección entre la configuración de la interfaz digital o de la interfaz local.

El loop asíncrono se encarga únicamente de llevar un control del tiempo para la toma de la

siguiente medición, este utiliza un hilo del procesador diferente al del loop principal para balancear la carga de trabajo y capturar con la mayor exactitud posible los datos. Esta medida se debe a que el loop principal se encarga de tareas exigentes que pueden tomar microsegundos y a largo plazo se acumulan generando un retraso considerable.



Figura 1. Setup del hardware.

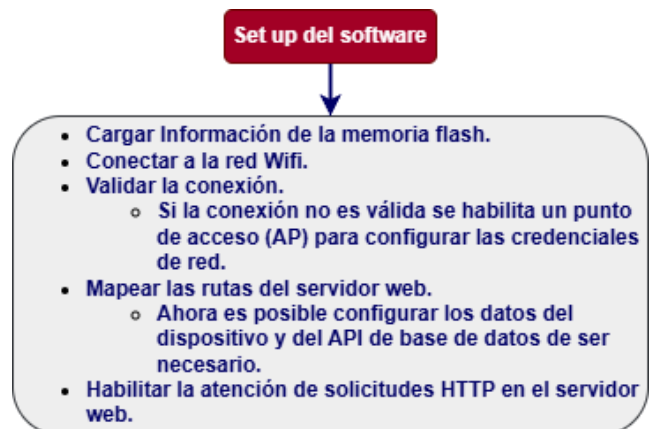


Figura 2. Setup del software

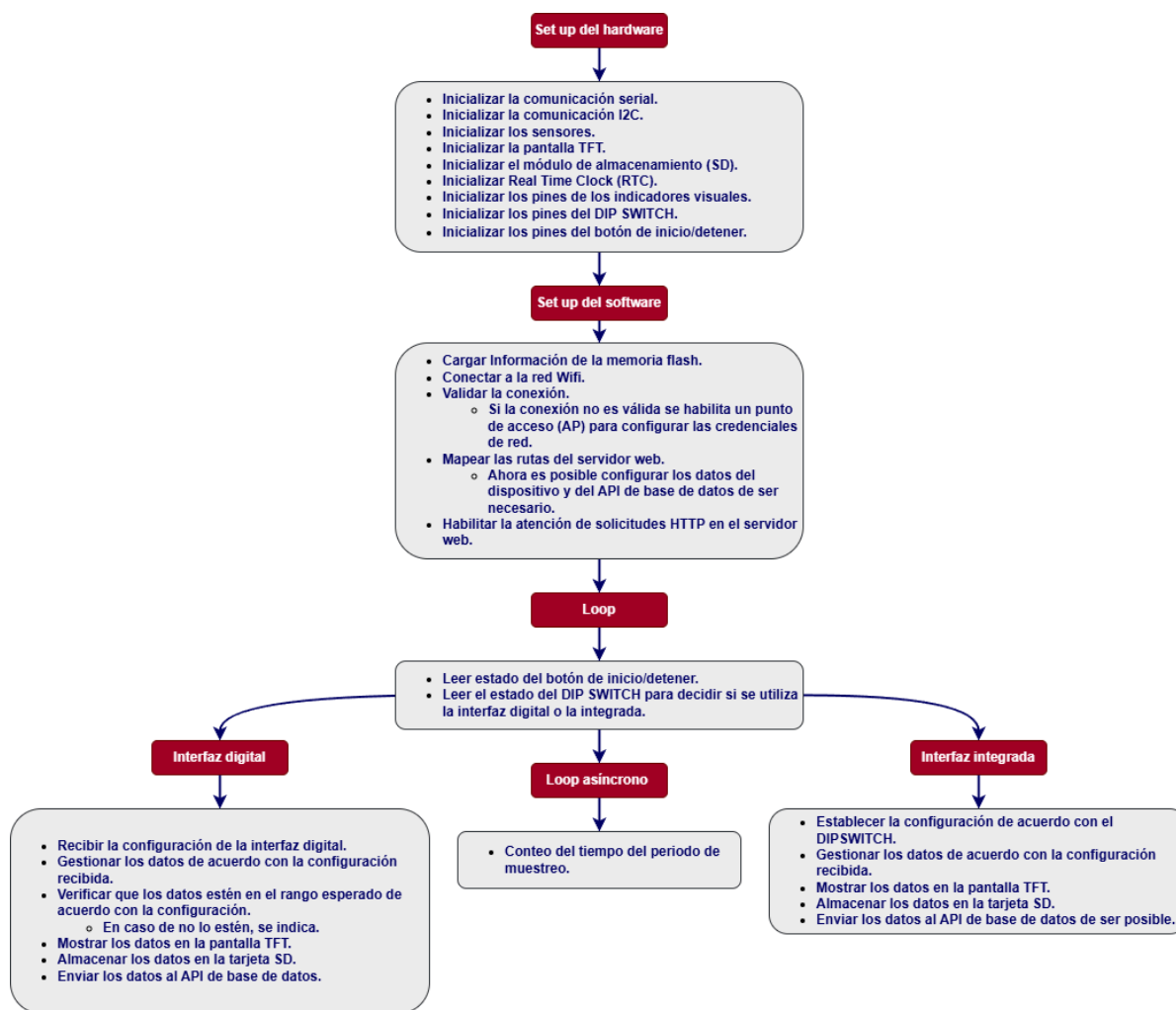


Figura 3. Diagrama del código del microcontrolador

La lectura y escritura en memoria son acciones que suelen tomar mucho tiempo a nivel computacional. Por esta razón se opta por almacenar las variables globales y la configuración del dispositivo en estructuras, las cuales en lenguajes basados en C son más rápidas de acceder en la memoria. Esta limitación también afecta la escritura y lectura de datos de la memoria extraíble, para optimizar este proceso se utiliza un bus de datos VSPI integrado en el hardware del microcontrolador que trabaja a mayor velocidad que uno generado virtualmente.

2.2. Conexiones

El microcontrolador limita los pines pertenecientes al ADC2 (segundo canal del convertidor analógico a digital) cuando se

utiliza el wifi [6]. Esto afecta la selección de protocolos de comunicación y la cantidad de entradas y salidas analógicas disponibles. Lo cual implica una apropiada selección de los pines para el hardware, en la Figura 4 se observa un diagrama pictórico de las conexiones realizadas.

2.3. Conexión a la red wifi

El microcontrolador funciona como servidor y cliente simultáneamente, se utiliza como servidor para poder configurar las credenciales de la red wifi, el dispositivo y del API. Por otra parte, actúa como cliente ya que debe de enviar los datos capturados al API, el cual se encarga de comunicarse con la base de datos.

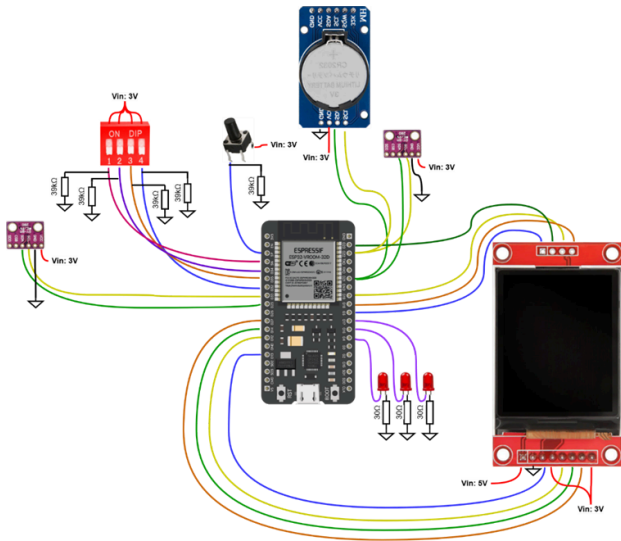


Figura 4. Diagrama pictórico de las conexiones.

Siempre que el dispositivo se encuentre a la espera, este atiende solicitudes HTTP del sitio web en el que se realiza la configuración del dispositivo. En caso de recibir una solicitud la configuración es almacenada en la memoria flash.

2.4.Nombre de la sesión

El nombre de las sesiones es auto generado con base en el año, mes, día y un número consecutivo de dos dígitos, desde "00" hasta 99 que representa el número de archivo generado ese día por ese dispositivo. Los nombres de la sesión son los asignados a los archivos almacenados en la memoria extraíble, lo que permite su control. Por otra parte, este nombre junto con el asignado al dispositivo, son lo que identifican a los datos en la base de datos y así podrán ser consultados en la posteridad. Para un correcto control de los archivos en la base de datos el dispositivo debe de operar con una memoria extraíble. La auto-generación de los nombres nace ante la restricción del formato FAT32 que permite almacenar archivos cuyo nombre no exceda los 8 dígitos y su extensión los 3 dígitos. Esta característica limita al dispositivo a realizar un máximo de 100 sesiones al día.

2.5.Indicadores visuales

El dispositivo verifica el estado de los sensores, los buses de comunicación, la conexión a la red wifi, la memoria extraíble y que las magnitudes estén dentro de los rangos establecidos. En caso de que algo esté fuera de lo normal, se le indica al usuario mediante indicadores visuales (LEDs), las posibles combinaciones son documentadas mediante la tabla de verdad mostrada en el Cuadro I.

2.6.Configuración local

Para la configuración local del dispositivo se hace uso de un DIPSWITCH cuyas posibles combinaciones son documentadas en la tabla de verdad mostrada en el Cuadro II. Cuando se utiliza una combinación cuya función es "apagado" se hará uso de la configuración de la interfaz digital.

2.7.Captura de datos

Durante la toma de datos las magnitudes medidas se muestran en pantalla junto con datos de interés como la dirección IP del dispositivo, su nombre, el nombre de la sesión y la fecha y hora de los datos mostrados. En la Figura 5 se presenta una fotografía, en vista superior del instrumento, donde se muestra lo mencionado.

CUADRO I

Tabla de verdad de los indicadores visuales.

LED 1	LED 2	LED 3	Significado
0	0	0	Esperando inicio
0	0	1	Valor fuera de rango
0	1	0	WIFI no inicializado
0	1	1	BME1 no inicializado
1	0	0	BME2 no inicializado
1	0	1	RTC no inicializado
1	1	0	SD no inicializado
1	1	1	Tomando mediciones

CUADRO II

Tabla de verdad de la configuración local.

Modo local	Config 1	Config 2	Config 3	Función
1	0	0	0	S1-Período 30 s
1	0	0	1	S1-Período 5 min
1	0	1	0	S2-Período 30 s
1	0	1	1	S2-Período 5 min
1	1	0	0	S1/2-Presión D 10 s
1	1	0	1	S1/2-Presión D 30 s
1	1	1	1	S1/2-Presión D 5 min
0	0	0	0	Apagado
0	0	0	1	Apagado
0	0	1	0	Apagado
0	0	1	1	Apagado
0	1	0	0	Apagado
0	1	0	1	Apagado
0	1	1	1	Apagado



Figura 5. Fotografía del dispositivo durante la captura de datos.

3. Diseño de la interfaz digital

La interfaz digital está compuesta por dos grandes partes, la interfaz de usuario que es el sitio web mediante el cual se puede configurar el dispositivo, así como consultar y descargar datos. El segundo componente es el API, el cual se encarga de comunicarse con la base de datos ya sea para almacenar las mediciones recibidas por el dispositivo o para consultar los datos solicitados. Para programar la interfaz digital se utilizó el framework de dotnet el cual está basado en C# y permite programar web APIs y sitios web mediante Blazor.

El uso de un sitio web y un API le otorga escalabilidad a la solución, ya que ambos pueden ser utilizados para atender múltiples dispositivos simultáneamente. También otorga seguridad ya que solo el sitio web será accedido remotamente y solo una componente se comunica con la base de datos.

3.1. Interfaz de usuario

3.1.1. API

Esta componente es la encargada de comunicarse con la base de datos y de recibir solicitudes HTTP por parte del dispositivo y la interfaz de usuario. En caso de recibir una solicitud del dispositivo, el API responde con el código HTTP 200 que indica la correcta recepción de los datos. Para el caso de la interfaz, el API envía el código HTTP 200 y un paquete de datos con la información consultada de la base de datos. La información recibida en el paquete de datos es procesada por el API y adaptada a la tabla de la consulta de datos del sitio web o es almacenada en un archivo .txt según se requiera.

La conexión con la base de datos se realiza mediante un comando SQL, el cual es construido a partir de la información ingresada por el administrador en el archivo de configuración del API. Cabe mencionar

que la sintaxis utilizada está basada en MariaDB dadas las características de la base de datos del laboratorio.

3.1.2. Página de configuración

La pantalla para la configuración del dispositivo únicamente requiere ingresar la dirección IP asignada al dispositivo y seleccionar los parámetros deseados, entre ellos, el tiempo de muestreo y las mediciones a recopilar con cada uno de los dos sensores, ya sea en una, dos o tres de las magnitudes que se pueden medir con cada sensor (temperatura, humedad y presión).

3.1.3. Consulta y descarga de datos

La consulta y descarga de datos se realiza mediante la página web diseñada para tal fin. Para realizar la consulta se debe ingresar el identificador de la sesión y el identificador del dispositivo. Tanto la consulta como la descarga de datos pueden ser realizadas en tiempo real durante la captura de datos.

La descarga de los datos se hace dentro del servidor en el que se encuentra el API y la interfaz de usuario. Esto se hace para garantizar la protección de la información, ya que el acceso al servidor es restringido y controlado.

4. Carcasa y protección de los sensores

Para el diseño de la carcasa del dispositivo se toman en consideración las dimensiones de los componentes de hardware y de las matrices de PCB disponibles en el mercado local. La carcasa está compuesta por dos piezas diseñadas mediante CAD para ser impresas en 3D. Dado que los cables de los sensores son manipulados constantemente se diseñan dos prensas que garantizan la sujeción del cable a la carcasa para que la soldadura de los sensores no se vea comprometida. Todas las sujeciones están atornilladas.

En la Figura 6 se observa la vista isométrica del ensamble del dispositivo. Cabe mencionar que la carcasa fue impresa en PLA con resolución de 0.5mm y relleno al 40%.

En la Figura 7 se observa ampliado (no en escala), el detalle del diseño exterior para la cubierta de protección para los sensores, que pretende asegurar su integridad. El diseño posee sujeción roscada para que sea lo más compacto posible. Estas piezas fueron impresas en PETG dada su baja absorción de agua comparada con otros filamentos disponibles.

5. Validación del prototipo funcional

5.1. Acceso remoto a la interfaz digital

Para validar el acceso remoto, se realizó una consulta de datos desde dos provincias y en total, cuatro puntos diferentes del país, uno desde Cartago y tres desde San José, en: Tejar, San Sebastián, San Pedro (Montes de Oca) y Tibás, respectivamente. En los cuatro casos la prueba de acceso remoto proporcionó resultados exitosos y los datos fueron consistentes, es decir no se evidenciaron discrepancias ni contradicciones respecto al comportamiento esperado. Por ejemplo: se respetó la configuración establecida por el usuario, en términos de las magnitudes a medir, períodos de muestreo y estas mediciones obtenidas fueron las mismas que su espejo en la base de datos.



Figura 6. Vista isométrica del ensamble del dispositivo

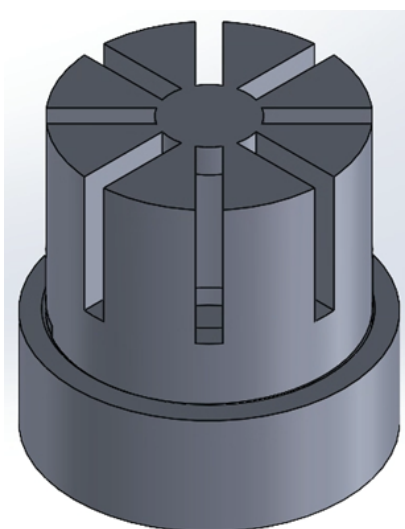


Figura 7. Diseño CAD de la cubierta de protección para los sensores

5.2. Capacidad de trabajo continuo

Para validar la capacidad de trabajo continuo del dispositivo, se realizó una toma de datos prolongada que tardó 10 horas y 48 minutos. Todos los datos son consistentes y fueron guardados exitosamente en la memoria extraíble y la base de datos.

5.3. Validación de la generación automática de sesiones

Para esta etapa de la validación se realizaron diversas tomas de datos en diferentes

periodos del día y en diferentes días. En la Figura 8 se pueden observar los nombres de los archivos y como sus nombres representan el año, mes, día y número consecutivo de archivo generado ese día. Esta información los hace únicos, identificables y unívocos a nivel interno de cada dispositivo.

24051410	5/14/2024 7:28 PM	Text Document	2 KB
24051411	5/14/2024 7:51 PM	Text Document	3 KB
24051500	5/15/2024 9:26 AM	Text Document	1 KB
24051501	5/15/2024 10:28 AM	Text Document	2 KB
24051502	5/15/2024 11:41 AM	Text Document	26 KB
24051503	5/15/2024 5:59 PM	Text Document	3 KB
24051504	5/15/2024 9:24 PM	Text Document	19 KB
24051800	5/18/2024 10:30 PM	Text Document	16 KB
24051801	5/18/2024 11:01 PM	Text Document	12 KB

Figura 8. Extracto de la captura de múltiples sesiones y su fecha de última edición

5.4. Validación de la identificación única de los datos

En la memoria extraíble es posible identificar el archivo de la sesión mediante el nombre auto generado. En el caso de los archivos descargados mediante la interfaz digital, estos son identificados mediante el nombre del dispositivo y el nombre de la sesión; esto en caso de que existan múltiples dispositivos almacenando información en la misma base de datos. Es importante que todos los datos tengan una identificación única y se logra mediante la información que tienen asociada la cual se desglosa a continuación:

- Dispositivo ID.
- Sesión ID.
- Año.
- Mes.
- Día.
- Hora.
- Minuto.
- Segundo.
- Número de archivo generado ese día.
- Magnitud y sensor que la obtuvo.

5.5. Validación del desempeño real de los sensores

Para conocer el desempeño real de los dos sensores incorporados en el dispositivo, se realizó una calibración en tres puntos de calibración en la magnitud de presión, empleando los valores nominales 850 hPa, 880 hPa y 910 hPa, definidos por expertos del Laboratorio Costarricense de Metrología (LACOMET). La calibración fue realizada internamente, por personal del laboratorio de presión del Laboratorio Costarricense de Metrología, empleando el método de comparación directa y un monitor de presión de referencia como patrón para asignar la trazabilidad de las mediciones al SI.

En el Cuadro III y el Cuadro IV, se observan respectivamente, los resultados obtenidos en la calibración, para el sensor 1 y para el sensor 2, en términos de la corrección y la incertidumbre para los tres valores nominales. Para determinar la corrección, se estimó la diferencia entre el valor de referencia del patrón menos el valor medido con el sensor sujeto a calibración. Para determinar la incertidumbre, se consideraron todos los aportes del sistema de medición, incluyendo los relacionados con los sensores sujetos a calibración y se reportó como incertidumbre expandida, con un nivel de confianza de 95 % y $k=2$, la cual fue de 0,1 hPa para todos los puntos de calibración y para ambos sensores.

En cuanto a las correcciones del sensor 1, según se observa en el Cuadro III, para los tres puntos de calibración fue de -0,4 hPa. En cuanto a las correcciones del sensor 2, según se observa en el Cuadro IV, para los dos valores nominales extremos fue de +1,1 hPa y de +1,2 hPa en el valor nominal de 880 hPa. Como se evidencia en la Figura 9, el desempeño del sensor 1 es mejor que el del sensor 2, ya que las correcciones del primero están dentro de las especificaciones técnicas del fabricante [7] (definidas por las líneas punteadas) mientras que las del sensor 2 se encuentran fuera del rango establecido.

CUADRO III

Resultados de la calibración del sensor 1

Valor del patrón / hPa	Valor medido con el sensor 1 / hPa	Corrección Sensor 1 / hPa	$U_{k=2}$ / hPa
850,3	850,7	-0,4	0,1
880,3	880,7	-0,4	0,1
909,9	910,3	-0,4	0,1

CUADRO IV

Resultados de la calibración del sensor 2

Valor del patrón / hPa	Valor medido con el sensor 2 / hPa	Corrección Sensor 2 / hPa	$U_{k=2}$ / hPa
850,3	851,4	-1,1	0,1
880,3	881,5	-1,2	0,1
909,9	911	-1,1	0,1

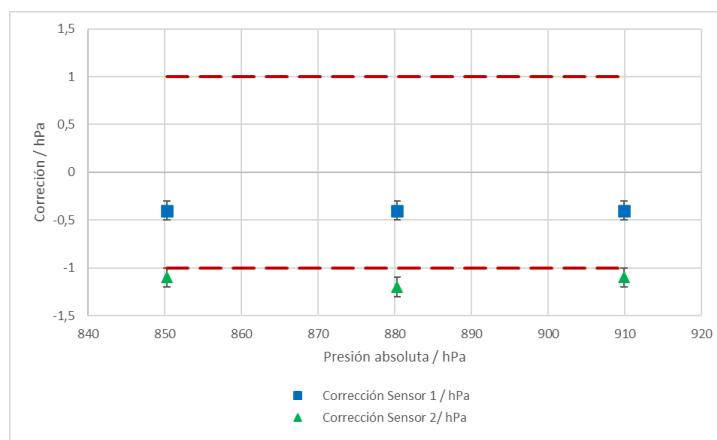


Figura 9. Desempeño real de los sensores durante la calibración en presión

5.6. Validación funcional del prototipo

Para validar el funcionamiento completo del dispositivo se planteó realizar una sesión corta personalizada. De esta sesión se registró la configuración establecida en la interfaz digital y se compararon los datos mostrados en la memoria extraíble contra los consultados y descargados de la interfaz digital.

Se utilizó un periodo de muestreo de 11 segundos para evaluar el funcionamiento con un valor no predeterminado. De igual forma se midieron todas las magnitudes a excepción de la temperatura con el sensor #2 y humedad relativa con el sensor #1, nuevamente para utilizar valores no predeterminados. En los límites de las magnitudes se ingresaron valores en los que oscilan las condiciones ambientales del lugar en el que se realizó la toma de datos.

Los resultados obtenidos fueron que los datos consultados en la interfaz digital, fueron congruentes con los datos registrados en el archivo obtenido de la interfaz digital y a su vez, congruentes con los datos registrados en el archivo obtenido de la memoria extraíble, demostrando el apropiado funcionamiento de la totalidad de la solución. Las únicas diferencias que se observaron fueron en el formato de la fecha y la hora, ya que la base de datos lo maneja diferente pero sus valores fueron consistentes.

6. Conclusiones

- Se diseñó un módulo de adquisición de datos que registra efectivamente la totalidad de los datos capturados por ambos sensores con una incertidumbre expandida con un nivel de confianza de 95 % y $k=2$, de ± 0.1 hPa.
- Se diseñó una interfaz digital que permite monitorear y obtener los datos históricos o registrados en tiempo real por el dispositivo mediante consultas a una base de datos. Además, permite configurar el dispositivo con un 100 % de acierto mediante el ingreso y

selección de parámetros personalizados según las necesidades del usuario.

- Se diseñó una interfaz local que permite configurar modos de trabajo predeterminados con un 100 % de acierto mediante el uso de un DIPSWITCH integrado.
- Se realizaron pruebas funcionales que evalúan la transmisión del 100 % de los datos capturados por el dispositivo hacia la base de datos y la memoria extraíble, así como la consulta y descarga de la información almacenada en la base de datos a través de la interfaz digital.

7.Referencias

- [1] B. Hardy, "ITS-90 FORMULATIONS FOR VAPOR PRESSURE, FROSTPOINT TEMPERATURE, DEWPOINT TEMPERATURE, AND ENHANCEMENT FACTORS IN THE RANGE -100 TO +100 C," Thunder Scientific Corporation, Albuquerque, NM, USA, 1998.
- [2] D. Kalibrierdienst, "Directriz DKD-R 5-8 Calibración de higrómetros para la medición directa de la humedad relativa," Deutscher Kalibrierdienst, Berlín, 2019.
- [3] VAISALA, "PTU300 Guía del usuario," Vaisala Oyj, Finlandia, 2018.
- [4] F. Corporation, "750P/750R Pressure Modules Hoja de instrucciones," Fluke Corporation, Everett, WA, 2013.
- [5] K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS, Cuernavaca: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V., 2013.
- [6] Espressif Systems, "ESP32 Series Datasheet," [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. [Accesado el 07 05 2024].
- [7] BOSCH, "Pressure sensor BMP280," [Online]. Available: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/pressure-sensors/bmp280/#documents>. [Accesado el 08 05 2024].