



Revista MINERVA

Plataforma digital de la revista: <https://minerva.sic.ues.edu.sv>



DOI:10.5377/revminerva.v6i3.17356

Artículo Científico | Scientific Article

Diseño y construcción de un anemómetro ultrasónico de bajo costo utilizando tecnología IoT

Design and construction of a low-cost ultrasonic anemometer using IoT technology

Diego López¹

José Ezequiel Torres Torres¹

Correspondencia:
tt15002@ues.edu.sv

Presentado: 31 octubre de 2023
Aceptado: 1 de diciembre de 2023

¹ Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador

RESUMEN

Los fenómenos meteorológicos como ráfagas de viento afectan a El Salvador y son monitoreados por distintas estaciones meteorológicas alrededor del país. Para complementar dichos equipos de manera local, se propuso la creación de un prototipo de anemómetro ultrasónico, agregándole otras variables de monitoreo, capacidad de transmitir datos de manera inalámbrica mediante redes IoT locales, desarrollado a partir de materiales de bajo costo y accesibles en el país, realizando una comparación entre ellos. Además, se presentaron los resultados de las pruebas de laboratorio para comprobar su funcionamiento con base a procesos normados para este tipo de instrumentos.

Palabras clave: anemómetro, ultrasonido, prototipo, medioambiente, internet de las cosas.

ABSTRACT

Meteorological phenomena such as gusts of wind affect El Salvador and are monitored by different weather stations around the country. To complement said equipment locally, the creation of a prototype of an ultrasonic anemometer was proposed, adding other monitoring variables, the ability to transmit data wirelessly through local IoT networks, developed from low-cost materials accessible in the country, making a comparison between them. Results obtained in laboratory tests were also presented to verify its operation based on standardized processes for this type of instruments.

Keywords: Anemometer, Ultrasound, Prototype, Environment, internet of things.

INTRODUCCIÓN

El anemómetro es un instrumento meteorológico que mide la velocidad del viento circundante al equipo, utilizado para el monitoreo ambiental de una zona de estudio, se ha utilizado a lo largo de su existencia como un transductor mecánico eléctrico mediante el movimiento de cazoletas y una veleta que envían señales de lectura a través de cableado a un instrumento de recolección o presentación de datos. (Caneppele, 2022)

En la actualidad y con el avance de la tecnología existen anemómetros ultrasónicos de distintos modelos, fabricados por empresas de instrumentos de meteorología (Viñas, 2020), sin embargo, estos modelos no son muy utilizados en El Salvador debido a que solo se fabrican en el exterior además de tener un alto precio excluyendo los gastos de importación. Por ello se utilizan más los anemómetros mecánicos, los cuales cumplen su función, no obstante, con el paso del tiempo sufren deterioro en sus partes móviles por la intemperie y movimiento constante. (Pindado et al., 2001).

Los anemómetros ultrasónicos comerciales que se han desarrollado son del tipo bidimensional y tridimensional, con brazos que sobresalen del cuerpo principal y terminaciones con sensores de ultrasonido formando ejes de trayectoria ultrasónica. Estos equipos basan su funcionamiento en el tiempo que la onda toma al salir del transductor emisor hasta llegar al receptor del lado opuesto, siendo el resultado, tiempo de vuelo de onda o Tof (Time of flight) (Adi Kuncara et al., 2020). Los modelos más modernos utilizan este mismo método con varias adiciones para mejorar la precisión y diseños más compactos (Hunan Rika Electronic Tech Co., 2020). Dichos anemómetros de venta se realizaban con cuerpos aleaciones metálicas, aunque con el tiempo se ha pasado a construirlos de materiales plásticos, la mayoría de ellos hechos a partir de ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) siendo utilizado en varios

productos para exteriores (PCE Instruments, s.f.). Sin embargo, los costos de estos equipos oscilan entre los USD 200-USD 400 en sitios web de productos extranjeros enviados por correo desde China o EE.UU. (Alibaba, s.f.; Ebay, s.f.), algunos incluso superando los USD 1000. Esto vuelve menos atractivo optar por una versión ultrasónica conociendo que la versión mecánica o un anemómetro de mano son más accesibles en cuanto a costo y disponibilidad en el país (Electrónica Steren, s.f.).

Este proyecto por tanto consiste en el diseño y construcción de un prototipo de anemómetro ultrasónico que realice las mismas tareas que un anemómetro convencional (Figura 1). En su mayoría, los proyectos de anemómetros ultrasónicos consultados utilizan la técnica de tiempo de vuelo para realizar mediciones, ya sea formando ejes horizontales (Adi Kuncara et al., 2020) (Abdul Haseeb & Raja Asim, 2019) o mediante resonancia del ultrasonido (Itrium, 2020). Se realizó el diseño del prototipo basado en los modelos de ejes por poseer

Figura 1

Anemómetro ultrasónico 2D comercial (Alba Ambiente S.A., s.f.)



más información referencial. Se describe el procesamiento matemático y diseño del instrumento con base a estos modelos. Para el manejo de recepción y procesamiento de datos del anemómetro se propuso el uso del Microcontrolador Arduino Mega debido a sus características fundamentales de software libre, facilidad de programación y accesibilidad a las placas. El uso de la versión mega sobre la versión UNO más conocidas es por su mayor memoria Flash, RAM y puertos E/S (Arrow Electronics, 2017).

La mayoría de los proyectos consultados tienen un enfoque en la matemática, programación y disposición básica de los sensores, omitiendo otras áreas de la ingeniería como el diseño, normativa y estructura. Para profundizar en dichas áreas, se realizó una investigación de materiales de construcción para crear la estructura del instrumento, evaluando sus capacidades físicas, la forma de utilización y qué aplicación tienen en productos para uso en intemperie (AdrecoPlastics, s.f.)(SyBridge Technologies, 2021), junto a alternativas que sean accesibles dentro del país, que puedan ser realizadas de manera rápida y con bajo costo.

Además, para complementar el prototipo a construir se tomó la decisión de agregar otros sensores y funcionalidades. Entre los sensores agregados se dispuso de dos lecturas básicas de ambiente como son la temperatura y humedad, los cuales pueden tener un efecto sobre la velocidad del viento y el ultrasonido (masterDbplus, 2017; Trans-African Hydro-Meteorological Observatory [TAHMO], s.f.).

Se incluyó también un sensor capaz de detectar la intensidad de luz UV en la zona donde se ubica el instrumento. En el verano no solo sube la temperatura si no que la poca formación de nubes permite que los rayos UV incidan más sobre la salud de la población, los cuales pueden causar daños a la piel o cáncer al exponerse a ellos de manera prolongada (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2022). Existe una clasificación de la severidad

de la radiación solar con base a los índices UV, presentados por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2002) para determinar el riesgo a la salud debido a la exposición prolongada, mediante un sensor de intensidad UV es posible detectar la intensidad de radiación solar para prevenir la sobreexposición. (Centro De Aseroria Dr. Ferrer, s.f.)

Muchos anemómetros, ultrasónicos o mecánicos, comunican las lecturas percibidas en una salida RSA232 (TIA/EIA-232) o RSA485 (EIA/TIA-485) (Weis, 2020), por lo que es necesario conectarse a un equipo físico para la recepción de datos, además del software necesario para algunos modelos. Para optimizar la comunicación de datos se plantea la inclusión del prototipo a las tecnologías IoT o Internet de las cosas (MadeinWeb & Mobile, 2022; Burkhalter, 2020; Red Hat, 2023) como objetivo secundario del proyecto. Los dispositivos IoT suelen clasificarse en dos categorías: del tipo actuador para que el dispositivo enlazado realice una acción y del tipo sensor, el cual comunica el fenómeno que percibe al usuario (Cámara Valencia., s.f.). El anemómetro al ser un instrumento tipo sensor transmite la información que percibe del medio, sumado a los sensores adicionales del prototipo, el anemómetro se plantea acoplar a una red local para compartir de manera inalámbrica los datos que censa. Para sentar las bases IoT se enlazará el equipo a una red local en un área pequeña WLAN (Olivia, s.f.), mediante la inclusión de placa programables con capacidad de comunicación WiFi y/o Bluetooth (Rahul Awati, 2023), el enfoque principal será para una red WiFi con protocolo IEEE 802.11 (IEEE Standards Association [IEEE SA], 2023).

Para presentar los datos se realizó una aplicación web sencilla, mediante la conexión de un servidor y base de datos en la misma red local donde se enlaza el instrumento, detallando de manera superficial la programación y lenguajes de programación aplicados, ya que el enfoque

de este proyecto se centra más en el diseño, procesamiento matemático, construcción y comunicación IoT del prototipo.

Finalmente, se realizó una evaluación inicial del prototipo construido, explicando su diseño y posterior construcción, los materiales seleccionados, la ubicación de los sensores y aspectos relevantes al momento de diseñar. Además, mediante la normativa ASTM D6011 “Métodos de prueba estándar para determinar el funcionamiento de anemómetro/termómetro sónico” (ASTM International, 2022), la cual describe los pasos y equipos necesarios, se evaluó el instrumento. Se realizaron pruebas al prototipo siguiendo los procesos descritos, utilizando un anemómetro de mano para realizar lecturas de control y un túnel de viento casero adaptado al prototipo como parte de las herramientas necesarias para dichas pruebas. Además, se evaluaron las lecturas recopiladas por los demás sensores en un ambiente real y la capacidad de comunicación del instrumento a un servidor local mediante la comunicación inalámbrica WiFi.

DESARROLLO DE PROTOTIPO DE ANEMÓMETRO ULTRASÓNICO

En esta sección se describe el desarrollo para realizar el prototipo de anemómetro ultrasónico describiendo paso a paso el proceso desde su planteamiento hasta el diseño final. Se comienza por comprender el funcionamiento matemático que desarrolla un anemómetro, utilizando tecnología de ultrasonido (Adi Kuncara et al., 2020), listar y describir los componentes necesarios para formar el instrumento y su funcionamiento en conjunto. Se incluye una descripción de alternativas para realizar registro, almacenamiento, comunicación y presentación de datos una vez desarrollado el instrumento. Se realiza una comparación de materiales para seleccionar el más adecuado con el objetivo de proteger los componentes, buscando una opción que sea eficiente, resistente, cumpla condiciones

EMI básicas, sea fácilmente accesible y de bajo costo. Finalmente, presentar el conjunto de todos los puntos descritos para formalizar un diseño para el prototipo en software y hardware.

Análisis matemático de funcionamiento

Un anemómetro ultrasónico basa su principio en que la velocidad del viento afecta la velocidad del ultrasonido, actuando como dos vectores que se suman o restan dependiendo de sus trayectorias. Para realizar dicha tarea se utilizan dos transductores ultrasónicos, uno de transmisión y otro receptor, ambos se configuran para enviar una onda ultrasónica en el aire, formando un eje entre ambos transductores, el tiempo que toma la onda desde transmisor al receptor se denomina tiempo de vuelo de la onda (T_{of} Time of Flight por sus siglas en inglés), este valor es la salida del sensor de ultrasonido el cual se utiliza para calcular la velocidad.

Para mejorar la constancia de lecturas y disminuir el ruido se utiliza un filtro Kalman, el cual es un algoritmo de corrección y predicción matemático que permite reducir el ruido y mantener estables las lecturas de estado en un sistema dinámico de tiempo discreto (Pampliega Ruiz, 2008). Este filtro se puede implementar por medio de la programación de software al ser del tipo matemático, sin ningún hardware necesario, las ecuaciones del filtro para utilizar en el anemómetro se dividen en la parte de predicción (Ecuación 1 y 4) y corrección (Ecuación 2, 3, 5 y 6) de los valores

$$P_k^{(-)} = P_{k-1} + Q \quad (1)$$

$$K_k = P_k^{(-)} / (P_k^{(-)} + R) \quad (2)$$

$$P_k = P_k^{(-)} * (1 - K_k) \quad (3)$$

$$x_k^{(-)} = x_{k-1} \quad (4)$$

$$z_k = x_k^{(-)} \quad (5)$$

$$x_k = x_k^{(-)} + K_k * (lectura - z_k) \quad (6)$$

medidos (Rafi et. al., 2018).

Donde $x_k^{(-)}$ es el estado a priori estimado, $P_k^{(-)}$ es

la covarianza del error asociada a la estimación a priori. K_k es la ganancia de Kalman para minimizar el error posteriori de P_k , z_k es la medición realizada con ruido y x_k es la salida corregida del filtrado, mientras que en lectura sería la entrada con la medición de T_{of} de los sensores, «Q» es la covarianza del ruido de procesamiento y «R» es la covarianza de ruido de medición. «Q» se elige arbitrariamente y causa que las lecturas varíen más rápido o más lento, mientras que «R» se define por la variancia de las lecturas sin filtrar.

La salida del filtro es T_{of} estabilizado cuyas unidades son microsegundos, además los transductores se separan a una distancia constante en centímetros. Sin embargo, el resultado a presentar debe estar en unidades

$$v_o = 1 \frac{cm}{\mu s} \tag{7}$$

$$1 \frac{cm}{\mu s} * \frac{1 m}{100 cm} * \frac{1000000 \mu s}{1 s} = 1000 \frac{m}{s} \tag{8}$$

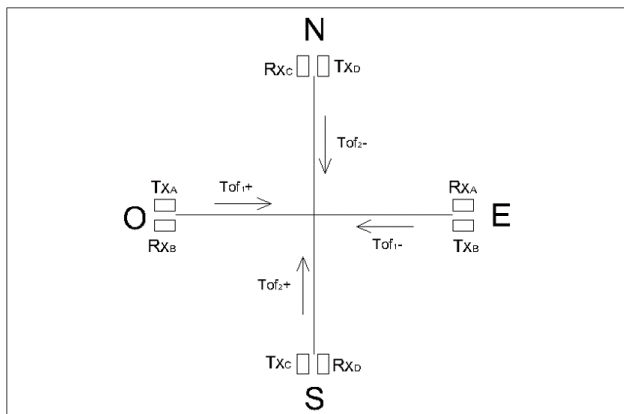
$$v_{final} = 1000 * v_o [m/s] \tag{9}$$

de metros sobre segundos, por lo que se hace la siguiente transformación.

El prototipo se planteó con base a tener 2 pares de transductores (Figura 2) por cada eje, el motivo es realizar una transmisión y recepción

Figura 2

Posicionamiento sensores de transmisión Tx y recepción Rx para formar arreglo de anemómetro ultrasónico (Adi Kuncara et al., 2020)



en cada dirección del eje, obteniendo una comparación entre dos tiempos de vuelo para determinar la velocidad. Se colocaron los transductores basándose en las posiciones cardinales N/S/E/O para facilitar el montaje en campo.

El comportamiento matemático de esta disposición de sensores en cada eje se define entonces por ecuaciones derivadas de la medición de flujo mediante ondas de ultrasonido en fluidos (aire en este caso), comparando dos pares de transmisión y recepción en el mismo eje (Canal It Might Be Worse., 2017). Si se toma por ejemplo el par Oeste-Este con una ráfaga de viento hacia el Este, se tendría las siguientes relaciones de los pares $R_{xA}-T_{xA}$ y $R_{xB}-T_{xB}$.

$$v_A = \frac{d}{T_{of}^+} = c - v_1 \tag{10}$$

$$v_B = \frac{d}{T_{of}^-} = c + v_1 \tag{11}$$

Donde V_A y V_B es la velocidad de transmisión hacia el Este y Oeste respectivamente en la Figura 2, T_{of}^+ sería el tiempo de vuelo de la onda ultrasónica con viento a favor, T_{of}^- el tiempo de vuelo de la onda ultrasónica con viento en contra, «c» es la velocidad del ultrasonido, «d» es la distancia entre transductores y v_1 es la velocidad del fluido en movimiento, viento en este caso. Al restar las ecuaciones 10 y 11 entre sí se obtiene la velocidad del viento despejando para v_1 .

$$c - v_1 - (c + v_1) = \frac{d}{T_{of}^+} - \frac{d}{T_{of}^-} \tag{12}$$

$$v_1 = \frac{d}{2} \left[\frac{T_{of}^+ - T_{of}^-}{T_{of}^+ T_{of}^-} \right] \tag{13}$$

Al ser la distancia constante e igual entre los pares de transductores se activa un par para obtener el T_{of} en una dirección y luego se activa el segundo par para obtener el tiempo de vuelo en dirección contraria, las dos lecturas se procesan en el filtro antes de usarse en la ecuación 13 para obtener la velocidad del viento vectorial en un eje, la cual puede ser positiva o

negativa dependiendo de donde se elijan los valores positivos del eje. Se da un retraso de 2 a 3 segundos entre la activación de pares de sensores para permitir las ondas remanentes esparcirse a través del medio y prevenir la lectura de ecos que causarían mediciones erróneas.

Se repiten los mismos pasos de medición, filtrado y cálculo aplicando las ecuaciones previas en el otro eje del anemómetro, esta vez para obtener v_2 , la velocidad del viento en el eje vertical en este ejemplo, cuyo valor igualmente es positivo o negativo. Obtenidas las dos velocidades de los ejes estas se utilizan como dos vectores perpendiculares que forman un vector final conocido como velocidad del viento (V), el cual tiene una magnitud y una dirección que se calculan con las ecuaciones 14 a 16.

$$\vec{V} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2 \quad (14)$$

$$|\vec{V}| = V = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad (15)$$

$$\theta_v = \tan^{-1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right) \quad (16)$$

Los signos de v_1 y v_2 cobran significancia al momento de definir la dirección, ya que el resultado es un ángulo en el rango de $\pm 180^\circ$ donde la referencia 0 estaría en el eje X positivo. La orientación cardinal de una brújula tiene como referencia el Norte a 0° girando hasta 360° en dirección de las agujas del reloj. El ángulo resultante de la ecuación 16 entonces tendría referencia en dirección Este, por lo que se implementa un algoritmo que redistribuye los ángulos de manera apropiada. Para realizar el cambio a la referencia en el eje vertical positivo se utilizan las siguientes ecuaciones condicionadas para obtener un ángulo entre 0° a 360° :

$$\theta = 90^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right); \text{ Si } v_1 > 0 \quad (17)$$

$$\theta = 270^\circ - \tan^{-1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right); \text{ Si } v_1 < 0 \quad (18)$$

Así los resultados presentados al usuario tendrán una magnitud de velocidad del viento V y una dirección del viento θ definida por un ángulo y una dirección cardinal. La dirección cualitativa se representa siguiendo la Tabla 1 según los resultados de las ecuaciones anteriores.

Equipo de hardware propuesto

Para el desarrollo del prototipo de anemómetro se usaron varios dispositivos electrónicos, la mayoría de ellos encontrándose disponibles en tiendas de este rubro en El Salvador. Como base, el prototipo se construyó con la placa de desarrollo Arduino Mega (Arduino [Hoja de Datos], 2023), al ser una placa de desarrollo programable accesible y fácil de utilizar por su software libre, con mayor capacidad de puertos E/S (entrada salida), mayor memoria flash e 256 kB para códigos más extensos y mayor SRAM de 8 kB. Esta placa sería el cerebro principal para todos los dispositivos necesarios de la propuesta, entre los demás dispositivos utilizados se encuentra (Figura 3 y 4):

- Node MCU ESP8266 módulo de conexión WiFi. (Espressif Inc. [Hoja de Datos], 2023)

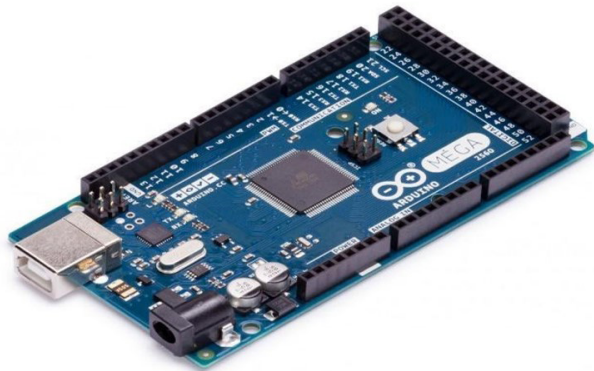
Tabla 1

Orientación del viento de manera cuantitativa y cualitativa

Ángulo	Orientación
$0 < \theta \leq 22.5$ y $337.5 < \theta < 360$	Norte
$22.5 < \theta \leq 67.5$	Noreste
$67.5 < \theta \leq 112.5$	Este
$112.5 < \theta \leq 157.5$	Sureste
$157.5 < \theta \leq 202.5$	Sur
$202.5 < \theta \leq 247.5$	Suroeste
$247.5 < \theta \leq 292.5$	Oeste
$292.5 < \theta \leq 337.5$	Noroeste

Figura 3

Placa de desarrollo Arduino Mega 2560 (Arduino, 2023)

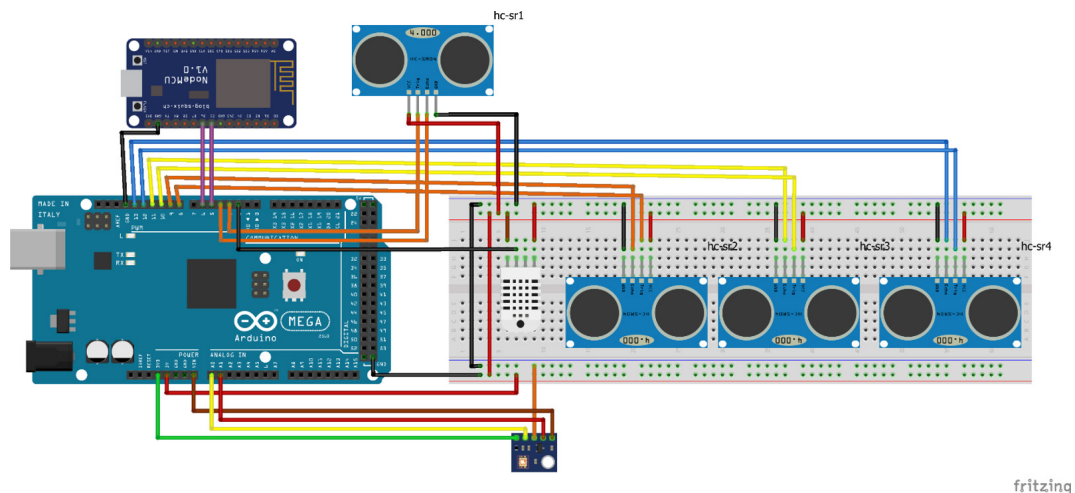


- ML8511 sensor UV. (LAPIS Semiconductor Co. [Hoja de Datos], 2013)
- HC-SR04 sensor ultrasónico. (ElecFreaks [Hoja de Datos], s.f.)
- DHT22 sensor temperatura/humedad. (Components101 [Hoja de Datos], 2018)

Mediante la utilización de otros componentes menores de hardware y software de Arduino junto con varias de sus librerías, se pueden programar todos los dispositivos mencionados para tomar lecturas del ambiente, interpretarlas, calcular valores utilizables para el usuario y envío de dichos valores mediante comunicación serial (protocolo UART) (Peña &

Figura 4

Diagrama esquemático de circuito eléctrico elaborado



Legaspi, 2020) y WiFi (protocolo IEEE 802.11). Todos estos dispositivos se encontraron en tiendas de venta de componentes electrónicos con precios relativamente bajos al ser el mayor el Arduino Mega por USD 33.00 y los demás por precios unitarios por debajo de USD 10.00, todos los componentes sumando un total de USD 100.00.

Disposición de los dispositivos

Se eligieron los sensores ultrasónicos HC-SR04 por su fácil utilización y precio bajo (menor a USD 5.00 por unidad), estos constan de dos transductores ultrasónicos de transmisión y recepción en una sola placa con 4 pines de conexión. En la Figura 4 se aprecia el uso de 4 sensores con las conexiones indicadas, la única diferencia con la disposición real es que los transductores que están soldados a las placas en la figura se separaran para ordenarse en los ejes vistos en la Figura 2, manteniendo la conexión con la placa a través de cableado y soldadura electrónica con estaño. Cada par se acciona secuencialmente, para obtener una lectura de tiempo de vuelo T_{of} de cada trayectoria y aplicar el procesamiento matemático explicado anteriormente.

La temperatura y humedad del ambiente se mide con un solo dispositivo conocido como

DHT22, este se programó a través de la librería DHT dedicada y retornar directamente un valor de temperatura en °C y humedad relativa en porcentaje.

El sensor ML8511 realiza mediciones de la intensidad de luz ultravioleta UV. Entrega una salida analógica de voltaje con valores máximos de 3.0V y mínimos de 0.99V, además el sensor se referencia al pin 3.3V de la placa Arduino para aumentar la precisión de lectura como se mostró en el diagrama eléctrico (SparkFun Electronics, s.f.). La lectura analógica es proporcional a la cantidad de luz UV que capta el sensor, para convertirla en voltaje analógico se aplica la siguiente expresión (ecuación 19).

$$Voltaje_{salida} = * (3.3 V / Voltaje_{ref}) * lectura_{analogica} \quad (19)$$

La placa Arduino al usar su conversor analógico-digital ADC para 5V o 3.3V tiene una salida de 10 bits (0-1023 valores posibles) (Arduino, s.f.) los cuales se aplican a la Tabla 2, por lo que para convertir el voltaje analógico del sensor se utiliza el mapeo.

El mapeo no es más que la redistribución de un rango de valores en otro rango de valores más pequeño o más grande. Para recuperar el umbral máximo digital de 1023 se mapea desde 0.99V a 3.0V en un rango de 0 a 1023. Ahora los datos son compatibles con la tabla de Índice UV y con un algoritmo se traslada el índice cuantitativo a un tipo de riesgo cualitativo.

Registro y comunicación inalámbrica

Como cualquier instrumento de monitoreo se necesitan obtener valores útiles del dispositivo y registrarlos para un análisis futuro, observar el comportamiento del fenómeno o para sacar conclusiones de dichos fenómenos, por tanto, se evalúan las distintas posibilidades de registro de la salida del instrumento.

- Data logger: un dispositivo independiente con la tarea de almacenar y registrar datos de forma autónoma en

Tabla 2

Índice UV y tipo de riesgo de acuerdo a lecturas del sensor ML8511 (Nagibvalejos, 2020)

Índice UV	Rango	Tipo de riesgo
0	<50	
1	<227	Bajo
2	<318	
3	<408	
4	<503	Moderado
5	<606	
6	<696	
7	<795	Alto
8	<881	
9	<976	Muy alto
10	<1079	
>= 11	<1170	Extremadamente alto

una memoria interna, estos se conectan a algún equipo y usualmente registran voltajes y corrientes para que el usuario conecte alguna PC o memoria extraíble. (Maloy Smith, 2020)

- Puertos de salida: una alternativa sería el uso de comunicación serial entre el dispositivo y una computadora para recibir los datos de manera local. La opción más común sería el uso de Excel con el complemento de “transmisor de datos” y una conexión por el puerto USB hacia la placa Arduino con protocolo UART.
- Transmisión inalámbrica: mediante un servidor web y conexión inalámbrica a Internet el instrumento puede anclarse a una red y enviar los datos obtenidos a una base de datos remota para almacenaje.

Para este proyecto, uno de sus objetivos secundarios es enlazar el instrumento de medición a una red local, como primeros pasos de implementar tecnología IoT, por lo que se propuso que el registro de datos se realice en un servidor web local mediante una base

de datos. Para este objetivo el anemómetro requiere la capacidad de comunicación con Internet para acceder e insertar los datos obtenidos (Figura 5), se logra este objetivo con el dispositivo de comunicación WiFi NodeMCU ESP8266 (Espressif Inc. [Hoja de Datos], 2023)

Entre sus capacidades esta la posibilidad de programarse con el mismo software para Arduino, conectarse a una red de internet local como cualquier otro dispositivo con tecnología WiFi, una antena de transmisión/recepción integrada y varios pines GPIO (entrada salida de propósito general) a los cuales se pueden conectar otros instrumentos, además de una entrada micro USB para programar o proveer alimentación eléctrica.

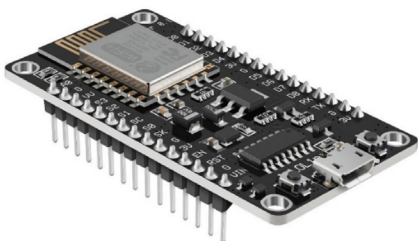
El proyecto esta centrado en el prototipo de anemómetro ultrasónico, por lo que la implementación IoT se contempló como un añadido/objetivo secundario, se espera sentar las bases únicamente de lo que, a futuro, sea una implementación completa a IoT

Presentación al usuario y almacenamiento

El instrumento final se enlazará a una red local mediante las credenciales necesarias del router, tal como lo haría un nuevo dispositivo con comunicación WiFi. Se desarrolló un servidor local en la misma red donde se creó una base de datos que almacene la información enviada por el anemómetro y un portal web sencillo (Figura 6) para la visualización en tres subdivisiones. La interfaz de usuario consiste

Figura 5

Placa Node MCU ESP8266



de los siguientes apartados:

- Página principal: en esta se presentan los datos más actuales entregados por el instrumento y se actualiza cada 15 segundos con datos nuevos.
- Página de gráficas: se grafica los datos almacenados de una fecha específica en periodos de 15 minutos, teniendo un promedio de varias variables que se desea visualizar.
- Página de tablas: se presentan los datos almacenados en forma de tabla, aquí se visualizan todos los datos disponibles de la última hora o por fecha escogida.

La comunicación entre instrumento y servidor se realiza con PHP (Hypertext Preprocessor) y PHP POST. El servidor tiene una base de datos propia elaborada con MySQL (My Structured Query Language), esta se utiliza para almacenar los datos a presentar. (Robledano, 2019; Lázaro, 2018).

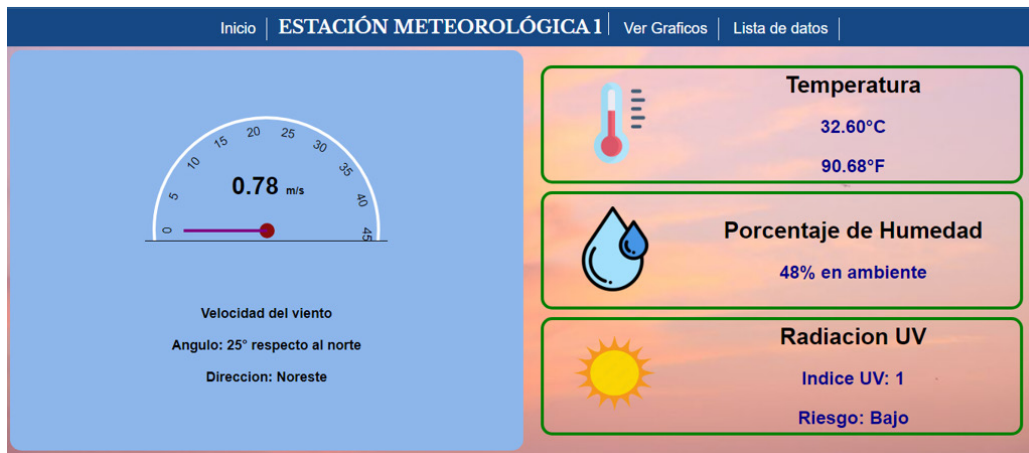
La interfaz web disponible al usuario consiste en una página sencilla realizada con estructura HTML (Hypertext Mark-up Language), mejorada estéticamente con CSS (Cascading Style Sheets) y aplicando dinamismo e interactividad mediante JavaScript y PHP (rafaella-brafallerini, 2021). El diseño está planteado para poder observar y analizar datos almacenados libremente, el usuario no necesita realizar un ingreso con credenciales, realizar cambios al anemómetro mediante comandos ni ingresar cambios a la página web. Ya que el objetivo de este proyecto es el anemómetro ultrasónico no se profundizará más en la sección de servidor, basta entender que si la comunicación entre instrumento y base de datos es exitosa el portal presentará los datos recolectados.

Evaluación de materiales

A partir de las referencias de anemómetros y equipos de exterior evaluadas se listaron algunos de los materiales más utilizados en instalaciones exteriores o destinados para

Figura 6

Portal Web de página principal creada, datos más recientes captados por anemómetro ultrasónico



uso en intemperie, entre los candidatos se encontró policarbonato, acrílico, policloruro de vinilo (PVC), y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Se omitió la inclusión de metales como alternativas debido a que las señales WiFi que emite el instrumento, al ser de carácter electromagnético, son absorbidas parcial o totalmente por estructuras metálicas, causando interferencia para la implementación IoT. (SignalBoosters, 2022)

En Tabla 3 se puede comparar algunas de las propiedades físicas más importantes de los materiales presentados.

Analizando estas propiedades, el policarbonato es el que tiene mejores características seguido por el CPVC, PVC y por último el ABS. Cabe destacar que en la propiedad de dureza para el ABS se realizó con la escala Shore de dureza, para plásticos más suaves, mientras que la escala Rockwell es para plásticos más duros, estas escalas no son convertibles entre sí.

Los materiales a utilizar para proteger los dispositivos electrónicos y para formar la estructura del instrumento deben cumplir con ciertas características específicas con base a los objetivos planteados:

- Deben tener una clasificación IP 65 o superior, IP65 siendo una clasificación

de encapsulamientos o contenedores para electrónicos donde no ingresa el polvo o chorros de agua a través del material. (International Electrotechnical Commission [IEC], s.f.)

- Permitir el paso de señales de transmisión de 2.4 GHz y/o 5 GHz (comunicación por medio de tecnología WiFi) ya que el instrumento de comunicación inalámbrica estará dentro del dispositivo.
- Resistencia a la exposición prolongada al sol y lluvia sin degradarse o quebrarse.
- Tener un costo bajo y accesibilidad de compra de los materiales elegidos.

La clasificación IP (grado de protección o "Ingress protection") es un estándar de clasificación de materiales de la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) basado en la prevención del ingreso de cuerpos externos (sólidos y líquidos) hacia interiores a través del material. Esta clasificación es muy utilizada en materiales destinados a encapsular otros objetos, electrónicos o conexiones eléctricas.

Las comunicaciones a través de redes de Internet se hacen bajo protocolos TCP/IP en frecuencias de 2.4 GHz y 5 GHz en el espectro electromagnético, estas señales se transportan por el aire de manera inalámbrica de un

Tabla 3

Comparación de distintas propiedades para diferentes plásticos (Cyro, 2001; Ensinger, s.f.; International Polymer Solutions Inc., s.f.) [Hojas de Datos]

Propiedad	Unidad	ABS	Polycarbonato	PVC	CPVC	Acrílico
Resistencia a la tracción	MPa	32	69	51.71	56.54	69
Módulo de elasticidad (tracción)	MPa	1700	2200	2833.75	2964.75	2800
Resistencia a la flexión	MPa	49	97	88.25	103.42	117
Módulo de elasticidad (flexión)	MPa	1600	2300	3316.38	2826.85	3300
Dureza	Rockwell	75(Shore)	120	115	121	M-93
Temperatura de transición vítrea/deflexión	Celsius	104	149	80	103	105
Temperatura de operación continuo	Celsius	75	120	60	93	71
Resistencia dieléctrica volumétrica		10 ¹⁴	10 ¹⁴	5.4x10 ¹⁵	3.4x10 ¹⁵	10 ¹⁶

dispositivo a otro, siendo el enrutador el que conecta a los dispositivos en la red, por eso son requeridos materiales que tengan una baja o nula interferencia en la transmisión de estas señales. Varios materiales como metales, agua, ladrillos de concreto y otros afectan estas señales, provocando la interferencia electromagnética (EMI) (Cables RCT, 2021) por lo que es necesario evaluar aquellos materiales de construcción que causan la menor EMI, uno de los mejores en esta clasificación son los plásticos.

En cuanto a la emisión radiada del instrumento, de acuerdo a datos de placa del ESP8266 este chip tiene una potencia de transmisión promedio de 20 dBm o 0.1 W y pertenece a los equipos no licenciados operando en la banda ISM de 2.400 a 2.4835 GHz (AFAR Communications, s.f.; Endeavor Business Media, 2019). De acuerdo a las reglas de la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos de América (Federal Communications Commission o FCC) el límite

para este tipo de equipos a nivel internacional es de 30 dBm o 1 Watt. por lo que es esperado que el instrumento no emita una señal que interrumpa severamente a otros equipos (Espressif Inc., 2017). En cuanto a inmunidad este debe realizarse con base a las normas IEC 61000-4-3, las cuales requieren de varios equipos para generar señal en una amplia gama de frecuencias (IEC, 2020).

Diseño final

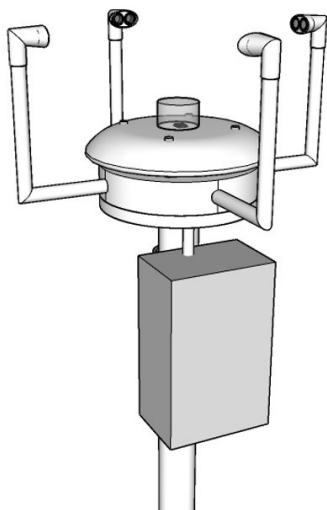
El prototipo se realizó tomando de referencia el ejemplo de anemómetro ultrasónico comercial, mediante brazos separados a cierta distancia donde se colocarán 2 pares de transductores ultrasónicos por eje, el razonamiento es tener una distancia prudente entre soportes para evitar las zonas de viento muerto o turbulento (Great Canadian Kite Company, 2016) y proveer más fuentes de comparación entre tiempos de vuelo. Se colocaron los transductores en brazos separados por una distancia de 30 cm entre sí y elevados a una altura entre 20 cm desde la superficie del cuerpo, evitando obstáculos

o fuentes de rebote. Los brazos se realizaron con tubería PVC con tratamiento de pintura para aumentar su resistencia a la intemperie (Armstrong, 2021; Ligon, 2013). La elección de PVC fue debido a las propiedades evaluadas, costo bajo del material, la disponibilidad de piezas y facilidad de modificación de las mismas.

El cuerpo inferior igualmente se realizó de PVC con tratamiento de pintura, en su interior está todo el cableado y las placas Arduino y NodeMCU. Se colocó un disco de melamina por encima del cuerpo sujeto por varillas galvanizadas delgadas para formar una cobertura contra radiación UV como un abrigo térmico miniatura (Bottomley, 2015), entre el cuerpo y disco se esconde el sensor de temperatura/humedad, por lo que toma las lecturas sin exponerse directamente a la intemperie. Se colocó el sensor UV en la superficie del disco, con una tapa acrílica cubriendo este último para evitar daños por humedad y lluvia, pero permitiendo el paso de la luz. Para visualizar mejor el instrumento (Figura 7) se realizó un diseño propio en el software de diseño Sketch Up Pro. (Trimble Inc., s.f.)

Figura 7

Diseño propio de prototipo de anemómetro ultrasónico



Para finalizar el prototipo se agregó una caja eléctrica de intemperie de ABS para contener adaptadores de corriente y la fuente principal de electricidad del instrumento, además de un soporte de tubo IMC para mantener el equipo erguido para instalaciones sobre suelo. Se planteó empalmar una línea a un tomacorriente interno en la caja, el cual alimentará los adaptadores AC/DC necesarios para dar energía a los electrónicos, el tomacorriente por supuesto es aislado junto a las conexiones con los materiales necesarios y el instrumento tendrá una protección termomagnética dedicada en tablero eléctrico.

RESULTADOS

En esta sección el prototipo final desarrollado es presentado, siguiendo las elecciones y explicaciones del apartado de Diseño Final de manera física. Se incluye el proceso de evaluación, bajo qué condiciones, con qué herramientas y siguiendo cierta norma para realizar pruebas de laboratorio al instrumento y los resultados obtenidos de manera gráfica y numérica para mediciones de viento, temperatura, humedad, índice UV y comunicación en red local.

El prototipo mostrado está en su fase preliminar, sin el soporte para facilitar las mediciones en pruebas de laboratorio. Los codos donde se alojan los transductores se fabricaron de PLA, este material no es recomendado por su baja tolerancia al calor, pero es un sustituto de menor costo para pruebas preliminares de las piezas de ABS o PVC recomendadas.

En la Figura 8 se observa que cada par de sensores apunta uno hacia a otro, para calibrar el posicionamiento correcto se utilizó un puntero láser entre cada par de transductores y se tomó la medida de distancia entre ellos con cinta métrica y pie de rey.

El funcionamiento del prototipo se comprobó con base a la normativa ASTM D6011 *Métodos de prueba estándar para determinar el funcionamiento de anemómetro/termómetro*

Figura 8

Prototipo preliminar construido de anemómetro ultrasónico



sónico (ASTM International, 2022), la cual contempla los procesos e instrumentos utilizados para comprobar el funcionamiento de un anemómetro de ultrasonido. Al no contar con equipos profesionales, se realizaron las pruebas de laboratorio para evaluar la norma con equipo comprado o construido por cuenta propia, por lo que se plantean como pruebas preliminares lo más aproximadas posible a los procesos de la norma elegida.

Todos los datos tomados se realizaron conectando el instrumento a una PC con el complemento Data Streamer para Microsoft Excel, este complemento es gratuito para instalar si ya se cuenta con una licencia de Microsoft Office. Data Streamer permite la grabación en vivo de los datos registrados por el dispositivo Arduino.

En primer lugar, se realizaron las pruebas de calibración del programa y trayectoria acústica aplicando el filtro Kalman donde se registran los tiempos de vuelo procesados por el filtro en cada eje. En los resultados se busca que la distancia calculada sea similar a la distancia medida anteriormente y que los tiempos de vuelo sean similares entre sí al estar separados por la misma distancia. La prueba se realizó en

una habitación con viento estático (0 m/s), con temperatura y humedad constante, para realizar la evaluación y calibración (Tabla 4 Figura 9).

La diferencia de distancia y trayectoria acústica es pequeña, esperado de una calibración hecha apropiadamente.

A continuación, se realizaron pruebas en un túnel de viento (Figuras 10-12) casero construido por los autores. El túnel de viento no tiene una normativa estricta, este se ajusta a las necesidades del objeto de prueba. La guía recomendada es realizar un túnel de viento del tipo subsónico de flujo abierto, por su menor tamaño y mayor versatilidad, otras recomendaciones son (Moreno-Garibaldi et al., 2014):

- Agregar una contracción al inicio y un cono difusor al final
- Cámara de pruebas completamente de acrílico ajustada al área del objeto de prueba

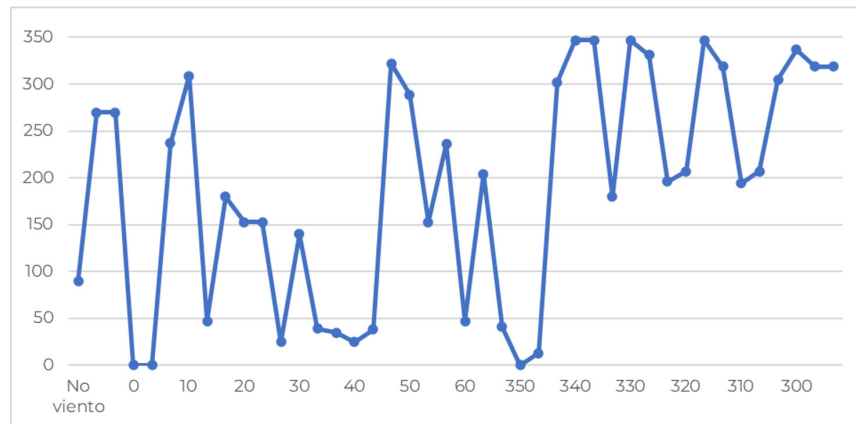
Tabla 4

Comparación distancia física y distancia acústica

Parámetro	Valor
Distancia 1 medida [cm]	31.5
Distancia 2 medida [cm]	31.1
Velocidad de sonido en aire (c_i) [m/s]	344.42
Promedio de lecturas trayectoria 1 [μ s]	929.78
Promedio de lecturas trayectoria 2 [μ s]	921.27
Promedio de lecturas trayectoria 3 [μ s]	895.00
Promedio de lecturas trayectoria 4 [μ s]	920.53
Trayectoria acústica d1 [cm]	32.02
Trayectoria acústica d2 [cm]	31.73
Trayectoria acústica d3 [cm]	30.83
Trayectoria acústica d4 [cm]	31.70
Diferencia de distancia 1 [cm]	0.52
Diferencia de distancia 2 [cm]	0.23
Diferencia de distancia 3 [cm]	-0.27
Diferencia de distancia 4 [cm]	0.60

Figura 12

Ángulo de velocidad del viento medido por anemómetro ultrasónico



- Área de contracción 3 a 10 veces mayor que cámara de pruebas y ángulo menor a 30°.
- Difusor con relación de área no mayor 1:6 y ángulo menor a 7°
- Área de prueba mínimo del cuadrado del objeto.
- Suficientemente largo para contener la trayectoria ultrasónica del instrumento y este abarque máximo 5 % del área transversal de prueba (recomendación de ASTM D6011).
- Seleccionar fuente de viento con base a geometría, relación de caudal y velocidad máxima de área de prueba (cálculo de caudal y flujo másico).
- Ventilación mediante impulso o aspiración.
- Utilizar una rejilla o panel hexagonal para tener un flujo laminar (opcional)

El túnel construido tiene un área transversal de 30x50 cm, en este se colocó el prototipo en su interior cuyos arreglos ultrasónicos no son mayores a 2x2 cm y dimensiones de 20x38 cm. Se construyó a partir de madera plywood de 6 mm y se agregó una ventanilla acrílica de 20x25 cm para observar su interior. Con un ventilador comercial al inicio del túnel con velocidades de hasta 2.0 m/s se realizaron las pruebas preliminares, además se añadió una rejilla de 1x1 cm para mejorar la estabilidad del

flujo. El túnel es económico y cumple la función para pruebas preliminares, sin embargo, con un túnel profesional las pruebas pueden ser más rigurosas y versátiles, debido a su alto costo se realizó la versión casera tomando las recomendaciones y permitiendo colocar el prototipo en su totalidad.

La prueba consistió en tomar 3 lecturas de control en viento estático y luego tomar lecturas con un viento constante, girando el equipo a prueba en un rango de $\pm 60^\circ$, con cambios de 10° . Se aplicó una velocidad de viento promedio de 1.5 m/s en el interior del túnel, colocando el instrumento con viento a favor del Norte (0° en la programación interna) y cada 30 segundos (3 lecturas) se giró el instrumento, los resultados se aprecian en las gráficas siguientes.

Como se evidencia en la Figura 11, los datos se mantienen relativamente estables alrededor del valor de 1.5 m/s, las mediciones fuera de rango se deben al movimiento del dispositivo para girar los ángulos y turbulencia al usar un túnel de viento casero para las pruebas, eso explica también los cambios de ángulos que causaron un error de 30 %, en condiciones estables y con vientos más consistentes se espera el error disminuya. El error estándar de las mediciones de velocidad respecto a las mediciones de control es de 3 % con una precisión de ± 0.47 . En una prueba fuera de

norma para comprobar la dirección angular se mantuvo estático el instrumento y se implementó una ráfaga cambiante en ángulos de 45° de la misma velocidad, el error angular disminuyó a 21 % mientras que la medición de velocidad se mantuvo como el proceso normado.

Se añaden a las pruebas del prototipo las lecturas de los demás sensores utilizados, la temperatura y humedad se realizaron en la misma habitación interna con viento estático (Figura 13).

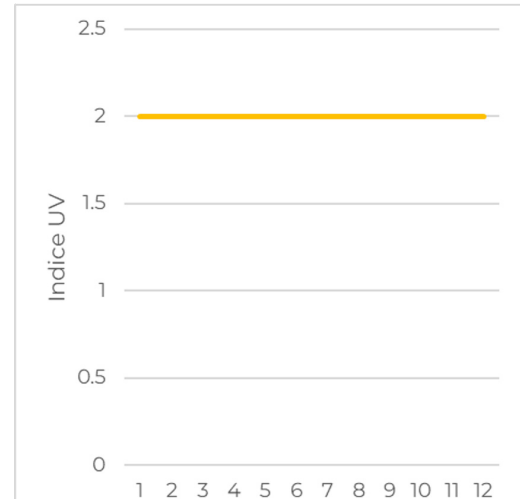
La variación de los sensores adicionales es pequeña, además que las lecturas concuerdan con datos meteorológicos de referencia medidos localmente de una temperatura aproximada de 28.4 °C y una humedad relativa de 68 %. Para realizar la medición de Índice UV se llevó el prototipo al exterior para tomar datos de Índice UV (Figura 14).

El índice UV se mantuvo constante en un valor de 2, por lo que el riesgo a la salud durante la medición realizada es bajo, esta medida se llevó a cabo a las 9 a. m. cuando el índice es usualmente bajo durante estas horas del día.

Para revisar la capacidad de comunicación inalámbrica se programó la placa ESP8266 con

Figura 14

Índice UV medido por anemómetro ultrasónico



las credenciales del router al que se conectó el servidor local, colocándose el instrumento a 10 m de distancia del router. Para comprobar si la conexión se establece y los datos se guardan en la base de datos el ESP8266 imprime las siguientes líneas en el monitor serial de Arduino (Figura 15).

El servidor retorna el código HTTP 200, código de respuesta satisfactorio, en el cual todos los procesos de envío y almacenamiento de datos, en el caso del prototipo y servidor desarrollados,

Figura 13

Temperatura y humedad medidos por anemómetro ultrasónico

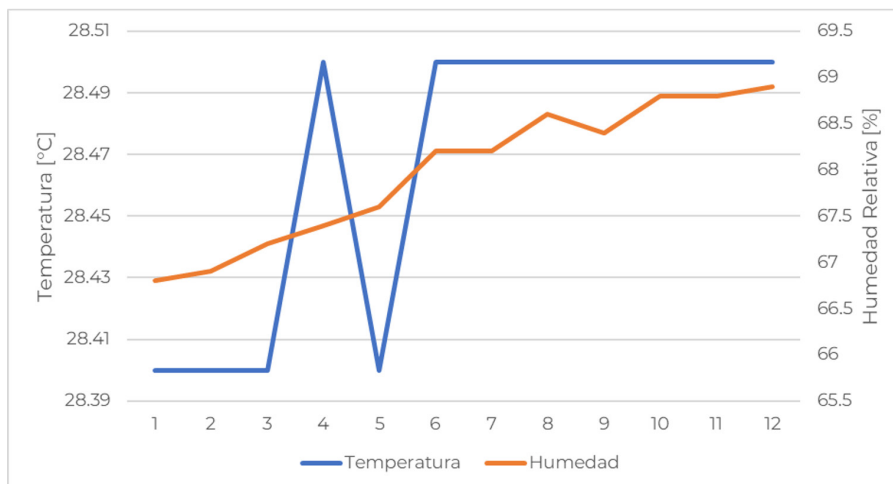


Figura 15

Conexión de ESP8266 a router y servidor local, respuesta del servidor

```

.....Conexión OK!
IP Local: 192.168.1.17
Noreste Ninguno
Código HTTP: 200
El servidor respondió:

Conexion con base de datos exitosa! Estación meteorológica
  
```

han ocurrido correctamente (MDN contributors, 2023). Revisando la base de datos se comprobó que los datos llegaron correctamente y la interfaz los presenta adecuadamente. Los datos se envían, almacenan y presentan en intervalos de 15 segundos.

Para este punto del proyecto aún no se han realizado las pruebas EMI de radiación emitida e inmunidad para el instrumento, sin embargo, con base a la FCC 15 y los datos de placa, este no debería causar interferencias severas a otros dispositivos, por lo que la emisión no debería ser problema, la prueba de inmunidad únicamente con el equipo apropiado puede realizarse.

CONCLUSIONES

El total final del costo, contando componentes electrónicos y piezas estructurales, fue aproximado a USD 218.00, siendo los mayores costos la placa Arduino Mega y las piezas a medida fabricadas. Comparado a los precios de anemómetros fabricados en el extranjero es una disminución entre el 0 % y 45 % al oscilar entre USD 200 a USD 400.

El prototipo construido presentó un error de 3 % en la magnitud de velocidad aplicada y un 30 %-21 % para el ángulo adecuado para representar la dirección cardinal apropiada, a pesar del error angular captada esto fue causado por la manipulación del instrumento para realizar giros manuales y la sensibilidad de los sensores. Se espera que con mediciones de

largos periodos este error se atenúe.

Mediante una prueba de conexión se comprobó que el instrumento es capaz de enlazarse a la red y enviar la información a la base de datos desarrollada, además de realizar nueva transmisión en periodos cortos de de 15 segundos. Con esto se han sentado las bases para incluir el anemómetro ultrasónico a una red IoT local como un sensor ambiental.

Debido a la situación de construcción y mejoramiento de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, además de la inhabilitación del espacio destinado a la Escuela de Ingeniería Eléctrica la mayoría del proyecto tuvo que realizarse fuera de las instalaciones con instrumentos construidos por cuenta propia o equivalentes más económicos para las pruebas realizadas.

Para el desarrollo de estos instrumentos es recomendable la participación de otras áreas de conocimiento como la meteorología y la aerodinámica, cuyos conocimientos permitirán una mejor evaluación de diseños y prototipos creados y orientados a estas aplicaciones.

Como prototipo preliminar se logró realizar un anemómetro funcional con mediciones aceptables en pruebas de laboratorio, además de la inclusión de otros sensores y la habilitación de comunicación WiFi para sentar las bases de IoT. Otros sensores o dispositivos pueden incorporarse a futuro como un data logger o una alimentación mediante paneles fotovoltaicos y baterías.

La selección de materiales se hizo con base a la disponibilidad y precio, además de las características específicas para este prototipo inicial. Para evaluar su duración se necesita una prueba en campo de larga duración, así como, para una versión más comercial se recomienda el uso de 1 solo material como puede ser el ABS mencionado a lo largo de este artículo.

REFERENCIAS

- Abdul Haseeb, & Raja Asim. (2019). ULTRASONIC ANEMOMETER DESIGN AND TESTING IN WIND TUNNEL. USAID. https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PA00TXG6.pdf.
- Adi Kuncara, I., Endro Suseno, J., Agus, S., & Gunadi, I. (2020). Development of Ultrasonic Anemometer Using HC-SR04 with Kalman Filter Based on Microcontroller Integrated IoT. *E3S Web of Conferences*, 202. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020215011>
- AdrecoPlastics. (s.f.). *ABS Plastic Properties | Great Advantages Of Acrylonitrile Butadiene Styrene*. AdrecoPlastics. de <https://adrecoplastics.co.uk/abs-plastic-properties/>
- AFAR Communications, I. (s.f.). *FCC Rules for Unlicensed Wireless Equipment operating in the ISM bands*. <https://afar.net/tutorials.fcc-rules/>
- Bottomley, A. S. (2015, septiembre 19). *Homemade Stevenson Screen For A Home Weather Station*. <https://aaybee.com.au/StevensonScreen.html>
- Alba Ambiente S.A. (s.f.). *Anemómetro ultrasónico 2D | Detectores y Sensores*. <https://www.detectores.cl/tienda/anemometro-ultrasonico-2d-dos-salidas-0-20-ma/>
- Alibaba. (s.f.). *Buy Wholesale ultrasonic anemometer For Various Purposes*. Alibaba. Recuperado el 15 de noviembre de 2023, de <https://www.alibaba.com/showroom/ultrasonic-anemometer.html>
- Robledano, A. (2019, septiembre 24). *Qué es MySQL: Características y ventajas | OpenWebinars*. OpenWebinars. <https://openwebinars.net/blog/que-es-mysql/>
- Arduino. (2023). *Arduino® MEGA 2560 Rev3*. [Hoja de Datos]. <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>
- Arduino. (s.f.). *analogRead() - Arduino Reference*. <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/analog-io/analogread/>
- Arrow Electronics, Inc. (2017, diciembre 22). *Guía de comparación de las placas Arduino*. Arrow. <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/arduino-uno-vs-mega-vs-micro>
- ASTM International. (2022). *Standard Test Method for Determining the Performance of a Sonic Anemometer/Thermometer D6011-96 (2022)*. [Norma Técnica] ASTM International. <https://www.astm.org/d6011-96r22.html>
- Cables RCT. (2021). *Las interferencias electromagnéticas*. Cables RCT. <https://www.cablesrct.com/blog-cables-rct-es/2681-las-interferencias-electromagneticas>
- Cámara Valencia. (s.f.). *Dispositivos (I) Internet de las cosas (IoT): Capítulo 14 | Guía de Industria 4.0*. Tecnología para los Negocios. <https://ticnegocios.camaravalencia.com/servicios/tendencias/caminar-con-exito-hacia-la-industria-4-0-capitulo-14-dispositivos-i-internet-de-las-cosas-iot/>
- Centro De Aseroria Dr. Ferrer, S. L. (s.f.). *Sensor de Radiación Ultravioleta UV*. Labferrer. <https://www.lab-ferrer.com/sensor-de-radiacion-ultravioleta-uv/>
- Components101. (2018, marzo 19). *DHT22 Sensor Pinout, Specs, Equivalents, Circuit & Datasheet*. Componentes101. [Hoja de Datos]. <https://components101.com/sensors/dht22-pinout-specs-datasheet>
- Cyro. (2001). *Physical Properties of Acrylite FF Acrylic sheet*. [Hoja de Datos].

- <https://www.professionalplastics.com/professionalplastics/content/AcrylicFFDataSheet.pdf>
- Pampliega Ruiz, D. (2008). *Apéndice B Filtro de Kalman*. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11611/fichero/Memoria%252FAp%C3%A9ndice+B++El+Filtro+de+Kalman.pdf>
- Lázaro, D. (2018). *GET y POST en PHP*. <https://diego.com.es/get-y-post-en-php>
- Armstrong, D. (2021, noviembre 20). *Cómo proteger tubos de PVC de los rayos UV*. eHowenespañol. https://www.ehowenespanol.com/proteger-tubos-pvc-rayos-uv-como_81597/
- Ebay.(s.f.).*anemometro ultrasonico for sale*.Ebay. Recuperado el 15 de noviembre de 2023, de https://www.ebay.com/sch/i.html?_from=R40&_trksid=p2332490.m570.l1313&_nkw=anemometro+ultrasonico&_sacat=0
- Elecfreaks. (s.f.). *Ultrasonic Ranging Module HC-SR04*. [Hoja de Datos]. <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>
- Electrónica Steren, S. A. D. C. V. (s.f.). *Medidor digital de flujo y velocidad de aire (Anemómetro)*. Steren., de <https://www.steren.com/sv/medidor-digital-de-flujo-y-velocidad-de-aire-anemometro.html>
- Caneppele, E. (2022, junio 23). *Anemómetro: ¿qué es y cómo funciona?* Windowo. <https://www.windowo.es/blog/anemometro>
- Endeavor Business Media, LLC. (2019, febrero 19). *What are the ISM Bands, and What Are They Used For?*. Military Aerospace Electronics. <https://www.militaryaerospace.com/directory/blog/14059677/what-are-the-ism-bands-and-what-are-they-used-for>
- Ensinger. (s.f.). *Plásticos de ingeniería*. <https://www.ensingerplastics.com/es-br/semielaborados/plasticos-de-ingenieria>
- Peña, E. & Legaspi, M. G. (2020, diciembre). *UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*. Analog Devices. <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/uart-a-hardware-communication-protocol.html>
- Espressif Inc. (2017). *esp8266_wi-fi_channel_selection_guidelines_en*. [Hoja de Datos]. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266_wi-fi_channel_selection_guidelines_en.pdf
- Espressif Inc. (2023). *ESP8266EX*. [Hoja de Datos]. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266_wi-fi_channel_selection_guidelines_en.pdf
- Maloy Smith, G. (2020, abril 3). *Que es un data logger - la última guía*. Dewesoft. <https://dewesoft.com/es/blog/que-es-un-data-logger>
- Great Canadian Kite Company. (2016, noviembre 18). *What is a Wind Shadow and how it impacts Kites*. Great Canadian Kite Company. <https://www.canadiankitecompany.com/blogs/tie-to-the-sky/what-is-a-wind-shadow-and-how-it-impacts-kites>
- Hunan Rika Electronic Tech Co., Ltd. (2020, febrero 20). *Working Principle And Features Of Ultrasonic Wind Speed Sensor*. Rika. <https://www.rikasensor.com/working-principle-and-features-of-ultrasonic-wind-speed-sensor.html>
- IEEE Standards Association (IEEE SA). (2023, marzo 16). *IEEE SA - The Evolution of Wi-Fi Technology and Standards*. <https://standards.ieee.org/beyond-standards/the-evolution-of-wi-fi-technology-and-standards/>

- International Electrotechnical Commission. (s.f.). *IP ratings*. International Electrotechnical Commission. <https://www.iec.ch/ip-ratings>
- International Electrotechnical Commission. (2020, septiembre 8). *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-3 : Testing and measurement techniques - Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test*. (IEC 61000-4-3). <https://webstore.iec.ch/publication/59849>
- International Polymer Solutions Inc. (s.f.). *Typical properties of pvc and cpvc*. <https://www.ipolymer.com/pdf/PVC.pdf>
- Canal ItMightBeWorse. (2017, julio 23). *Building homemade ultrasonic air flow measurement device*. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=BNTSSxzm1GM>
- Itrium. (2020). *Sonic Anemometer*. Autodesk Instructables. <https://www.instructables.com/Sonic-Anemometer/>
- LAPIS Semiconductor Co., Ltd. (2013). *ML8511 UV Sensor with Voltage Output*. [Hoja de Datos]. https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/LightImaging/ML8511_3-8-13.pdf
- MadeinWeb & Mobile. (2022, febrero 10). *Aplicaciones IoT: qué son y cómo funcionan*. MadeinWeb . <https://www.madeinweb.es/aplicaciones-para-iot/>
- Ligon, M. (2013, octubre 22). *What Are the Effects of Sunlight on PVC? Is It UV Resistant?* Commercial Industrial Supply. <https://www.commercial-industrial-supply.com/resource-center/what-are-the-effects-of-sunlight-on-pvc/>
- masterDbplus. (2017, julio 19). *¿Cómo afecta la temperatura a la propagación del sonido?* dBplus. <https://www.dbplusacoustics.com/temperatura-ruido/>
- Burkhalter, M. (2020, octubre 3). *The IoT brings convenience and accuracy to meteorology*. Perle. <https://www.perle.com/articles/the-iot-brings-convenience-and-accuracy-to-meteorology-40188568.shtml>
- MDN contributors [Denvery, sideshowbarker, fscholz, teloi]. (2023, abril 10). *200 OK - HTTP | MDN*. mdn web_docs. <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTTP/Status/200>
- Moreno-Garibaldi, P., Dávila-Carmona, B., José, A. S.-C., Cervantes-Vázquez, M., Ángel Munive-Rojas, M., & Corro-Valdez, N. (2014). *Diseño y manufactura de túnel de viento subsónico de circuito abierto*. 18(3), 107–111. <https://www.redalyc.org/pdf/614/61448036004.pdf>
- nagibvalejos. (2020, julio 31). *Robotics-Space-NV/Arduino I/Sesión 14/S14.pdf*. GitHub. <https://github.com/nagibvalejos/Robotics-Space-NV/blob/master/Arduino%20I/Sesi%C3%B3n%2014/S14.pdf>
- Weis, O. (2020, octubre 19). *Diferencia entre RS232 y RS485 - casos de uso y tecnología*. Virtual Serial Port. <https://www.virtual-serial-port.org/es/article/what-is-serial-port/rs232-vs-rs485.html>
- Olivia.(s.f.). *Red de Área Local (LAN)*. Recuperado el 16 de noviembre de 2023, de <https://www.oliviawireless.es/glosario-de-iot/red-de-rea-local>
- OMS. (2002). *Global Solar UV Index A Practical Guide*. *World Health*, 18. https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/doc/sanidad/samb/guia_oms_indice_radiacion_ultravioleta.pdf
- OMS. (2022, junio 21). *Radiación ultravioleta*. Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact->

- sheets/detail/ultraviolet-radiation
- PCE Instruments. (s.f.). *Estación meteorológica WatchDog*. <https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/logger-datos/logger-datos-watchdog-500.htm>
- Pindado, S., Barrero-Gil, A., & Sanz, A. (2001). *Cup Anemometers' Loss of Performance Due to Ageing Processes, and Its Effect on Annual Energy Production (AEP) Estimates*. 5, 1664–1685. <https://doi.org/10.3390/en5051664>
- rafaella-ballerini. (2021, julio 23). *HTML, CSS y Javascript, ¿cuáles son las diferencias?*. Alura Latam. <https://www.aluracursos.com/blog/html-css-javascript-cuales-son-las-diferencias>
- Rafi, A., Tahtawi, A., & Filter, K. (2018). Kalman Filter Algorithm Design for HC-SR04 Ultrasonic Sensor Data Acquisition System. *IJITEE*, 2(1).
- Rahul Awati. (2023, marzo). *What is event stream processing? – TechTarget Definition*. TechTarget. <https://www.techtarget.com/searchitoperations/definition/event-stream-processing-ESP>
- Red Hat, Inc. (2023, enero 20). *¿Qué es el Internet de las cosas (IoT) y cómo funciona?*. RedHat. <https://www.redhat.com/es/topics/internet-of-things/what-is-iot>
- SignalBoosters. (2022, marzo 23). *The Top 12 Materials that Block WiFi Signals*. SignalBoosters. <https://www.signalboosters.com/blog/materials-that-block-wifi-signals/>
- SparkFun Electronics. (s.f.). *ML8511 UV Sensor Hookup Guide*. SparkFun Learn. <https://learn.sparkfun.com/tutorials/ml8511-uv-sensor-hookup-guide/all>
- SyBridge Technologies. (2021, mayo 13). *These are the Five Best UV-Resistant Plastics on the Market Today - SyBridge Technologies*. <https://sybridge.com/top-uv-resistant-plastics/>
- Trans-African Hydro-Meteorological Observatory (TAHMO). (s.f.). *Wind Speed vs Temperature: Teacher Guide*. 2020. <https://tahmo.org/wp-content/uploads/2020/05/12.wind-speed-vs-temp.pdf>
- Trimble Inc. (s.f.). *Software de diseño 3D / Modelado 3D en la web*. SketchUp. Recuperado el 14 de junio de 2023, de <https://www.sketchup.com/es>
- Viñas, J. M. (2020, marzo 20). *Origen y evolución del anemómetro*. Meteored tiempo. <https://www.tiempo.com/noticias/ciencia/origen-y-evolucion-del-anemometro-que-es.html>