 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Diseño e implementación de un anemómetro usando sensores ultrasónicos

Elizabeth Ospina Rojas

Ingeniería Mecatrónica

Director:

Juan Sebastián Botero Valencia

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Noviembre de 2021

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

La velocidad del viento es una variable física que mide horizontalmente el desplazamiento del aire en un punto determinado. Su medición es fundamental en el análisis climático, meteorológico y también como medida derivada para el procesamiento de datos ambientales y en agricultura de precisión. El instrumento con el que se mide la velocidad del viento es un anemómetro y actualmente el método de medición más utilizado implica el uso de sistemas mecánicos que se ven afectados con el tiempo por el desgaste y rozamiento, entre otros. Por esta razón, en este trabajo se diseñó e implementó un anemómetro ultrasónico, que se fundamenta en los principios físicos del comportamiento de las ondas mecánicas en el aire. Para esto, se enfrentan dos pares de emisores-receptores ultrasónicos, que mantienen una distancia fija entre sí, en calma (velocidad = 0m/s), las ondas viajan directamente y solo se ven afectadas por cambios de temperatura, pero cuando la velocidad del viento que atraviesa el sistema es diferente de 0 m/s, el tiempo de vuelo de las ondas cambia y consecuentemente, permite estimar la velocidad del mismo. Para la implementación del sistema, se usaron sensores-actuadores ultrasónicos piezoeléctricos, una etapa de amplificación y microcontrolador para procesar los flancos de las señales. Los resultados muestran, que se puede medir la velocidad del viento con un error cercano a los 0.14 m/s. Este tipo de iniciativas, busca el desarrollo de sensores de menor costo, que permita el despliegue de los mismos a mayor escala y acercar sectores como el agrícola a tecnologías que permitan aumentar su productividad.

Palabras clave: Anemómetro, Internet de las Cosas (IoT), sistema embebido, ultrasónico, velocidad del viento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Quiero extender un profundo agradecimiento a mis padres, quienes me apoyaron incondicionalmente y fueron fuente de inspiración en etapas cruciales de mi carrera, a mi hermana, que siempre estuvo para brindarme palabras de aliento y fue una compañía en momentos difíciles, a mis compañeros, quienes también aportaron a mi aprendizaje, también quiero agradecer a mi asesor de tesis, el Dr. Juan Sebastián Botero Valencia por ser un guía en este proceso y a quien le debo gran parte de mi formación.

Este proyecto contó con el apoyo del Grupo de Sistemas de Control y Robótica (GSCR) COL0123701, fue desarrollado en el Laboratorio de Sistemas de Control y Robótica, adscrito al Instituto Tecnológico Metropolitano y en el marco del programa "Sistemas inteligentes para el monitoreo de cultivos agrícolas permanentes y transitorios" (70107), y el proyecto "IoT para el monitoreo de variables agroclimáticas en cultivos agrícolas permanentes y transitorios" (70706).

	<p style="text-align: center;">INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</p>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

ToF Tiempo de vuelo (del inglés “Time of Flight”).

MCU Microcontrolador (del inglés “Microcontroller unit”).

MPU Microprocesador (del inglés “Microprocessor unit”).

IoT Internet de las cosas (del inglés “Internet of Things”).

GPIO Entrada/salida de propósito general (del inglés “General Purpose Input/Output”).

ADC Conversor Analógico Digital (del inglés “Analog to Digital Converter”).

DAC Conversor Digital Análogo (del inglés “Digital to Analog converter”).

MUX Multiplexor.

DEMUX Demultiplexor.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1.1 Generalidades	6
1.1.1 Justificación	6
1.1.2 Planteamiento del problema	6
1.2 Objetivos	7
1.2.1 Objetivo general	7
1.2.2 Objetivos específicos	7
1.2.3 Organización de la tesis	7
2.1 Información de la medida	8
2.2 Principio de funcionamiento del sensor	11
2.3 Descripción del ESP32	13
2.4 Estado del arte	14
3.1. Diseño mecánico	16
3.2. Diseño electrónico	16
4.1 Ensamble final	20
4.2 Pruebas de validación	21
5.1 Conclusiones	27
5.2 Recomendaciones	28
5.3 Trabajo futuro	28

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

1.1.1 Justificación

Conocer la velocidad del viento puede ser un factor determinante en aplicaciones relacionadas con la generación de energía eólica, medios aéreos de transporte, actividades agrícolas, entre otros. Como el viento es una magnitud vectorial se requiere tener dos medidas para poder caracterizarlo, esto es: su velocidad y su dirección, para esta tarea se emplean los anemómetros que son instrumentos que permiten medir la dirección y velocidad del viento en un espacio determinado.

Los más comunes son los anemómetros mecánicos, éstos presentan la desventaja de que necesitan un constante mantenimiento debido a que poseen partes móviles que son susceptibles al desgaste, además, al ser instrumentos que deben permanecer en espacios abiertos, pueden sufrir daños ocasionados por elementos o animales.

1.1.2 Planteamiento del problema

En este proyecto se propone el diseño y la implementación de un anemómetro basado en sensores ultrasónicos, este tipo de instrumentos de medición presentan la ventaja de que tienen alta precisión debido a que el principio de funcionamiento se fundamenta en la lectura del tiempo que tardan las ondas ultrasónicas en viajar dentro del sistema, además, no presentan partes móviles, por lo que el costo de manufactura y mantenimiento es bajo y su implementación en la intemperie no representa ningún tipo de riesgo. Este anemómetro puede ser utilizado como instrumento de medida en estaciones meteorológicas de la ciudad de Medellín y como apoyo en estudios investigativos sobre el recurso eólico en zonas potenciales para la generación de energía eólica. La estructura que compone el anemómetro, a partir de materiales plásticos resistentes a la humedad y radiación solar, permite que sea fácil de transportar e instalar y que el funcionamiento de este no se vea afectado por condiciones climáticas adversas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un instrumento de medición de la velocidad del viento que no lleve partes móviles, basado en la lectura del tiempo de vuelo de ondas ultrasónicas por medio de sensores, más conocido como anemómetro ultrasónico.

1.2.2 Objetivos específicos

- Investigar el principio de funcionamiento de los sensores ultrasónicos para mediciones de velocidad del viento.
- Implementar el circuito electrónico para procesar las señales recibidas de los sensores.
- Implementar el algoritmo de programación para controlar las entradas y salidas de los sensores y realizar el cálculo perteneciente de la velocidad del viento.
- Implementar la estructura física que soportará los sensores.
- Someter el anemómetro ultrasónico a una fase de pruebas en un ambiente controlado con vientos de distintas velocidades donde también se implementará un anemómetro comercial de la referencia UNI-T UT362 para analizar la respuesta que tienen ambos instrumentos.
- Comparar las mediciones obtenidas a partir del anemómetro ultrasónico con las obtenidas del anemómetro de referencia UNI-T UT362 utilizando herramientas matemáticas para determinar el error del proyecto propuesto.

1.2.3 Organización de la tesis

Inicialmente se presenta un marco teórico en donde se expone el principio de funcionamiento del anemómetro ultrasónico, así como generalidades sobre el sensor y el microcontrolador implementado y un estado del arte. En la siguiente sección se encuentra la metodología en donde se resaltan el diseño mecánico y electrónico, finalmente se muestran los resultados, conclusiones y recomendaciones.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Información de la medida

La medida de la velocidad del viento puede tomarse a partir del comportamiento que tienen las ondas sonoras al propagarse por un medio, en este caso el aire, en donde también interfieren la temperatura y la presión (Chandran, Bhakthavatchalu, and Kumar 2017).

Los anemómetros ultrasónicos se basan en el fundamento de que el tiempo requerido para que una onda ultrasónica viaje entre dos puntos se ve afectada por la velocidad del viento (Yadav, Sinha, and Khosla 2017), es decir que las ondas sonoras llegarán más rápido si se mueven en la misma dirección a la que viaja el viento y llegarán más lento si viajan en la dirección opuesta.

Para calcular la velocidad del viento V_w basado en ondas ultrasónicas es necesario entender el concepto de Time of Flight (ToF) que hace referencia al tiempo que se demora una onda sonora en viajar desde un punto A hasta un punto B, conociendo esta medida de tiempo y la distancia d entre los puntos A y B se puede hallar la velocidad de transmisión de la onda sonora V_s .

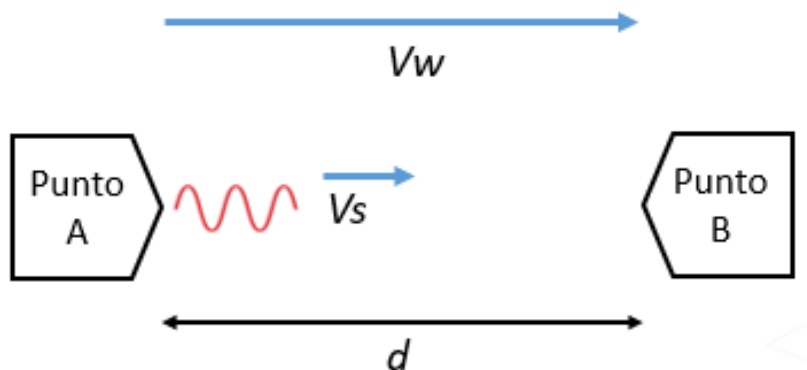


Figura 1. Esquema de propagación de ondas sonoras.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-2 2

Para obtener la velocidad de transmisión de la onda sonora se puede acudir al concepto de velocidades relativas (FLORES ALEXANDRA and MENESES DIEGO 2010), obteniendo entonces la siguiente expresión:

$$V_s = c + V_w = \frac{d}{T_{oF}} \quad (1)$$

Donde:

V_s es la velocidad de viaje de la onda sonora [m/s]

c es la velocidad del sonido [m/s]

V_w es la velocidad del viento [m/s]

d es la distancia entre los puntos A y B por los que viaja la onda sonora [m]

T_{oF} es el tiempo que tarda la onda en viajar desde el punto A al punto B [s]

Como lo que se busca es medir la velocidad del viento y esta se mueve en distintas direcciones, se propone un arreglo de cuatro sensores ultrasónicos, cada uno situado en un punto cardinal: norte, sur, este y oeste, con el fin de obtener valores para la velocidad del viento en las direcciones sur-norte y este-oeste.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

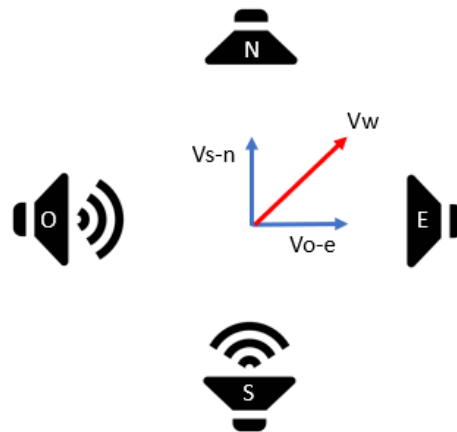


Figura 2. Arreglo de los sensores ultrasónicos en los puntos cardinales.

En este arreglo de cuatro sensores se envía una onda ultrasónica en la dirección sur-norte y en la dirección oeste-este, lo que permite determinar la velocidad de propagación de la onda en dos direcciones así como la velocidad del viento en las componentes cartesianas X y Y. De este modo se obtienen las siguientes expresiones:

$$V_{sn} = c + V_{wx} = \frac{d}{T_{sn}} \quad (2)$$

$$V_{oe} = c + V_{wy} = \frac{d}{T_{oe}} \quad (3)$$

Donde:

V_{sn} es la velocidad de viaje de la onda sonora en el sentido sur - norte [m/s]

V_{oe} es la velocidad de la onda sonora en el sentido oeste - este [m/s]

V_{wx} es la velocidad del viento en la dirección X del plano cartesiano [m/s]

V_{wy} es la velocidad del viento en la dirección Y del plano cartesiano [m/s]

T_{sn} es el ToF de la onda en el sentido sur - norte [s]

T_{oe} es el Tof de la onda en el sentido oeste - este [s]

Finalmente, resolviendo para las expresiones (2) y (3) y despejando para la velocidad del viento V_{wx} y V_{wy} se obtiene:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$V_{wx} = \frac{d}{T_{sn}} - c \quad (4)$$

$$V_{wy} = \frac{d}{T_{oe}} - c \quad (5)$$

Se puede determinar el módulo para la velocidad del viento V_w así como su ángulo a partir de las ecuaciones:

$$V_w = \sqrt{V_{wx}^2 + V_{wy}^2} \quad (6)$$

$$\phi = \arctg \frac{V_{wy}}{V_{wx}} \quad (7)$$

La velocidad del sonido c depende de la temperatura del aire T (Bucci et al. 2013) y puede ser representada por la siguiente expresión:

$$c = 331.4 + 0.62 * T \quad (8)$$

2.2 Principio de funcionamiento del sensor

El sensor ultrasónico implementado en este proyecto es el JSN-SR04T cuyo principal uso es como detector de distancias, pudiendo medir de 20 cm a 4.5 m aproximadamente. Posee la ventaja de tener una configuración a prueba de agua por lo que es seguro emplearlo expuesto al ambiente.



Figura 3. Sensor ultrasónico JSN-SR04T.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El principio de funcionamiento de los sensores ultrasónicos se basa en la transmisión y recepción de ondas ultrasónicas, superiores a los 16 KHz, por lo que no son audibles para las personas. El transductor que compone el sensor contiene un elemento piezoeléctrico que, al recibir una entrada eléctrica, produce ultrasonidos que son propagados por el ambiente. La onda ultrasónica emitida, conocida como *Trigger*, viaja hasta colisionar contra la superficie de algún objeto o sustancia, cuando esto sucede la onda es reflejada de manera que retorna hacia el transductor nuevamente, esta onda de retorno es conocida como *Echo*. Es así como el sensor se encarga de calcular el tiempo de vuelo (Tof) que hay entre la transmisión del Trigger y la recepción del Echo, y bajo esta medida calcular cuál fue la distancia total recorrida por la señal.

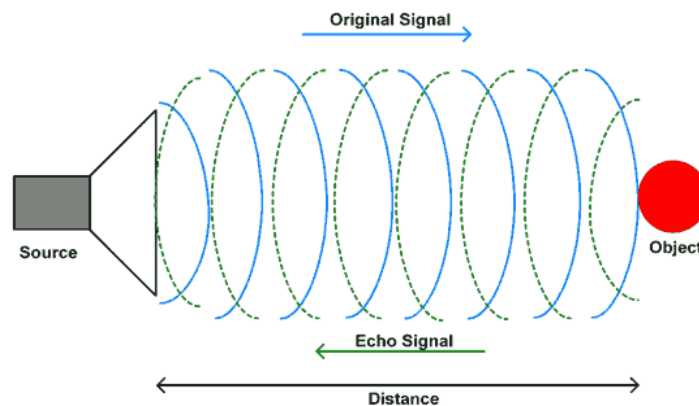


Figura 4. Señales Trigger y Echo de un sensor ultrasónico.

Para el proyecto se usa el transductor del JSN-SR04T tanto para generar señales ultrasónicas como para recibirlas, el propósito es enviar desde un transductor una señal ultrasónica con 16 pulsos a 40kHz y recibir esta misma desde otro transductor situado enfrente, esto con el fin de capturar el tiempo que tarda la onda sonora en viajar entre ellos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3 Descripción del ESP32

El microcontrolador (MCU) empleado para capturar el ToF del sistema, y a partir de allí calcular la velocidad del viento, será el ESP32. Cuyo objetivo principal es emitir la señal Trigger hacia los transductores y detectar la señal Echo proveniente de los mismos.

ESP32 hace referencia a una familia de microcontroladores pertenecientes a la empresa Espressif Systems. Esta tarjeta de desarrollo se basa en el microprocesador (MPU) Tensilica Xtensa LX6 de dos núcleos de procesamiento, su bajo consumo energético la hace ideal para aplicaciones de Internet de las Cosas (IoT) además de que tiene tecnología WI-FI y BLUETOOTH integrada.

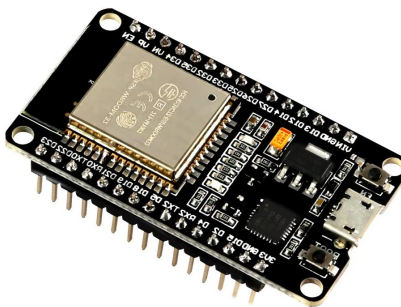


Figura 5. Tarjeta de desarrollo ESP32.

La ESP32 posee las siguientes características:

Características	ESP32
Voltaje de entrada	2.3 v - 3.6 v
WI-FI	HT40
BLUETOOTH	4.2 y BLE
Frecuencia de operación	240 Mhz
Pines de propósito general (GPIO)	34
Convertor Analógico Digital (ADC)	12 bits
Convertor Digital Análogo (DAC)	8 bits

Tabla 1. Características ESP32.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-2 2

2.4 Estado del arte

Actualmente, el estudio de la medición de velocidad y dirección del viento es importante para desarrollar generadores eólicos con una alta eficiencia, dimensionar estructuras de edificios, protección de márgenes en embalses, etc (Dubov, Aprahamian, and Aprahamian 2019). El instrumento meteorológico que mide la velocidad del viento es el anemómetro, el cual se encarga de registrar la velocidad del viento en un punto determinado. Debido a problemas de mantenimiento, calibración e instalación de algunos anemómetros mecánicos convencionales, se han estado desarrollando e implementando otro tipo de instrumentos denominados anemómetros ultrasónicos de bajo costo para obtener una precisión más alta de la medida del viento.

Los anemómetros ultrasónicos se han utilizado en muchas aplicaciones de ingeniería en la actualidad. Algunos trabajos sobre el diseño e implementación de anemómetros ultrasónicos pueden encontrarse en (Electrica et al. 2007), (Bucci et al. 2013), (FLORES ALEXANDRA and MENESES DIEGO 2010), (Allotta et al. 2017). El factor común de estos trabajos es que son implementaciones de bajo costo, robustas y duraderas. Adicionalmente, la precisión alcanzable con este tipo de instrumentos supera parcialmente la de los métodos clásicos.

En el año 2017 Yadav y compañía (Yadav, Sinha, and Khosla 2017) diseñaron e implementaron un anemómetro ultrasónico de bajo costo de 2 ejes. Para la medición del viento los autores utilizan el tiempo de vuelo (TOF, por sus siglas en inglés de Time of Flight) y la detección de umbral es usada para detectar la señal ultrasónica. En este trabajo el tiempo de respuesta del prototipo implementado es de 43.74ms, lo cual significa que puede medir 20 lecturas en 1 segundo. Teniendo en cuenta que la medida de TOF es una métrica primordial de todo sistema que sirva para medir el viento, ya que puede utilizarse para determinar los componentes vectoriales tridimensionales del viento y a partir de estas obtener la velocidad y la dirección resultante del viento. Por ello, existen trabajos como en (Chandran, Bhakthavatchalu, and Kumar 2017) donde presentan un sistema para

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

medir el TOF utilizando múltiples sensores ultrasónicos, este sistema tiene una mayor precisión y un menor costo en comparación con los sistemas existentes. Como resultado obtienen un anemómetro ultrasónico que utiliza dos transceptores siendo este un factor muy importante.

Por otro lado, el consumo de energía de los anemómetros ultrasónicos es elevado, por esa razón se han encontrado trabajos como en (Fan, Liu, and Sun 2018), donde los autores construyen e implementan un anemómetro ultrasónico de bajo consumo de energía. Este instrumento puede funcionar en modo online o en modo autónomo. Los autores emplean algoritmos de filtro Kalman para reducir los errores en los datos y mejorar los errores del sistema. Como resultado se obtiene un consumo de potencia reducido en gran medida. Del mismo modo, en el año 2018 Wardkein y compañía (Wardkein and Prasertkul 2018) presentan un anemómetro ultrasónico en el que emplean el filtro de Kalman para estimar la señal de la salida y disminuir el ruido de la señal obtenida. Después de realizar el experimento y procesamiento de los datos, los autores demuestran que el modelo puede medir la velocidad del viento del viento de 1,0 m/s a 11,5 m/s con un error del 8.34%. Otro trabajo en el que se destaca el uso del filtro de Kalman para reducir el ruido es el de los autores en (Adi Kuncara et al. 2020). En este trabajo se ha integrado el sistema con Internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés de Internet of Things). El error de medición del anemómetro propuesto es inferior al 1.5%. Adicionalmente, resaltan que los resultados de la calibración del anemómetro ultrasónico tienen una resolución de medición de la velocidad del viento de 0,1 m/s con un error de medición de 0,14 m/s. Este trabajo se enfoca en el diseño e implementación de un anemómetro ultrasónico de bajo coste y bajo consumo de potencia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

3.1. Diseño mecánico

La estructura mecánica debe garantizar que los cuatro sensores se ubiquen a la misma distancia, es decir, que cada par de sensores norte - sur y este - oeste se encuentren a una distancia de 20 cm con el fin de no tener errores en la medida, además, debe ser compacto y fácil de transportar e instalar.

Al ser un dispositivo que estará sometido a la intemperie y a los cambios ambientales debe ser resistente al agua y a la radiación solar, por lo que el material que conforma su estructura debe ser debidamente seleccionado, en este caso se usaron piezas de pvc para soportar los sensores y una caja hermética para resguardar toda la electrónica.

3.2. Diseño electrónico

El sistema del anemómetro ultrasónico se compone de cuatro transductores, ubicados cada uno en uno de los puntos cardinales: norte, sur, este, oeste; de los cuales, los transductores posicionados en los puntos sur y oeste son los transmisores encargados de emitir las señales ultrasónicas, mientras que los transductores situados en las posiciones norte y este son los receptores de dichas ondas.

Los sensores se activan cuando reciben una señal entrada emitida por la ESP32, esta es una señal cuadrada de 40 khz formada por 16 pulsos, que es recibida por el transductor y propagada por el ambiente (trigger), los transductores receptores captan esta señal y emite una salida en forma de onda sinusoidal (echo).

En el momento en el que la ESP32 emite la señal trigger, un temporizador del MCU se activa y empieza a contar el ToF hasta que la señal de echo es detectada por un pin de interrupción externa programado para este propósito, se presenta la estructura básica de funcionamiento:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

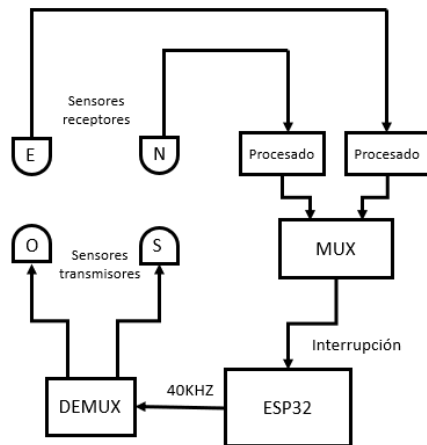


Figura 6. Esquema de funcionamiento.

Cuando un transductor emite la señal trigger de 40 KHz propagándose por el aire, el transductor receptor ubicado en frente de este detecta esa señal emitiendo la señal echo, que tiene forma sinusoidal y debe ser procesada antes de ser llevada hacia la ESP32 con el fin de activar la interrupción y detener el conteo del ToF.

La señal echo obtenida de los transductores receptores debe pasar inicialmente por una doble etapa de amplificación, para la cual se implementan los amplificadores LM358 que ofrecen alta ganancia, bajo ruido y alta velocidad de operación.

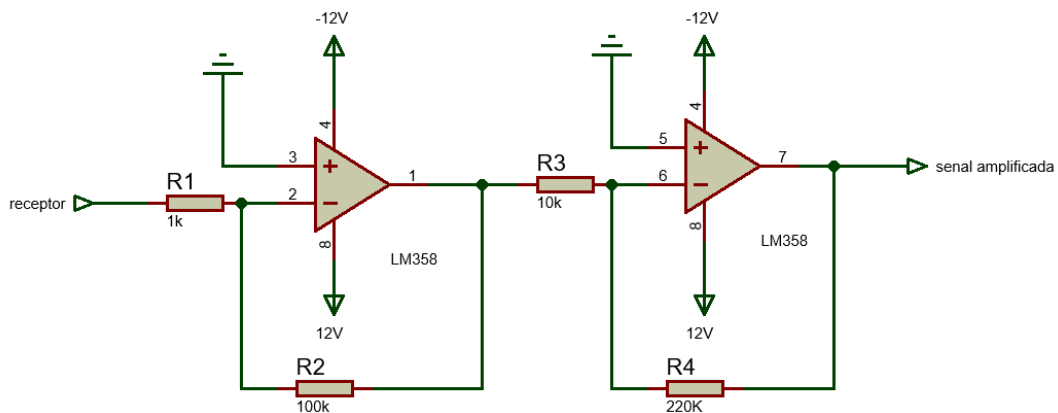


Figura 7. Circuito amplificador.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Esta etapa de amplificación se hace tanto para el sensor norte como para el sensor este por separado, con el fin de evitar el ruido electrónico. Como la señal amplificada echo tiene la forma de una onda sinusoidal es necesario procesarla, de manera de que pueda ser detectada por el MCU, por lo que se pasa primero por un circuito detector de envolvente y después por un comparador de voltaje.

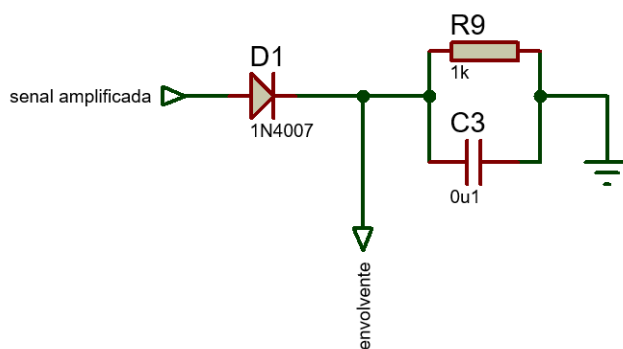


Figura 8. Circuito detector de envolvente.

La envolvente obtenida de la señal echo amplificada se lleva a un comparador de voltaje, con el propósito de convertir esta señal en una onda cuadrada de 3.3 v de amplitud, que pueda ser detectada por el MCU y, finalmente, active la interrupción externa para detener el conteo del ToF.

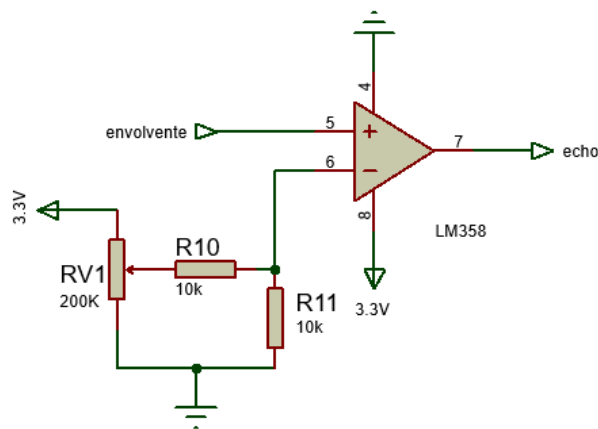


Figura 9. Circuito comparador de voltaje.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Los pares de transductores emisor/receptor en las direcciones oeste-este y sur-norte deben operar alternadamente, es decir, cuando el transductor oeste emite ondas ultrasónicas, el transductor este la recibe y el par sur-norte permanecen desactivados. Del mismo modo, cuando el transductor sur emite ondas sonoras, el transductor norte las recibe y el par oeste-este permanecen desactivados.

Para lograr esa conmutación de trabajo entre los pares de sensores se implementa el multiplexor/demultiplexor (MUX/DEMUX) CD4052, que se encarga de enrutar la señal trigger de 40 khz hacia los transductores oeste y sur, así como las señales echo de los transductores este y norte hacia el pin de interrupción de la ESP32.

Los pines A y B del MUX/DEMUX controlan los canales a utilizar, como solo usaremos dos de los cuatro que tiene el integrado, conectamos el pin A a un pin del MCU que cambiará su estado de 0 a 1, mientras que conectamos el pin B directamente a tierra ya que este todo el tiempo estará en 0.

B	A	Canal	Transductores
0	0	0x, 0y	oeste - este
0	1	1x, 1y	sur - norte

Tabla 2. Enrutado de señales.

Los transductores oeste y sur van conectados a las salidas 0x y 1x del DEMUX respectivamente, mientras que la señal emitida por la ESP32 de 40 khz va hacia la entrada x. Los transductores este y norte van conectados a las entradas 0y y 1y del MUX respectivamente, mientras que la salida y va hacia el pin de interrupción del MCU.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Ensamble final

La estructura física que soportará los sensores está formada por tubos y codos de PVC. El propósito es ubicar los cuatro sensores con una distancia de 20 cm entre los pares norte-sur y los pares oeste-este, la altura total del sistema es de 19 cm.



Figura 10. Estructura que soporta los sensores, vista superior.

Se selecciona el material PVC debido a su alta resistencia a la humedad y radiación solar, además, la electrónica del sistema se guarda en una caja hermética. Esta estructura permite que el anemómetro sea fácil de transportar e instalar y que el funcionamiento no se vea afectado por condiciones climáticas adversas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 11. Estructura que soporta los sensores, vista frontal.

4.2 Pruebas de validación

Inicialmente se prueban los circuitos electrónicos descritos anteriormente con el propósito de validar su correcto funcionamiento, se comienza probando que la ESP32 emita la señal de 16 pulsos de 40 khz que funcionará como trigger activando los sensores, cuando esta señal se envía se activa el temporizador que medirá el ToF.

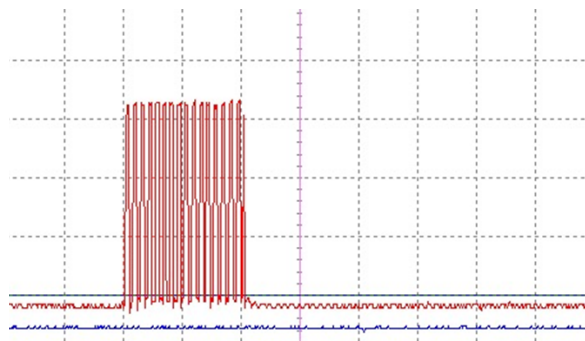


Figura 12. Señal trigger de 40Khz.

Se observa también cómo es la señal echo, luego de pasar por el circuito amplificador, que emiten los sensores como respuesta al recibir la señal de 40 khz propagada por el aire, también se verifica que el circuito detector de envolvente tenga un correcto funcionamiento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

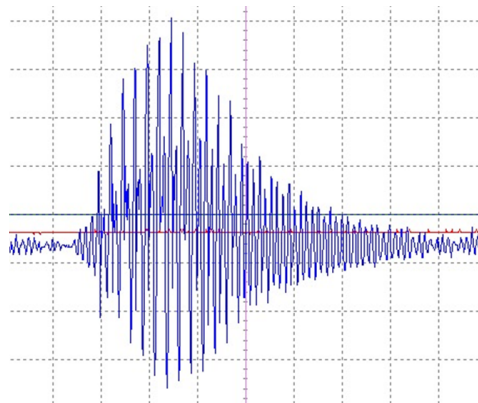


Figura 13. Señal echo amplificada.

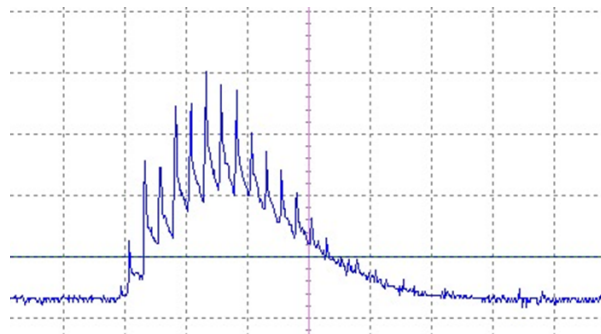


Figura 14. Envoltura de la señal echo.

Finalmente esta señal se lleva al circuito comparador, este circuito tiene el propósito de convertir la señal envoltura en una señal cuadrada para que la ESP32 pueda detectarla como interrupción externa y así detener el conteo del ToF.

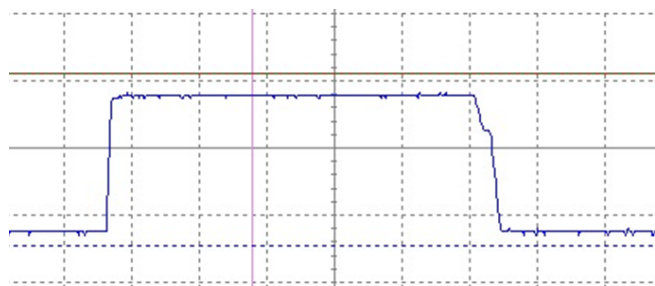


Figura 15. Señal echo procesada.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para validar el funcionamiento de las medidas de este anemómetro ultrasónico se toman en total 10 medidas para el ToF por cada par de sensores, estos valores son promediados y a partir de allí, utilizando las ecuaciones 4, 5 y 6, se calculan las velocidades.

Se hicieron pruebas con vientos de distintas magnitudes: 0 m/s, 5 m/s y 11 m/s, además, se tomaron medidas para las mismas velocidades del viento usando el anemómetro mecánico comercial de la referencia UNI-T UT362, esto con el fin de analizar y comparar la respuesta que entregan ambos instrumentos.



Figura 16. Anemómetro comercial UNI-T UT362.

Inicialmente se prueba el sistema sin ningún tipo de fuente de viento en un ambiente cerrado, se toman datos cada intervalo de 1 segundo y se grafican los resultados, la línea azul representa el anemómetro ultrasónico y la línea naranja el anemómetro comercial UNI-T UT362.

Como se evidencia en la figura 17, las medidas del anemómetro ultrasónico varían entre los 0.2 m/s y 1 m/s, mientras que las medidas para el anemómetro comercial permanecen constantes en 0.0 m/s debido a que no existe un impulso que venza la inercia de las hélices que lo componen. Para esta prueba se obtuvo un error del 19.34%.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

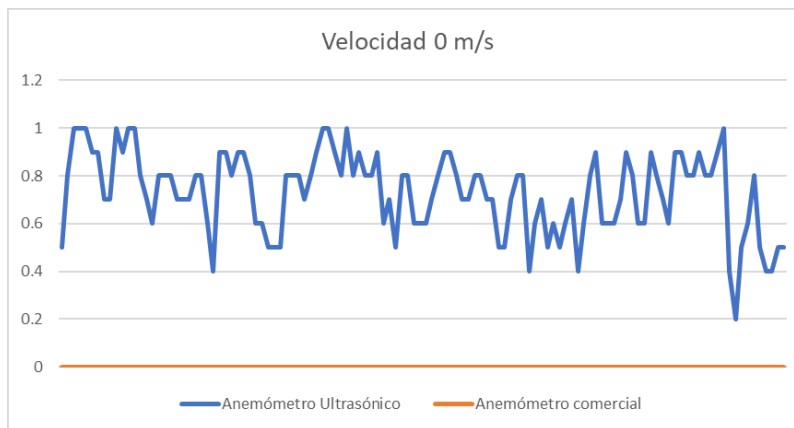


Figura 17. Respuesta de velocidades para 0 m/s.

Se realizan pruebas con vientos de 5 m/s tomando cada dato en un intervalo de 1 segundo, en la figura 19 Se muestra que, para esta velocidad, el anemómetro ultrasónico presenta medidas con menos variaciones, ya que sus respuestas oscilan entre los 5.6 m/s y los 5.7 m/s , se obtuvo un error del 0.88%.

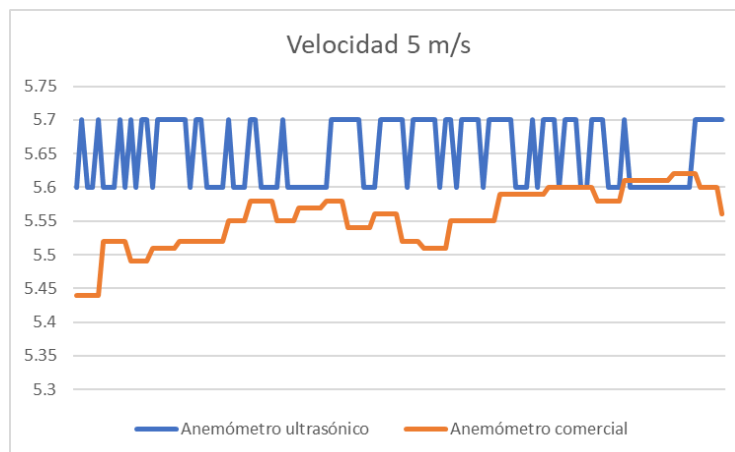


Figura 18. Respuesta de velocidades para 5 m/s.

Finalmente se prueba el sistema con vientos de 11 m/s tomando un dato cada 0.5 segundos, en este caso se puede ver que el anemómetro presenta cambios en las

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

mediciones que oscilan entre los 11.1 m/s y los 11.5 m/s, para este caso se obtuvo un error del 0.6%.

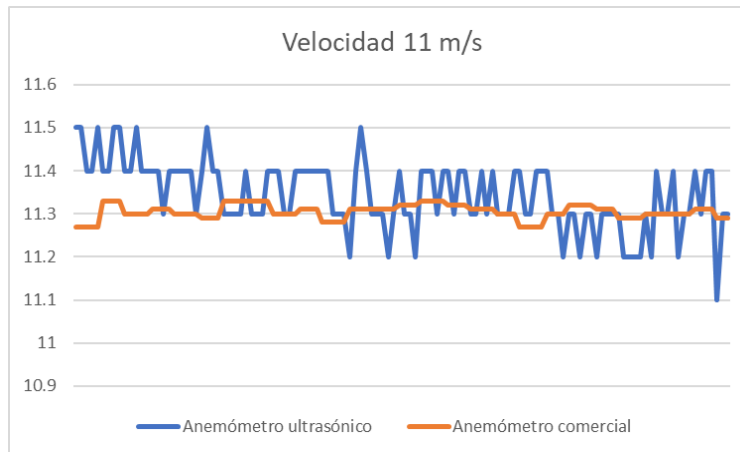


Figura 19. Respuesta de velocidades para 11 m/s.

En la siguiente tabla se resumen los resultados:

Promedio de velocidades obtenido [m/s]				
Velocidades [m/s]	Anemómetro Ultrasónico	Anemómetro comercial UNI-T UT362	Error absoluto [m/s]	Error relativo [%]
0	0.7292	0	0.1410	19.34
5	5.6517	5.5559	0.4099	0.88
11	11.3442	11.3048	0.0682	0.60

Tabla 3. Resumen de resultados.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones

- Se desarrolla satisfactoriamente un instrumento de medición del viento basado en sensores ultrasónicos, conocido como anemómetro ultrasónico, que funciona basado en la lectura del tiempo de vuelo que tarda una onda ultrasónica en viajar entre dos puntos, además, su estructura no presenta partes móviles por lo que no sufre de limitaciones mecánicas para medir altas velocidades. Este anemómetro presenta un error de medida del 19.34% para bajas velocidades y un error de media del 0.60% para altas velocidades.
- Se investiga sobre el principio de funcionamiento de los sensores ultrasónicos para mediciones de velocidad del viento, basado en el concepto de ToF.
- Se implementa un circuito electrónico encargado de procesar las señales emitidas hacia los sensores así como de procesar las señales recibidas de los mismos, pasando por un proceso de amplificación, detección de envolvente, comparación y enrutado.
- Se desarrolla un algoritmo de programación encargado de controlar las señales de entrada y salida de los sensores, además de realizar el cálculo perteneciente a la velocidad del viento.
- Se implementa una estructura física que cumple con los requerimientos de resistencia y también de protección de los componentes electrónicos ante condiciones ambientales adversas.
- Se pone a prueba el funcionamiento del anemómetro ultrasónico con vientos de distintas velocidades en donde también se pone a prueba el anemómetro comercial de referencia UNI-T UT362 con el fin de comparar la respuesta de ambos instrumentos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Se comparan las mediciones para distintas velocidades de viento obtenidas del anemómetro ultrasónico y del anemómetro UNI-T UT362 y se determina el error de medida del proyecto propuesto.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda implementar un algoritmo de filtro para los datos obtenidos y así conseguir disminuir el error.
- Se recomienda poner a prueba el sistema bajo distintas condiciones climáticas.
- Se recomienda implementar un sensor de temperatura para mejorar las medidas de velocidad del viento en función del cambio de temperatura en el ambiente.
- Se recomienda probar el funcionamiento de los sensores a distintas distancias para encontrar una posición óptima para la toma de datos.

5.3 Trabajos futuros

- El proyecto pasará por distintas fases de prueba, así como de diseño de un algoritmo de filtro, para disminuir su error y mejorar las respuestas obtenidas.
- Se añadirá un sensor de temperatura para poder monitorear también esta variable en la zona donde sea implementado.
- Una segunda etapa de este proyecto será planteada como trabajo de grado en maestría, en donde se incluirá un sistema de arreglo de termopilas y redes neuronales para determinar la velocidad y dirección del viento en función del cambio en la temperatura en el ambiente.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

Adi Kuncara, Ivan, Jatmiko Endro Suseno, Setyawan Agus, and Isnain Gunadi. 2020. "Development of Ultrasonic Anemometer Using HC-SR04 with Kalman Filter Based on Microcontroller Integrated IoT." E3S Web of Conferences 202. doi: 10.1051/e3sconf/202020215011.

Allotta, Benedetto, Luca Pugi, Tommaso Massai, Enrico Boni, Francesco Guidi, and Marco Montagni. 2017. "Design and Calibration of an Innovative Ultrasonic, Arduino Based Anemometer." Conference Proceedings - 2017 17th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 1st IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2017. doi: 10.1109/IEEEIC.2017.7977450.

Bucci, G., F. Ciancetta, E. Fiorucci, D. Gallo, C. Landi, and M. Luiso. 2013. "A Low-Cost Ultrasonic Wind Speed and Direction Measurement System." Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference 505–10. doi: 10.1109/I2MTC.2013.6555469.

Chandran, Pooja, Ramesh Bhakthavatchalu, and P. Pradeep Kumar. 2017. "Time of Flight Measurement System for an Ultrasonic Anemometer." 2016 International Conference on Control Instrumentation Communication and Computational Technologies, ICCICCT 2016 734–37. doi: 10.1109/ICCICCT.2016.7988049.

Dubov, Dmitriy, Bohos Aprahamian, and Meline Aprahamian. 2019. "Comparison of Wind Data Measurement Results of 3D Ultrasonic Anemometers and Calibrated Cup Anemometers Mounted on a Met Mast." 2019 16th Conference on Electrical Machines,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Drives and Power Systems, ELMA 2019 - Proceedings (June):6–8. doi: 10.1109/ELMA.2019.8771552.

Electrica, Departamento De Ingenieria, Miguel Perez, Jose Antonio, and Urbano Castelan. 2007. "Cost Ultrasonic." (Iccee):213–16.

Fan, H. B., J. L. Liu, and G. Z. Sun. 2018. "Design of Low-Power Ultrasonic Anemometer Based on STM32L476." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 408(1). doi: 10.1088/1757-899X/408/1/012036.

FLORES ALEXANDRA, and MENESES DIEGO. 2010. "Diseño y Construcción de Un Sistema de Medición de Temperatura Ambiental, Velocidad y Dirección Del Viento En Base a Sensores Ultrasónicos." (3):7.

Wardkein, Paramote, and Sutanai Prasertkul. 2018. "Ultrasonic Wind Speed Measurement Based on Phase Shifting and Kalman Filter." IEECON 2018 - 6th International Electrical Engineering Congress (1):6–9. doi: 10.1109/IEECON.2018.8712329.

Yadav, Vipin Prakash, Alakh Sinha, and Arun Khosla. 2017. "Design and Implementation of Ultrasonic Anemometer." 2017 4th International Conference on Power, Control and Embedded Systems, ICPCES 2017 2017-January:1–6. doi: 10.1109/ICPCES.2017.8117645.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES *Elizabeth D.R*

FIRMA ASESOR *JUAN SE.*

FECHA ENTREGA: 26 de noviembre del 2021

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO__ ACEPTADO____ ACEPTADO CON
 MODIFICACIONES_____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____