

# CONSTRUCCIÓN DE UN ANEMÓMETRO CON PLACAS DE ARDUINO Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA DETERMINAR LA DIRECCIÓN DEL VIENTO

Gómez García, Leonard Adrián.<sup>1,\*</sup>

Ortiz Montoya, Santiago.<sup>2,\*</sup>

Velásquez Múnera, Jessica.<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>leonard.gomez@udea.edu.co

<sup>2</sup>santiago.ortiz2@udea.edu.co

<sup>3</sup>jessica.velasquez1@udea.edu.co

\* Pregrado de Astronomía, Instituto de Física, Universidad de Antioquia.

## Resumen

En este informe se describe la creación de un anemómetro que opera midiendo la rapidez del sonido a través de dos micrófonos sincronizados. Al calcular la velocidad del sonido, el dispositivo tiene como objetivo detectar el efecto del viento en esta rapidez, lo que permite medir perturbaciones en el aire. Se exploran configuraciones experimentales para encontrar la más precisa y se destaca la necesidad de aumentar la frecuencia de muestreo para lograr una mayor resolución en la medición de perturbaciones del viento. Este enfoque ofrece una perspectiva prometedora para la medición precisa de la velocidad del viento y sus variaciones.

**Palabras clave:** Anemómetro, Velocidad del sonido, Viento, Muestreo, Gap.

## 1. Introducción

La medición de la rapidez y dirección del viento resulta vital en el campo de la meteorología y en la astronomía observacional dado su relevante papel en la corrección de imágenes astronómicas, permitiendo la obtención de datos más detallados y precisos. Es necesario, entonces, un instrumento que pueda determinar esta magnitud física buscando precisión y monitoreo en tiempo real.

En esta ocasión se propuso utilizar el concepto de anemómetro ultrasónico, cuyo principal funcionamiento consiste en el uso de las ondas de sonido como método de medición de la velocidad del viento. Los anemómetros ultrasónicos tienen tres tipos de métodos:

1. Por diferencia de tiempos
2. Por diferencia de fase
3. Por efecto Doppler

El método más usado (y del cual partimos para la construcción del instrumento) es el método por diferencia de tiempos debido a su relativa fácil aplicación que busca obtener la

velocidad del viento basada en perturbaciones en el tiempo propagación. [1].

En este informe se plantearon diferentes interrogantes con el fin de dar cuenta del funcionamiento de este instrumento y, así, proponer un diseño acorde a los recursos disponibles que permitiera resolver, caracterizar y verificar perturbaciones en la velocidad del sonido en presencia de una fuente de viento.

### Objetivo General

- Diseñar y construir un anemómetro que permita medir la rapidez y dirección del viento por medio perturbaciones en la rapidez de propagación del sonido.

### Objetivos Específicos

1. Construir un prototipo para medir rapidez y dirección del viento usando sensores de sonido integrados mediante arduino.
2. Determinar la distancia óptima entre los micrófonos y la intensidad óptima del emisor de pulsos de tal forma que logramos evidenciar la contribución de la velocidad del viento a la velocidad propagación del sonido.

3. Determinar la rapidez de propagación del sonido a partir de la diferencia temporal entre que un pulso llega a uno de los micrófonos y luego llega al otro.
4. Introducir un ventilador que genere perturbaciones en la velocidad de propagación del sonido y determinar la intensidad de estas perturbaciones.
5. A partir de estas perturbaciones, inferir la dirección del viento.

## 2. Marco Teórico

El anemómetro sónico fue desarrollado en la década de 1970. El principio de funcionamiento de este instrumento consiste en medir qué tanto incrementa o disminuye la velocidad de propagación de las ondas de sonido que viajan entre dos sensores (micrófonos) debido a efectos del viento. Los anemómetros sónicos bidimensionales son usados en estaciones climáticas, navegación de barcos, turbinas de viento, aviación, etc [2].

El principio de operación de los anemómetros sónicos se basa en medir la diferencia de tiempo  $\Delta t$  entre el paso de una onda de sonido por un sensor  $a$  y un sensor  $b$  ubicados a una distancia conocida  $d$ :

$$\Delta t = \frac{d}{(c + v)} \quad (1)$$

donde  $c$  es la velocidad del sonido y  $v$  es la velocidad del viento [3].

## 3. Metodología

### 3.1. Diseño

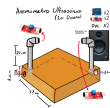


Figura 1: Primer diseño, unidireccional.

En primer lugar, como puede verse en la Figura 1, correspondiente al primer prototipo de diseño, se tienen dos micrófonos alineados y previamente sincronizados temporalmente. Al emitir un pulso desde el emisor, este es registrado en primer lugar por el micrófono 1 y, un tiempo después, es registrado por el micrófono 2 ubicado a una distancia fija  $d$ . Al conocer el tiempo  $t$  transcurrido entre que el micrófono 1 detecta el pulso y que el micrófono 2 detecta el pulso, y además, conociendo la distancia  $d$  se puede calcular la rapidez  $c$  del pulso en ir de un micrófono a otro de la siguiente forma:

$$c = \frac{d}{t} \quad (2)$$

En las figuras 1 y 4 se muestran los diseños iniciales del anemómetro unidimensional y bidimensional. Se planeó ubicar los micrófonos en la punta de tubos de pvc dentro de

los cuales estarían los cables que conectan los micrófonos al arduino. Esto fijado a una base de madera. En el caso unidimensional los dos micrófonos irían en las esquinas que se pueden unir mediante una diagonal, en el caso bidimensional los cuatro micrófonos irían ubicados en las cuatro esquinas del cuadrado. En la etapa de diseño no se definieron las dimensiones de este montaje ni las distancias entre los micrófonos porque se planeaba hallar la distancia óptima entre micrófonos para medir las perturbaciones causadas por el ventilador en la etapa de calibración.

### 3.2. Medición de tiempo con el arduino

Cuando se hace la toma de datos con los arduinos y los sensores se obtiene una intensidad en ADU (Unidades Digitales Arbitrarias) en función del número de mediciones que realiza el arduino. Como se ve en la ecuación 2 para poder calcular la velocidad de propagación de las ondas de sonido se necesita la información del tiempo que hay entre la llegada de la onda al micrófono 1 y al micrófono 2, para hacer esto se debe establecer cuántas medidas toman los arduinos por unidad de tiempo, para esto se tomo una serie de medidas arbitrarias en un tiempo determinado.

Al realizar 100 rondas de mediciones, cada una de 3 segundos, obtenemos la siguiente distribución para la cantidad de mediciones que son capaces de realizar los micrófonos durante esa ventana de tiempo:

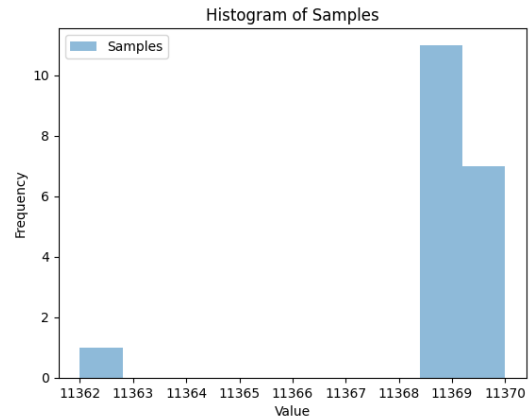


Figura 2: Distribución del número de mediciones que realiza cada micrófono durante 3 segundos. 100 rondas.

Basados en esta distribución, podemos establecer fácilmente una tasa de cambio entre el número de mediciones realizadas por los micrófonos y la cantidad tiempo transcurrido. Al conocer, entonces, la diferencia de mediciones entre que el micrófono 1 detecta el pulso y el micrófono 2 también lo detecta (conoceremos como "gap", esta diferencia de ahora en adelante), podemos calcular el tiempo propagación de la onda  $t$  como sigue:

$$t = \frac{11369}{3} * gap \quad (3)$$

### 3.3. Hipótesis

Fijando la distancia entre los micrófonos y obteniendo el *gap*, podemos entonces conocer la rapidez de propagación del pulso. Una vez obtenida esta rapidez, basta con añadir un ventilador que genere viento en la línea de visión de los micrófonos para producir perturbaciones en el aire. Teniendo en cuenta que el sonido es una onda de presión y densidad que en este caso se propaga a través del aire, su rapidez debe verse afectada por estas perturbaciones. Basados en el principio de relatividad galileano, hipotetizamos que si el viento va a favor de la dirección de propagación del pulso, entonces la rapidez de este respecto a la de referencia debe aumentar. En el caso opuesto, es decir, si el viento va en contra de la dirección de propagación del pulso, entonces la rapidez de este respecto a la de referencia debe disminuir.

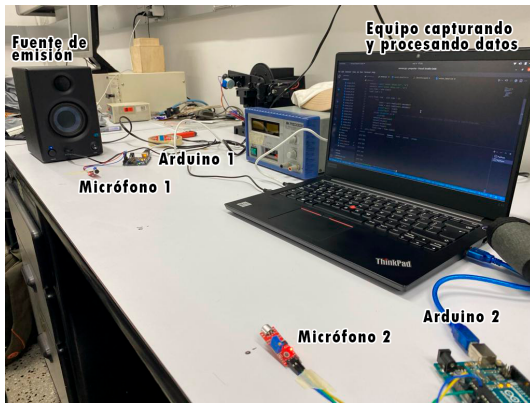


Figura 3: Montaje experimental.

Una vez medidos los efectos sobre la propagación del pulso en esta primera dirección, se podría añadir dos micrófonos más en la dirección perpendicular 4. Esto nos permitiría hallar los efectos sobre la propagación del sonido en el plano, puesto que podríamos hallar las componentes cartesianas de la velocidad del viento y no solo saber si va a favor en contra como en el montaje de la figura 1.

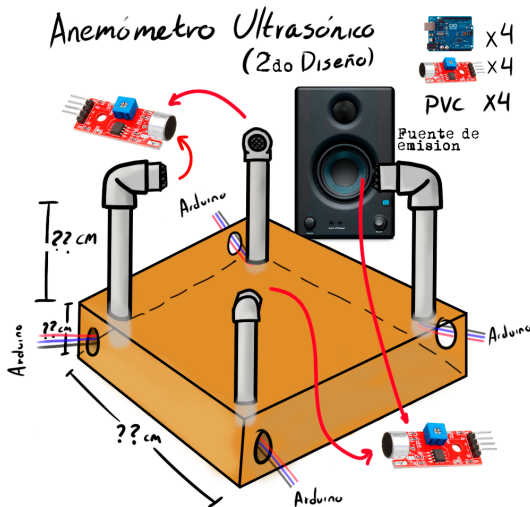


Figura 4: Segundo diseño, bidireccional.

### 3.4. Sincronización

Para hacer las mediciones, hicimos uso de placas Arduino Uno junto con sensores de sonido KY037 que miden cambios de presión y densidad del aire. Ambas placas fueron conectadas al mismo computador con el que, mediante un mismo código de Python, se realizó la medición simultánea con los micrófonos.

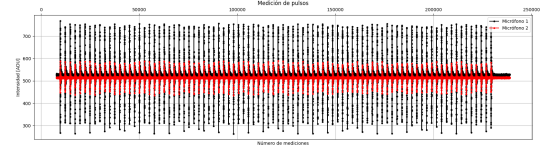


Figura 5: Muestra de medición de 90 pulsos a un bpm de 90. Hacer zoom para apreciar detalles.

### 3.5. Tomas de prueba

Como fuente de sonido se usó un parlante en el cual se emitían pulsos a cierta frecuencia con la ayuda de aplicaciones de metrónomo en línea. Se tomaron datos de prueba a tres distancias diferentes: 30 cm, 60 cm y 90 cm. A 30 cm la diferencia de tiempo entre la detección de un micrófono y el otro es muy pequeña, se puede distinguir pero para mejorar la medida del intervalo temporal entre estas detecciones se decidió aumentar la distancia entre los micrófonos. A 90 cm el problema que se tuvo fue que la intensidad del sonido percibida por el micrófono más lejano a la fuente era muy baja y se podía confundir con el ruido ambiental. Así, la distancia elegida para las tomas de datos fue 60 cm.

La toma de datos se realizó en el sótano de la biblioteca con el objetivo de reducir el ruido ambiental que llegaba a los sensores, durante las tomas de datos se procuró evitar sonidos de fuentes como personas, aparatos electrónicos y el ambiente.

### 3.6. Procesamiento de datos

Buscando facilitar el proceso de procesamiento de datos, fijamos el número de pulsos emitidos y que deben ser detectados por los micrófonos. Una vez han sido medidos todos los pulsos (ver figura tal 5), se procede a hacer una identificación de cada uno de los pulsos mediante un modelo de K-means tomando ventaja de que conocemos la cantidad de clusters (pulsos) que el algoritmo debe identificar en los registros de cada uno de los micrófonos.

Para cada uno de los clusters (figura 7), podemos fácilmente determinar la ubicación del pico de intensidad y conocer la diferencia, en número de mediciones realizadas por los micrófonos, entre el instante en el que el micrófono 1 registra el pico de intensidad de un pulso dado y el instante en el que el micrófono 2 también lo hace (ver figura 6).

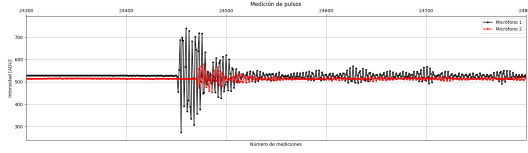


Figura 6: Zoom sobre un par de pulsos correspondientes

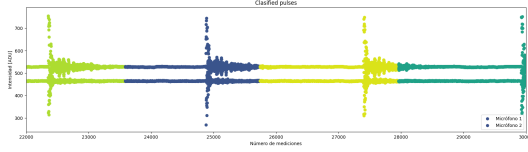


Figura 7: Zoom sobre un par de pulsos correspondientes luego de la clasificación hecha por K-means.

Al calcular el gap para todos los pulsos correspondientes medidos, podemos conocer la distribución (ver figura 8) de los valores y, de estos, tras descartar outliers y reconocer su distribución normal, tomamos la media como valor característico para hacer una estimación de la rapidez del sonido como se expuso anteriormente.

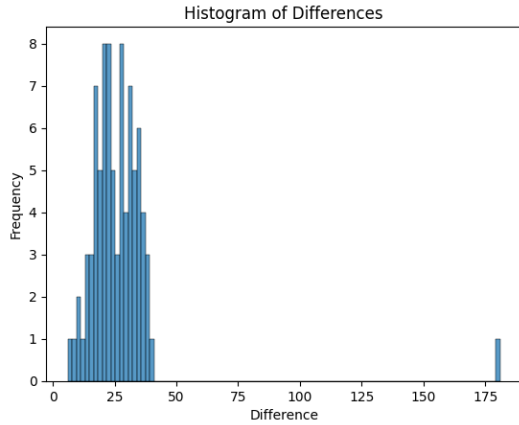


Figura 8: Histograma de mediciones.

## 4. Resultados

En primer lugar se empezó por incrementar de manera gradual el número de pulsos emitidos, buscando algún tipo de convergencia para el tamaño del gap, y por tanto, el valor de la rapidez del sonido, como se muestra en la 9.

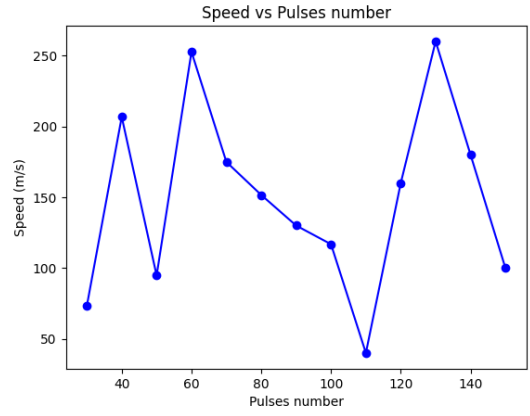


Figura 9: Velocidad del sonido medida en función del número de pulsos emitidos.

Nótese que para el espacio muestral explorado no logra verse ninguna convergencia para el valor de la rapidez calculada. Esto no significa necesariamente que no sea posible determinar la dirección del viento como se ha venido planteando puesto que, aún si no somos capaces de replicar el valor de la velocidad del sonido (de 340 m/s aproximadamente), si conseguimos fijar el valor de la rapidez calculada para cierto número de pulsos emitidos, entonces podemos medir perturbaciones causadas por el viento respecto a dicho valor, lo que nos permitiría determinar, como ya fue expuesto anteriormente, la dirección de la velocidad del viento. Haciendo caso a este enfoque, se realizaron múltiples iteraciones de 90 pulsos emitidos a una frecuencia de 90 bits por minuto, obteniéndose lo siguiente 10:

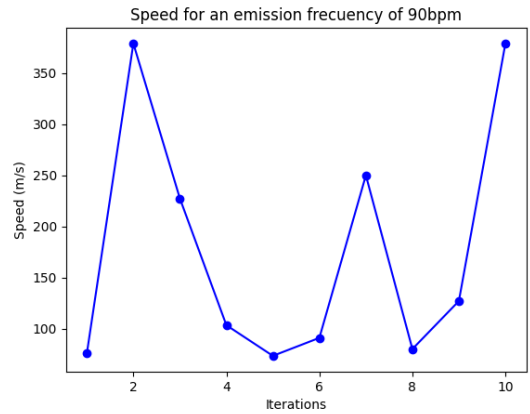


Figura 10: Múltiples iteraciones del cálculo de la velocidad del sonido para la misma cantidad de pulsos.

Puede verse que tampoco existe una convergencia para la velocidad calculada. Esto nos lleva a preguntarnos por el origen de la varianza de los datos. Para analizarla, a partir de la ecuación (3), el gap necesario para obtener una rapidez de valor  $c$  sería

$$gap = d * \left( \frac{11369}{3} \right) c^{-1} \quad (4)$$

Con esta ecuación, graficamos sobre un espacio muestral de gaps para conocer la tendencia, obteniéndose:

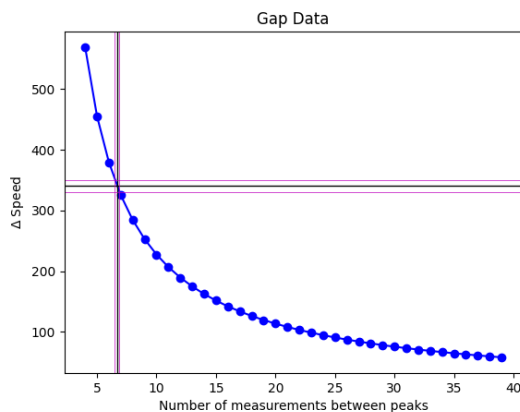


Figura 11: Velocidad obtenida para distintos valores del gap

Nótese como, en el caso ideal en el que se logra la convergencia del tamaño del gap a un valor de 6.69 mediciones (valor correspondiente a una rapidez del sonido de 340 m/s), no sería posible medir perturbaciones del orden de 10 m/s (capacidad de ventiladores comunes) puesto que la incertidumbre asociada a la rapidez para gaps cercanos (6 y 7) es muchísimo mayor a la rapidez que podría agregarse o restarse a la rapidez de propagación de referencia (ver figura 12).

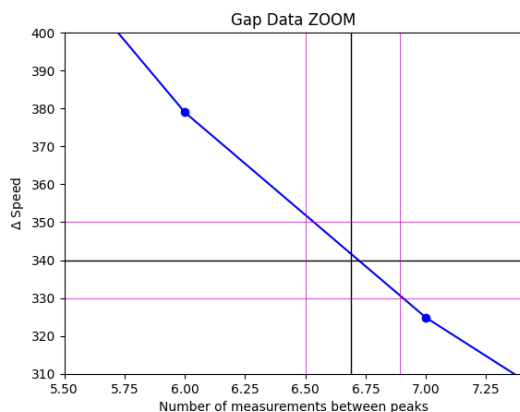


Figura 12: Velocidad del sonido calculada múltiples veces para la misma cantidad de pulsos. Nótese que el poder resolución de la configuración experimental no es suficiente para replicar la rapidez del sonido ni medir perturbaciones del orden de 10 m/s.

Además, analizando nuevamente el caso ideal, el tamaño del gap de 6.69 mediciones realmente no tiene sentido puesto que no es posible realizar un número no-entero de mediciones. Esto sugiere justamente que es necesario aumentar la frecuencia de muestreo de los sensores para tener una mayor resolución.

Cabe resaltar que aumentando la distancia entre los dos micrófonos se aumenta el tiempo que transcurre durante el

desplazamiento de la onda de un micrófono a otro, lo que aumenta el número de mediciones que hay, mejorando la resolución del instrumento, haciendo posible una mejora en la medida de la velocidad del sonido y abriendo la posibilidad de medir la velocidad del viento. Sin embargo, como se mencionó, a distancias muy grandes la intensidad medida por el micrófono más lejano a la fuente es muy pequeña, por lo que se necesitaría un emisor de alto volumen. No se consideró la opción anterior porque sería un instrumento poco práctico, pues por la distancia entre los micrófonos sería un instrumento muy grande, y además sería muy ruidoso.

## 5. Conclusiones

- El caso ideal de convergencia a un tamaño de gap de 6.69 mediciones, que corresponde a una rapidez del sonido de 340 m/s, revela una limitación en la capacidad de medir perturbaciones de baja magnitud, especialmente aquellas del orden de 10 m/s, capacidad de ventiladores comunes.
- El hecho de que el tamaño del gap sea 6.69 mediciones plantea un problema práctico, ya que no es posible realizar mediciones fraccionarias en la realidad. Esto resalta la necesidad de aumentar la frecuencia de muestreo de los micrófonos para tener mayor resolución.
- Aumentar la distancia entre los receptores también es una opción para mejorar la resolución del instrumento y abrir la posibilidad a medir la velocidad del sonido y del viento. Esta opción no se consideró porque reducía la portabilidad del instrumento y lo hacía muy ruidoso.
- Con el objetivo de aumentar la frecuencia de muestreo, en lugar de micrófonos de Arduino, se propone el uso de sensores de alta precisión o sensores de velocidad del sonido de alta calidad. En lugar de un Arduino Uno, placas de desarrollo más potentes como el Arduino Due o el Teensy son capaces de alcanzar frecuencias de muestreo más altas y ofrecen un mayor rendimiento en términos de registro de datos.

## Referencias

- [1] Kuncara, A., Suseno, E., Setyawan, A., & Isnain, G. (2020). Development of Ultrasonic Anemometer Using HC-SR04 with Kalman Filter Based on Microcontroller Integrated IoT. E3S Web Conf, 202, 15011. doi:10.1051/e3sconf/202020215011.
- [2] Nfaoui, H. (2012). Wind Energy Potential. Comprehensive Renewable Energy, 73–92. doi:10.1016/b978-0-08-087872-0.00204-3
- [3] Nosov, V., Lukin, V., Nosov, E., Torgaev, A., & Bogushevich, A. (2019). Measurement of atmospheric turbulence characteristics by the ultrasonic anemometers and the calibration processes. Atmosphere, 10(8), 460.