

UNIVERSIDAD DE SEVILLA



Capítulo 1

Introducción y motivación del proyecto

- 1.1.- Introducción histórica**
- 1.2.- Equipos de medición**
 - 1.2.1.- Distintos tipos de anemómetros**
 - 1.2.1.1.- Anemómetro de copelas
 - 1.2.1.2.- Velea
 - 1.2.1.3.- Anemómetro de hilo caliente
 - 1.2.1.4.- Anemómetro sónico
 - 1.2.2.- Anemómetros comerciales**
- 1.3.- Fundamentos de ultrasonidos**
 - 1.3.1.- Introducción a ultrasonidos**
 - 1.3.2.- Velocidad del sonido en el aire**
- 1.4.- Motivación del proyecto**

1.1.- Introducción histórica

El viento es el movimiento del aire en la atmósfera con relación a la superficie terrestre, originado por la diferente densidad de masas de aire que se encuentran a distinta temperatura. En meteorología se denomina como tal la componente del movimiento del aire paralela a la superficie terrestre. Los movimientos de las masas de aire en otras direcciones se denominan corrientes de aire. Por medio del viento se transporta la humedad y el calor de unas zonas a otras, parámetros fundamentales que configuran el tiempo en un lugar. Al ser una magnitud vectorial se define por su dirección sentido y por su velocidad.

El interés por los distintos factores del entorno viene desde muy atrás. A favor de nuevas doctrinas filosóficas, de la invención de instrumentos para la observación de los elementos climáticos y de la formulación de una serie de leyes físicas, los siglos XVII y XVIII conocieron la eclosión y desarrollo de la ciencia experimental, cuyo cometido había sido frenado bajo los principios de la Escolástica y su amparo por la Iglesia Católica.

En el intervalo de apenas cuatro lustros, entre 1639 y 1659, se inventan y construyen aparatos que permiten la observación y medición de los distintos elementos meteorológicos. En 1639 es el pluviómetro, en 1641 el termómetro, en 1644 el barómetro y en 1659 un higrómetro de condensación. Pero el caso que nos interesa será el de las mediciones realizadas sobre el viento, y cabe recordar los trabajos para conseguir distintos prototipos de **anemómetros**. En este empeño sobresalieron los inventos del arquitecto *León Bautista Alberti* y de *Santorio Santorre*, aunque fue en el siglo XVII cuando *Robert Hooke* y, particularmente en el siglo XVIII el ruso *Mikhail Lomonossov* y los franceses *René Grilet* y *Louis-Jean Pajot*, quienes perfeccionaron y construyeron los primeros anemómetros de rotación.

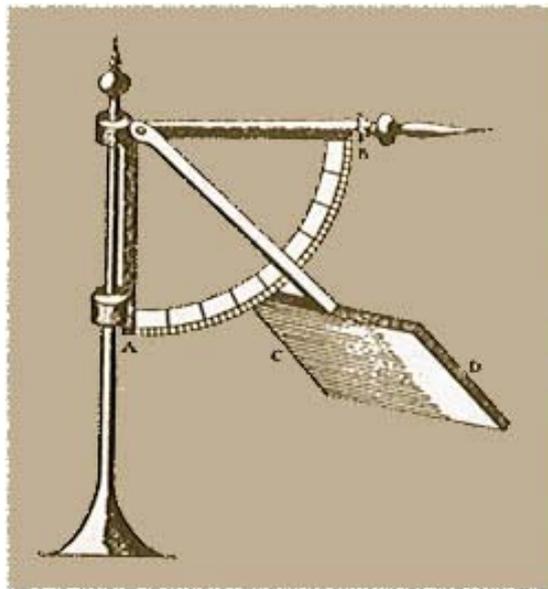


Ilustración 1: Anemómetro Hooke (1667)

Los anemómetros miden la velocidad, expresada comúnmente en metros por segundo y el nudo (milla náutica/hora) muy usado en el caso de medidas en el mar. En este caso la velocidad se suele expresar en unidades de la escala de Beaufort y se

emplean los 16 rumbos de la rosa de los vientos. En la actualidad se emplea el radar de viento para determinar la velocidad y dirección en una zona determinada. Para la medición del tiempo en altura se emplean las radiosondas y los globos pilotos. En ambos se parte de una velocidad ascensional constante, determinándose desde la estación de seguimiento la posición del globo a intervalos fijos de tiempo; de esta forma se obtienen sus distintas posiciones en los últimos niveles de ascensión, con lo que se determina, según la magnitud y dirección de desplazamiento entre mediciones, la velocidad y dirección del viento a distintas alturas. La diferencia entre el sondeo con radiosonda y el sondeo con globo piloto se realiza visualmente por medio de un teodolito, por lo que es imprescindible la ausencia de nubes para una observación completa, mientras que con la radiosonda el seguimiento se realiza automáticamente desde el suelo al estar dotado el globo de sondeo de un emisor de radio. En los sondeos con radiosonda, aparte del viento, también se determinan las temperaturas y humedades a distintas alturas. En zonas en las que escasean las estaciones (grandes océanos, regiones polares), los aviones comerciales que las sobrevuelan los facilitan por medio de unos mensajes radiados llamados AIREP, en los que figuran, para las distintas posiciones de la aeronave (latitud, longitud y altura), datos de velocidad y dirección y temperatura del viento.

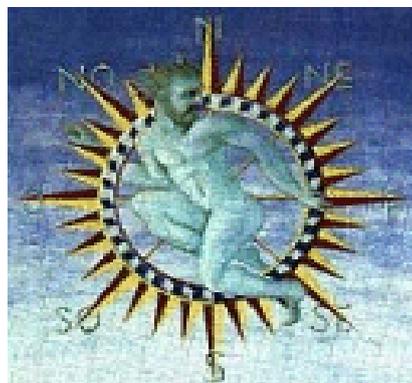


Ilustración 2: Rosa de los vientos

Históricamente el viento, tan presente como benéfico a veces o catastrófico en ocasiones, adquirió pronto diversas personificaciones; así, *Bóreas* fue la denominación para los vientos huracanados del Norte y *Céfiro* fue la cara amable de las suaves brisas del Sur. Según Heródoto los atenienses una vez invocaron exitosamente a Bóreas para que destruyera la flota del rey Jerjes y en agradecimiento le construyeron un magnífico templo en las orillas del río Ilisos. También ayudó a los megalopolitanos contra los espartanos, por lo que los vencedores le ofrecían sacrificios anuales (Pausanias VIII).



Ilustración 3: Figura de Poseidón

Por otro lado, *Poseidón* librando encarnizadas batallas con sus huestes de *Tritones* y *Nereidas* dio explicación a las tormentas y tempestades, de la misma manera que justificó los cálidos vientos y las suaves brisas. En un punto determinado del Mediterráneo debieron nacer, en hora incierta, las denominaciones de los puntos cardinales y también los nombres de los vientos intermedios. Los lugares por donde nace y muere el sol señalan, desde siempre, los puntos cardinales del Este y el Oeste. La posición del sol en su punto más alto del mediodía señala igualmente el eje Norte-Sur. Los vientos al soplar no coincidían siempre con los ejes geográficos principales, por lo que fue necesario identificar direcciones intermedias. Los nombres de *Greco* o *Gregal*,

Siroco o *Xaloc*, *Lebeche* y *Maestro* o *Mistral* tomaron carta de naturaleza. Pero para que determinado viento sea identificado con una dirección dada es preciso partir de una localización precisa. A pesar de no ser un viento intermedio, la *Tramontana*, equivalente del viento del Norte, toma su denominación de "*más allá de los montes*" y se aplica, haya o no una cadena montañosa, al norte. En Cataluña, la *Tramuntana* adquiere una significación especial, sobre todo en la costa gerundense y también en Baleares, concretamente en la isla de Menorca. Según se dice, es responsable principal tanto del "*seny*" como de la "*rauxa*", características temperamentales asimilables al sentido común y a la fantasía.

Así, para el Greco, por ejemplo, el lugar de observación debía estar necesariamente al sur y al oeste de Atenas. Para el *Siroco*, viento que viene de Siria, la cuna de los vientos debía estar al norte y al oeste de Damasco. Para el *Lebeche*, viento que viene de Libia, el lugar de observación debe situarse al norte y al este de Trípoli. Notemos que incluso en mapas actuales se conoce esta capital por *Tarabulus* al *Garb*. Y por último, para el *Maestro* o *Mistral*, el origen debe de situarse al sur y al oeste de Roma. De ahí le viene el nombre de *magister*, maestro o viento principal. Estas cuatro ciudades, metrópolis del mundo conocido, dieron origen a algún lugar de la cuenca mediterránea oriental al nacimiento de los nombres de los vientos que aún perduran en la actualidad. Situando en la carta estos condicionantes geográficos, podemos indicar que el cruce del paralelo 36°N con el meridiano 20°E señala el lugar de la cuna de los vientos. En la cuenca del mar Jónico, en algún lugar de la ruta que une las islas de Malta y Creta, podemos situar con un grado de certeza aceptable el lugar del nacimiento que se dio para los vientos.

Dentro de la cultura grecorromana, los griegos fueron los poetas y los romanos los pragmáticos. El gran poeta Homero, con su obra *La Odisea*, donde refiere la azarosa vida de Ulises, dio una explicación poética al origen de los vientos mediante una ingeniosa leyenda. Habiendo arribado Ulises y sus marineros a la isla Eólica, su dueño y señor, Eolo agasajó a todos y, tras varios días de celebraciones y festejos, decidió regalar a Ulises un valioso presente que pudiese facilitar su regreso hacia Penélope. Se trataba del Odro de los Vientos, y bien le advirtió que nunca lo abriese, pues se podían desencadenar violentas tempestades al dar salida a todos los vientos a la vez. Sólo en casos muy precisos y de manera muy cuidadosa podría luchar contra las calmas, pero siempre con mucho riesgo. Ulises y sus hombres se embarcaron de nuevo y pudo más la curiosidad que los consejos. En medio de la noche, la marinería, desoyendo las recomendaciones de Ulises, entreabrió la boca del Odro y, de repente, se desató tan feroz tormenta que puso en riesgo de zozobra a todos en su viaje de regreso a Itaca.

Hoy en día, los vientos han perdido parte de su misterio al ser clasificados simplemente de térmicos o de gradiente, y un señor francés, un tal Beaufort, llegó a encasillarlos en una escala que mide su fuerza. Pero aún perduran las



Ilustración 4: El hálito de los Dioses

denominaciones clásicas y *Greco* y *Siroco* siguen vivos en el lenguaje marino. A pesar de las bajas y las altas presiones, a pesar del fetch y tantos otros términos técnicos, los vientos siguen teniendo un gran tanto por ciento de poesía, algo del *hálito de los Dioses*. Hoy en día las denominaciones tales como *Meltemi*, *Simoun*, *Cierzo*, *Tramontana* y tantas otras siguen vigentes y obedecen a topografías locales que se engarzan en los vientos generales, y otras veces sustituyen o los suplantán. Una denominación particular de un viento dominante de la costa catalana que nos recuerda nuestro pasado árabe merece nuestra atención; se trata del *Garbí*, soplando del 235°. Dicho suroeste conserva todavía la denominación de "*oeste*" en lengua árabe actual: *Garb=Oeste*. Viento que equivale al *Embat* de la Bahía de Palma de Mallorca. Otros lugares bautizan a sus vientos con nombres tan sugerentes como *Virazón*, *Terral*, *Lemosino*, etc., poniendo de manifiesto que todavía en los albores del tercer milenio los vientos son algo más que la escueta definición del diccionario: "*aire en movimiento*".

1.2.- Equipos de medición

1.2.1.- Distintos tipos de anemómetros

Un anemómetro es un instrumento para medir la velocidad del viento o para la observación simultánea de la dirección y la velocidad del viento. En las mediciones del viento se suele especificar su intensidad o fuerza (unidad = m/s) y su dirección. Esta se expresa según un código alfabético que indica la dirección geográfica desde donde sopla el viento:

- **N**: Norte
- **E**: Este
- **S**: Sur
- **W**: Oeste
- y las direcciones intermedias, como **NE** o **SSW**

También se utiliza un código numérico que indica el ángulo desde donde sopla el viento, con respecto al Norte, de acuerdo a la siguiente convención:

- 0° = norte
- 90° = este
- 180° = sur
- 270° = oeste

En las estaciones meteorológicas el viento se mide a 10 m sobre la superficie y los sensores deben instalarse en un lugar bien expuesto. Se recomienda que si hay obstáculos que alteren la velocidad y dirección del viento, la distancia al punto de medición sea por lo menos unas 20 veces la altura del obstáculo.

A continuación se definen algunos tipos de anemómetros y la forma que tiene cada uno de ellos de realizar las medidas, sus puntos positivos y negativos:

1.2.1.1.- Anemómetro de copelas

Se mide la velocidad de rotación de una estructura formada por casquetes semi-esféricos o cazoletas que giran con respecto a un eje vertical por la acción del viento (ver fotografía). En los equipos modernos la velocidad de rotación de las copelas se mide mediante transductores eléctricos. El anemómetro está provisto también de una veleta para detectar la dirección del viento. En el caso de 4 copelas equiespaciadas se conoce también anemómetro de Robinson.



Ilustración 5: Anemómetro de copelas

1.2.1.2.- Veleta

Se utiliza para medir la dirección del viento. Está formada por una placa plana colocada en un plano vertical y que gira libremente orientándose siempre en la dirección del viento. En lugar de cazoletas el anemómetro puede estar equipado con hélices, aunque no es lo habitual.



Ilustración 6: Veleta

1.2.1.3.- Anemómetro de hilo caliente

Los anemómetros de hilo electrocalentado detectan la velocidad del viento mediante pequeñas diferencias de temperatura entre los cables situados en el viento y en la sombra del viento (cara a sotavento). El conductor se integra en un circuito eléctrico por el cual circula corriente. Si se mantiene constante la temperatura del conductor, la corriente eléctrica es una función conocida de la velocidad del viento. Los anemómetros de hilo caliente se utilizan cuando se requiere una alta tasa de muestreo de la velocidad del viento (por ejemplo en mediciones de turbulencia del viento). Son de alto costo, y requieren un mantenimiento frecuente.

1.2.1.4.- Anemómetro sónico

Este tipo de anemómetros se basa en que la velocidad de propagación del sonido depende de la velocidad del viento. Lo que se mide en este caso es el tiempo que demora una señal de sonido en atravesar una distancia conocida (normalmente unos 20 cm). Este intervalo de tiempo está relacionado con la velocidad del viento en la dirección entre el emisor y el receptor. Mediante una medición similar, realizada en una dirección perpendicular a la anterior, se puede calcular la velocidad total del viento y su dirección. Este instrumento es considerablemente más caro que el anemómetro de copela, pero tiene una mayor precisión y no requiere mantenimiento mecánico (no hay piezas en movimiento). Sin embargo tienen problemas para medir el viento cuando se registra precipitación (lluvia o nieve).

Como resumen se puede decir que la ventaja de los anemómetros no mecánicos es que son menos sensibles a factores como por ejemplo la formación de hielo, que en el caso de los anemómetros de copela o veletas trae consigo un incorrecto funcionamiento. Además, suelen traer un mejor funcionamiento y una mayor precisión, aunque sin embargo en la práctica los anemómetros de cazoletas son ampliamente utilizados, y

modelos especiales con ejes y cazoletas eléctricamente calentados pueden ser usados en las zonas árticas (para resolver el problema enunciado anteriormente como ejemplo).

Existen además otros tipos de anemómetros similares a los que usan ultrasonidos, pero basándose en los fenómenos que suceden en la luz. Están provistos en este caso de un láser, y tratan de detectar el desfase de la luz coherente reflejada por las moléculas de aire.

Se pueden comprar anemómetros sorprendentemente baratos de algunos de los principales vendedores del mercado que, cuando realmente no se necesita una gran precisión, pueden ser adecuados para aplicaciones meteorológicas. Sin embargo, los anemómetros económicos no resultan de utilidad en las mediciones de la velocidad de viento que se llevan a cabo en la industria eólica, dado que pueden ser muy imprecisos y estar pobremente calibrados, con errores en la medición de quizás el 5 por ciento, e incluso del 10 por ciento.

En un lugar superior se encuentra el **anemocinemógrafo**. Es un instrumento de



uso meteorológico que se utiliza para obtener un registro continuo de la dirección, recorrido y velocidad del viento. Se trata, en sí, de un anemómetro cuyo vástago de flotador se conecta a una plumilla entintada, lo que lo hace convertir en anemocinemógrafo. Éste se compone de un transmisor (constituido por la rueda de cazoletas que funcionan como anemómetro de Robinson), una veleta, un anemómetro neumático y un receptor, situado por debajo del transmisor y que presenta dos plumillas conectadas a la veleta (dibujan la dirección del viento), una plumilla gobernada por el anemómetro de Robinson (dibuja el recorrido) y otra conectada al anemómetro neumático (registra la velocidad o ráfagas máximas de viento).

Ilustración 7: Anemocinemógrafo

1.2.2.- Anemómetros comerciales

En la siguiente tabla se pretende mostrar unos ejemplos de anemómetros que son ofrecidos en la dirección de **Amidata** (www.amidata.es) para poder comparar los resultados con unos productos que actualmente están en el mercado. Se trata de distintos tipos de anemómetro, de distinto tipo de funcionamiento (los hay de hilo caliente, de palas giratorias...), pero que todos ofrecen unos valores sobre sus características en dicha dirección web. Además, también ofrecen un precio para cada dispositivo, que normalmente se decrementa al realizar una compra de más de 3 unidades. El precio que se muestra es para el caso de comprar 1 única unidad.

Modelos	Velocidad del viento		Temperatura		Precio unitario
	Rango (m/s)	Precisión	Rango (°C)	Precisión	
AM-4204	0,2-20	±5%	0 a 50	0,8 °C	207,41€
XD1635	1,5-58	±0,2 m/s a 10 m/s ±0,3 m/s a 4m/s	-10 a 50	±0.1% ±1 °C	100,02€
KESTREL 3000	0,3-40	±3%	-15 a 50	±1 °C	272,92€
RS 180-7111	0,4-25	±4% fondo escala	0 a 60	0,8 °C	173,50€
AM-4201	1-20	±5%	--	--	145,63€

Se observa el elevado precio unitario que tienen este tipo de medidores, por lo que resulta interesante la realización de un anemómetro de menor coste, y de un valor de precisión similar si se puede, para el uso requerido, expuesto en el apartado referente a la motivación de este proyecto.

1.3.- Fundamentos de ultrasonidos

1.3.1.- Introducción a ultrasonidos

Las *ondas elásticas* son aquellas en las cuales la perturbación (sea ésta una deformación, una presión o el desplazamiento de un volumen que contiene muchos átomos) se propaga con una velocidad que depende de las propiedades elásticas del medio. En este tipo de ondas se encuentran encuadrado el **sonido**.

En el lenguaje popular el sonido está relacionado con la sensación auditiva. Siempre que una onda elástica que se propaga a través de un gas, un líquido o un sólido, alcance nuestro oído, produce vibraciones en la membrana auditiva; estas vibraciones provocan una reacción del nervio auditivo y el proceso se conoce como audición. Pero nuestro sistema nervioso produce una sensación auditiva solamente para las frecuencias comprendidas entre los 16 Hz y 20.000 Hz (el intervalo de frecuencias audibles es diferente para otros animales). Fuera de estos límites, el sonido no es audible, aunque a las ondas elásticas correspondientes se les sigue llamando sonido. La física de las ondas elásticas de frecuencia por encima de los 20.000 Hz se denomina *ultrasónica*. En la figura se muestra el *espectro acústico*, que se divide en 3 rangos de frecuencia. El rango ultrasónico se divide a su vez en 3 subsecciones.

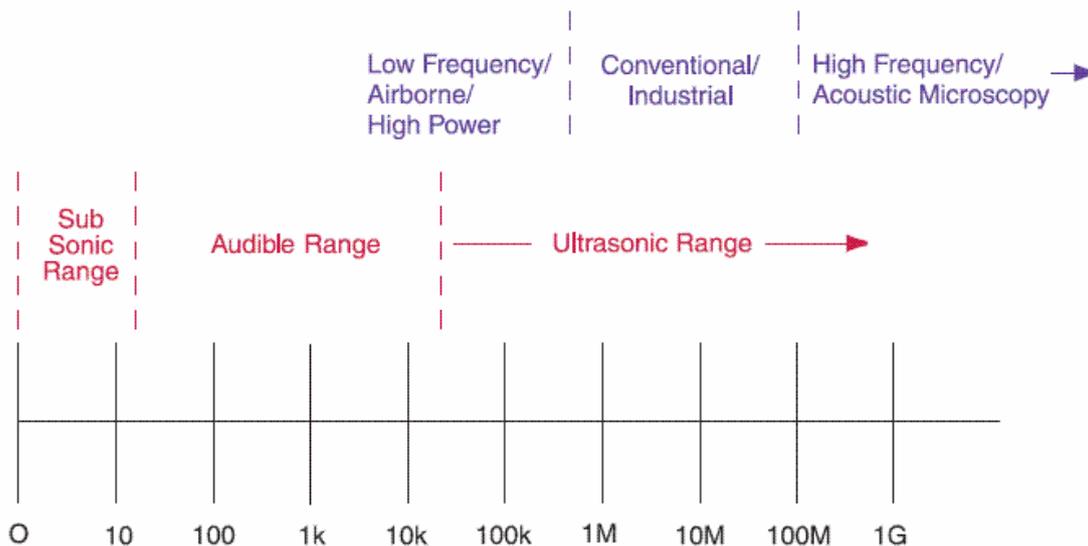


Ilustración 8: División del espectro acústico

La ciencia que trata de los métodos de generación, recepción y propagación del sonido se llama *acústica*. Esta cubre realmente muchos campos y está íntimamente relacionada con varias ramas de la ingeniería. Entre los campos de la acústica está el diseño de instrumentos acústicos, incluyendo la electroacústica, que trata de los métodos de producción y registro del sonido por medios eléctricos (micrófonos, altoparlantes, amplificadores, etc.).

El sonido, como ya se ha explicado, involucra el desplazamiento de átomos y moléculas del medio en el cual se propaga. Pero este desplazamiento se debe a un movimiento colectivo ordenado en el cual todos los átomos de un pequeño volumen experimentan esencialmente el mismo desplazamiento. El resultado neto es que la intensidad del sonido disminuye o se atenúa mientras la onda sonora se propaga porque parte de la energía de la onda se disipa en los choques entre las moléculas del medio. Esto da como resultado un aumento en la energía interna molecular, principalmente en las energías de rotación y de traslación. En los líquidos la viscosidad, que en esencia es un efecto del movimiento molecular, también desempeña un papel importante en la atenuación del sonido.

La velocidad del sonido es prácticamente independiente de la frecuencia para un amplio intervalo de frecuencias que se extiende hasta por encima de 10^8 Hz. El valor de esta velocidad para diferentes sustancias se da en la siguiente tabla, medida en metros por segundo:

Sólidos (20°)		Líquidos		Gases (0°)	
Acero	5890	Agua dulce	1493,2	Aire	331,45
Cobre	4660	Agua mar	1532,8	Hidrógeno	1269,5
Aluminio	6320	(salinidad 3,6%)		Oxígeno	317,2
PVC	2395	Kerosén	1315	Nitrógeno	339,3
Madera	3900	Mercurio	1450	Vapor (100°)	404,8

La velocidad de propagación es, sin embargo, **dependiente de la temperatura y de la presión porque la densidad depende de esos factores**. La velocidad del sonido varía ante los cambios de temperatura del medio. Esto se debe a que un aumento de la temperatura se traduce en que aumenta la frecuencia con que se producen las interacciones entre las partículas que transportan la vibración y este aumento de actividad hace que aumente la velocidad. Estos cambios se pueden dar dentro de un mismo material, así provocando casos como el de la nieve, que se explica más adelante cuando se habla de la refracción, donde gracias a estas refracciones producidas bajo la superficie de nieve debido a la diferencia de temperatura, el sonido es capaz de desplazarse atravesando grandes distancias.

1.3.2.- Velocidad del sonido en el aire

En este caso las propiedades físicas del aire, su presión y humedad por ejemplo, son factores que afectan la velocidad. Por ejemplo, cuanto mayor es la temperatura del aire mayor es la velocidad de propagación. La velocidad del sonido en el aire aumenta aproximadamente 0,6 m/s por cada 1° C de aumento en la temperatura.

Una ecuación más exacta, referida normalmente como velocidad adiabática del sonido, viene dada por la fórmula siguiente:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R \cdot T}{m}}$$

donde

- R es la constante de los gases,
- m es el peso molecular promedio del aire ($R/m = 287 \text{ J/KgK}$ para el aire),
- κ es la razón de los calores específicos ($\kappa = c_p/c_v$ siendo igual a 1,4 para el aire), y
- T es la **temperatura absoluta** en grados kelvin.

Hay que decir que esta ecuación es solamente una aproximación de primer orden para amplitudes infinitesimales de presión del sonido. Para mayores amplitudes la densidad ρ ya no puede ser considerada como constante.

De esta primera ecuación se deduce que c_0 , velocidad del sonido para el caso de una temperatura de 0 °C ($T=273 \text{ °K}$) es de:

$$c_0 = \left(273 \cdot \frac{k \cdot R}{m}\right)^{1/2}$$

A partir de este valor, se puede llegar a una expresión mucho más sencilla y manejable para el valor de la velocidad del sonido en el aire de la siguiente forma:

$$c = c_0 \left(1 + \frac{T^{\circ\text{C}}}{273}\right)^{1/2} \cong c_0 + \frac{c_0 \cdot T^{\circ\text{C}}}{546}$$

Teniendo en cuenta que el valor de c_0 para atmósfera normal se puede tomar por 331,5 m/s, una velocidad aproximada (en m/s) puede ser calculada mediante la siguiente fórmula, comprobada también de forma empírica:

$$c \cong (331,5 + 0,6 \cdot T^{\circ C}) \text{ m/s}$$

donde $T^{\circ C}$ es la temperatura en grados centígrados.

Esta ecuación lineal es una muy buena aproximación en el rango de temperatura ambiental normal, por lo que será la usada posteriormente para el cálculo de la temperatura.

En una atmósfera estándar se considera que T es 293,15 °K, dando un valor de 343 m/s ó 1.235 Km/h. Esta fórmula supone que la transmisión del sonido se realiza sin pérdidas de energía en el medio, aproximación muy cercana a la realidad.

1.4.- Motivación del proyecto

El objetivo del proyecto es la realización de un anemómetro prototipo de bajo coste para su integración en vehículos. Este anemómetro sustituirá a la tradicional veleta y debe permitir alcanzar una precisión aceptable y no conducir a errores como el que se producía por vientos que la hacían girar continuamente.

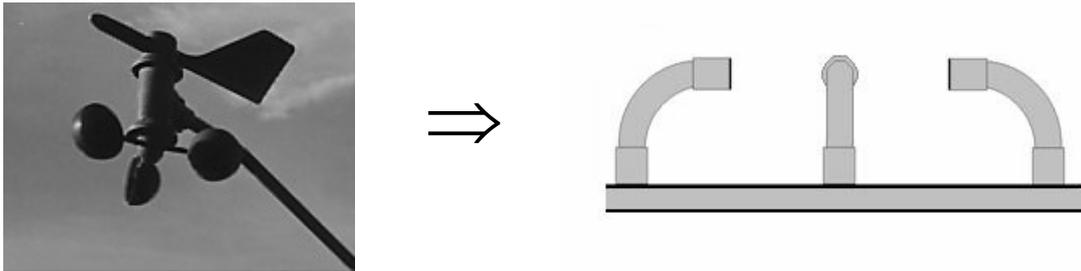


Ilustración 9: Paso que se quiere dar en la forma de medir del viento

En la ilustración se refleja el cambio que se quiere tener en la manera de realizar las medidas, pasando de utilizar la veleta como se hacía anteriormente al nuevo diseño con transductores ultrasónicos. Se va a intentar realizar un montaje (en la figura se tiene un ejemplo de un posible resultado) donde con la utilización de sensores de ultrasonidos enfrentados en ambas direcciones se consiga una estimación de los dos resultados que nos ofrecería una veleta como la de la primera figura, la velocidad y la dirección del viento.

En estos vehículos se pretende introducir esta equipación de medida dentro de un conjunto de sistemas que también se quieren instalar, como un medidor de campo magnético terrestre para poder localizar el norte magnético de la tierra. Todos los sistemas que se quieren instalar se pretende que sean de bajo coste.

Otro objetivo del proyecto será la introducción tanto al mundo de los sensores de ultrasonidos, no utilizados en el departamento anteriormente, como a algunos tipos de elementos comerciales como amplificadores, multiplexores y switches. Se pretende indagar en su funcionamiento para escoger la mejor solución para el problema. Además de estos elementos se van a usar otros ya conocidos como el PIC que actuará como microcontrolador y será el que maneje el resto del circuito.