



Capítulo 7

Método de cálculo

- 7.1.- Introducción**
- 7.2.- Procedimiento de medida**
 - 7.2.1.- Cálculo de la dirección**
 - 7.2.2.- Cálculo de la velocidad**
- 7.3.- Fuentes y causas de errores**
 - 7.3.1.- Errores Hardware**
 - 7.3.2.- Errores Software**

7.1.- Introducción

Tras la estimación del tiempo que tarda la señal en realizar los dos trayectos en ambos sentidos en una dirección, se debe proceder al cálculo de la velocidad para esa dirección a partir de esas medidas. Para ello el microprocesador enviará los datos resultados al PC para que este los interprete. Estos valores que se obtienen y que serán enviados al ordenador mediante la conexión serie vienen enunciados y descritos a continuación:

Variable	Descripción	Formato	Rango
dif01	Estos valores se corresponden con la diferencia de tiempos entre los trayectos correspondientes a los dos sentidos de una misma dirección. Trata de decir, con poco error, en qué cantidad de tiempo se diferencia la medida realizada de una medida en condiciones de reposo o no viento	Entero con signo de 8 bits	[-128, 127]
dif23			
med01	En este caso lo que se envía es la media de tiempos de cada dirección. Este valor no debe variar mucho con la velocidad del viento, manteniéndose casi constante. Si dependerá en cambio de la temperatura, por lo que podría ser usado para el cálculo de la misma	Entero unsigned de 16 bits	[0, 65535]
med23			

La unidad de estos valores será la **décima de microsegundo**, que es la resolución que se puede alcanzar con el TIMER del PIC y el reloj utilizado de 40 MHz. Esta unidad debe ser conocida para interpretar los datos en el programa de visualización de resultados.

Existirán varias formas de realizar ese cálculo de la velocidad, cada una de ellas con ventajas e inconvenientes en cuanto a facilidad y precisión, aunque se debe elegir la más conveniente aunque no sea la más precisa, siempre que se tenga controlado el error que provoca y que esté dentro de unos rangos donde no se pierda demasiada precisión. Este error dará una medida de la fiabilidad de la medida, por lo que conviene conocerlo para intentar rectificarlo o para tener un control de las posibles desviaciones sobre la medida real.

7.2.- Procedimiento de medida

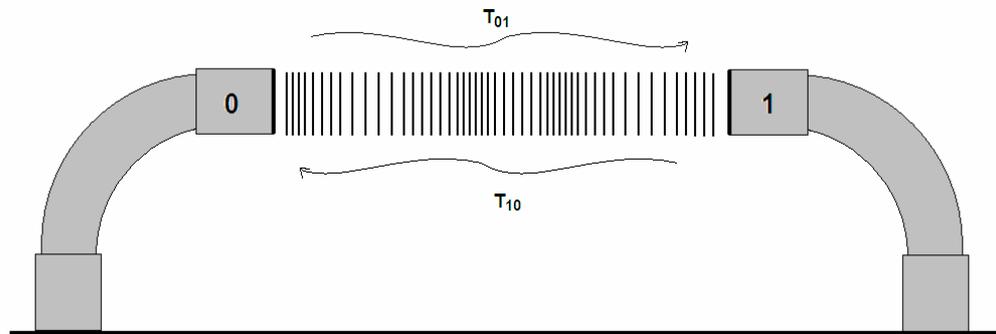


Ilustración 65: Datos iniciales

Después de un ciclo de medida, el PIC cuenta con los valores que ha obtenido del timer (T_{01} y T_{10} en la dirección 01) para los dos sentidos de cada dirección. Pero ese tiempo que ha capturado el PIC tendrá un valor superior al verdadero, ya que la captura no se producirá en el momento del comienzo de la recepción sino algo después como se tiene reflejado en la figura correspondiente al instante de recepción e interrupción.

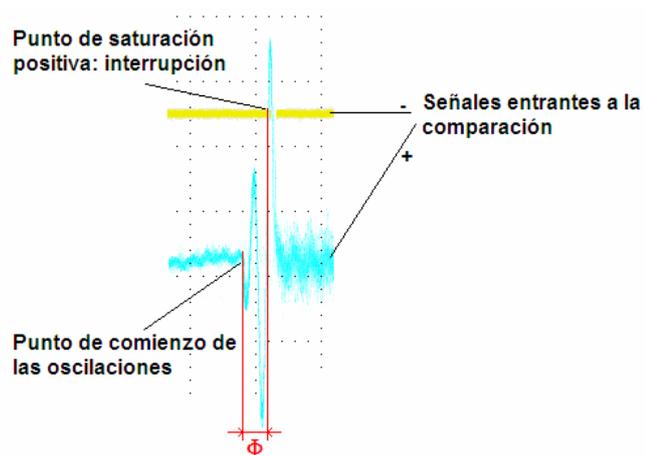


Ilustración 66: Tiempo de retraso

Ese 'tiempo residual' (Φ) comprenderá tanto el tiempo que transcurre desde el comienzo de las oscilaciones hasta el punto donde se supera la referencia como el retraso que se pueda tener en la comparación. Pero es importante ver que será el mismo para todas las medidas ya que todas pasan por la misma cadena de amplificación y comparación. Sería bueno tener su valor, aunque no resulta necesario conocerlo. Por lo tanto, las medidas que tendremos serán:

$$\left. \begin{aligned} T_{01} &= t_{01} + \Phi \\ T_{10} &= t_{10} + \Phi \end{aligned} \right\} \text{donde } t_{01} \text{ y } t_{10} \text{ serán los tiempos reales}$$

De esta manera se puede ver que si no se conoce ese tiempo residual será difícil tener una estimación del tiempo que tarda realmente, pero con estos dos valores si se pueden obtener otros como los siguientes, que si son útiles:

$$\left. \begin{array}{l} T_{01} = t_{01} + \Phi \\ T_{10} = t_{10} + \Phi \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T_{01} - T_{10} = t_{01} - t_{10} \rightarrow \text{No depende de } \Phi \\ T_{01} + T_{10} = t_{01} + t_{10} + 2\Phi \end{array} \right.$$

Estos dos valores son los que el PIC envía como resultado. El primero de ellos se puede usar directamente ya que plasmaría directamente el valor de la diferencia de tiempos en una dirección, valor que se puede usar para el cálculo de la dirección y de la velocidad. El segundo tiene aplicaciones en cuanto al cálculo de la temperatura.

El valor diferencia será usado de la siguiente forma:

$$T_{01} - T_{10} = t_{01} - t_{10} = (t + \Delta t_{01}) - (t + \Delta t_{10})$$

$$\text{Suponemos} \Rightarrow \Delta t_{01} \cong -\Delta t_{10}$$

$$T_{01} - T_{10} = 2 \cdot \Delta_{01}$$

Se obtiene directamente la diferencia de tiempo con respecto a la situación de no viento, en la cual ambos tiempos T_{01} y T_{10} deben ser iguales, y como resultado se debería de obtener un valor de diferencia $\Delta_{01} = 0$. De la forma que se explicará a continuación se procederá para los cálculos.

Los datos correspondientes a las dos direcciones serán recibidos por el programa de Labview, que es que debe mostrar por pantalla los resultados finales. Se tienen los siguientes datos:

$$\Delta_{01} = \frac{T_{01} - T_{10}}{2} \Rightarrow \text{Incremento de tiempo en la dirección 01}$$

$$\Delta_{23} = \frac{T_{23} - T_{32}}{2} \Rightarrow \text{Incremento de tiempo en la dirección 23}$$

Los dos datos son procedentes directamente del procesamiento en el microcontrolador, pero provienen de dos direcciones que pueden tener distinta distancia entre sensores. Sería aconsejable que fuera la misma distancia, pero en el caso de que no lo sea, siempre que ambas sean distancias muy parecidas y entorno a los 20cm de separación.

En el caso de que la diferencia entre esas dos distancias si sea apreciable se puede optar por normalizarlas. De esta forma se tendrán con respecto a la misma distancia, y así se puede evitar ese error. Para ello sólo habría que realizar lo siguiente:

$$\Delta t' = \Delta t \cdot \frac{20 \text{ cm}}{d \text{ (cm)}}$$

En cualquiera de los dos casos, tras normalizar o no, se tendrán dos valores, uno para cada dirección, que durante la explicación de los cálculos serán Δ_{01} y Δ_{23} .

7.2.1.- Cálculo de la dirección

Para calcular e indicar la dirección del viento nos vamos a basar en los datos de diferencia anteriores. Estos datos serán suficientes para dar una estimación tanto del ángulo como de la velocidad. Los errores que se puedan tener en ambos casos serán tratados posteriormente.

Una vez que se tienen esos valores el cálculo del ángulo se realizará fácilmente de la siguiente forma:

$$\Phi = \arctg \frac{\Delta_{32}}{\Delta_{01}} = \arctg \frac{-\Delta_{23}}{\Delta_{01}}$$

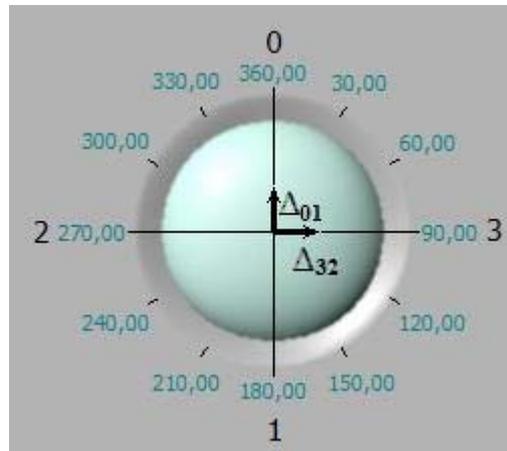


Ilustración 67: Detalle de la representación de los ángulos por Labview

La función arcotangente nos dará como resultado un ángulo comprendido entre $\pm 90^\circ$. Para ubicar correctamente siempre la dirección y el sentido se debe realizar la siguiente operación sobre el valor resultado, siendo ejecutada por ejemplo en la parte de Labview:

```

if(Δ₀₁<0)
    Φ=Φ+180;
else if(Δ₃₂<0)
    Φ=Φ+360;

```

7.2.2.- Cálculo de la velocidad

Para averiguar este valor se procederá por el procedimiento que se define a continuación. La velocidad y el tiempo no tienen una dependencia lineal por lo cual para hallar su valor exacto en cada momento no basta con multiplicar por una constante para así a partir de la diferencia de tiempo tener un resultado completamente preciso. Por esta razón se debe evaluar el error que se produce y estimar si es demasiado elevado o no al aproximar por linealidad el resultado:

$$v = \frac{e}{t} \Rightarrow \Delta v = \frac{\partial v}{\partial t} \Delta t \Rightarrow \boxed{\Delta v = \frac{-e}{t^2} \Delta t} \quad \text{siendo:}$$

- Δv : incremento de la velocidad (m/s)
- e : separación entre los sensores
- Δt : diferencia de tiempo entre los dos recorridos
- t : tiempo que tarda en recorrer la distancia e

De los valores usados para calcular el aumento en la velocidad del viento Δv (con respecto a la situación de reposo o viento nulo) la distancia entre sensores e tiene que ser una longitud constante y conocida, para ser usada sin que influya en los cálculos y no añada ningún error ni ninguna incertidumbre a los resultados. El valor de incremento de tiempo se obtiene fácilmente usando los valores procedentes de las medidas, y será enviado directamente por el PIC:

$$T_{01} - T_{10} = t_{01} - t_{10} = 2\Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{T_{01} - T_{10}}{2}$$

En el caso del tiempo t en que recorre la separación e no se obtiene tan directamente como Δt . El tiempo en recorrer una distancia e dependerá no sólo del valor de esa distancia, sino de factores externos como la temperatura, que alteran la velocidad de desplazamiento del ultrasonido. Como ya se ha visto anteriormente, los valores que ofrecerá el microcontrolador comprenderán como resultado lo que se explica a continuación:

$$T_{01} + T_{10} = t_{01} + t_{10} + 2\Phi$$

El inconveniente que se tiene al dar un valor en función de las medidas realizadas es que sería conveniente conocer ese tiempo residual para restarlo a las medidas. Además, la media mostrada como resultado de una dirección iría cambiando conforme la velocidad del viento cambia. En la siguiente gráfica se muestra como

ejemplo como la media de tiempos se hace mayor según la velocidad del viento crece, para una distancia de 20cm y una temperatura de 20 °C.

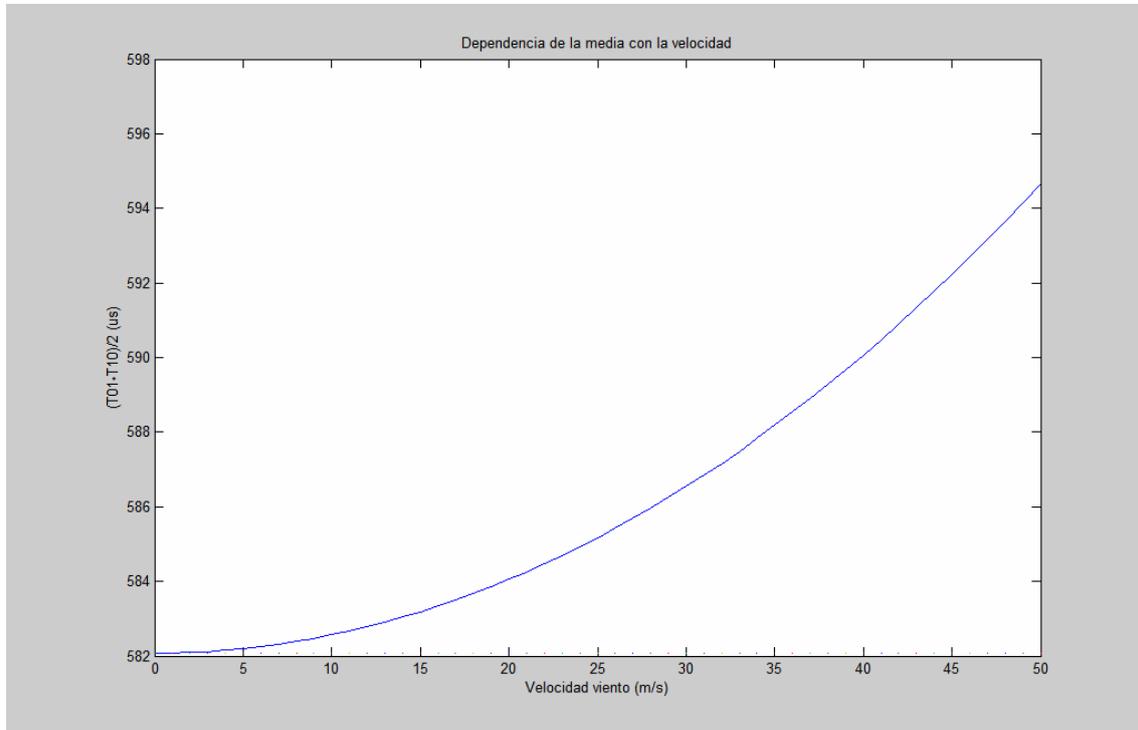


Ilustración 68: Tiempo medio según velocidad para una tª de 20 °C

En la gráfica se ve como para las condiciones de temperatura y distancia expuestas anteriormente la media de tiempos en una dirección no es constante si no que sufre un pequeño aumento en su valor. Parece poco lineal pero al comprobar a cuanto puede ascender el error se ve que la diferencia no excede el 2% del valor inicial para una velocidad del viento de 50 m/s. Estos datos teóricos que se expresan en la gráfica anterior provienen del cálculo siguiente:

$$\text{Teóricamente} \rightarrow \frac{t_{01} + t_{10}}{2} = \frac{\frac{e}{c+v} + \frac{e}{c-v}}{2} = \frac{e \cdot c}{c^2 - v^2}$$

Esos valores resultado de tiempo T_{01} y T_{10} aparecen con un tiempo residual Φ sumado a los tiempos reales que se van buscando (t_{01} y t_{10}). Una opción podría ser intentar estimarlo en la medida de lo posible. Para ello se propone un método en el proyecto, que se expondrá en posteriormente. Si no es posible se puede dar también un valor estándar para una distancia y una temperatura normal de funcionamiento.

Recordemos que lo que se quiere averiguar es la velocidad pero el problema fundamental está en estimar ese tiempo t de propagación.

Con lo expuesto hasta ahora, una vez comprobado que el error será pequeño al aproximar por linealidad, se llega a que para calcular la velocidad se hará lo siguiente:

$$\Delta v_{01} = \frac{-e}{t^2} \Delta t_{01} = k \cdot \Delta t_{01}$$

Esa constante k (con unidades de aceleración m/s^2) la obtendremos para un caso de funcionamiento normal, sensores separados 20 cm y temperatura de 20 °C. En esta situación se tienen los siguientes valores:

$$T^a = 20^\circ C$$

$$e = 20cm$$

$$t = \frac{e}{c} = \frac{e}{331,5 + 0,6 \cdot T^a} = \frac{0,2}{331,5 + 0,6 \cdot 20} = 582 \mu s$$

Para este caso, el valor buscado es el siguiente:

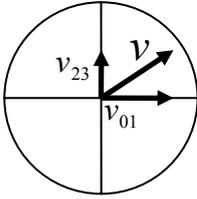
$$k = \frac{-e}{t^2} = \frac{-0,2}{(582 \cdot 10^{-6})^2} = -589961,25 m/s^2$$

Como el programa nos dará el resultado en décimas de microsegundo, se debe ajustar ese valor para que al realizar la multiplicación la velocidad Δv se obtenga directamente en m/s . Esta parte la realizará el programa Labview y para la correcta visualización del resultado el valor de k a utilizar es el siguiente:

$$k = -589961,25 m/s^2 \Rightarrow k = -0,058996125 m/(s \cdot 10^{-1} \mu s) \Rightarrow \boxed{k = -0,059}$$

Este resultado sirve para calcular la velocidad a partir de una diferencia de tiempo para una dirección. En nuestro caso se tienen las dos direcciones perpendiculares y se debe calcular la velocidad total, en principio no interesan las velocidades en las dos direcciones. Para calcularla basta con realizar un sencillo cálculo, y será realizado en la parte de Labview tras recibir los datos.

Se tendrá la siguiente situación para hallar la velocidad total. Se tiene una diferencia de tiempo para cada una de las dos direcciones. Habrá que formar la velocidad total a partir de esas dos componentes:



$$\left. \begin{aligned} v &= \sqrt{v_{01}^2 + v_{23}^2} \\ v_{01} &= k \cdot \Delta t_{01} \\ v_{23} &= k \cdot \Delta t_{23} \end{aligned} \right\} \Rightarrow v = \sqrt{k^2 \cdot (\Delta t_{01}^2 + \Delta t_{23}^2)} = |k| \cdot \sqrt{\Delta t_{01}^2 + \Delta t_{23}^2}$$

En este caso no se ha de tener en cuenta ningún signo ya que lo que se busca es el módulo de la velocidad, la dirección se calcula fácilmente como se explicó en su apartado correspondiente. De esta forma se tiene que como resultado la velocidad final será:

$$v = 0,059 \cdot \sqrt{\Delta t_{01}^2 + \Delta t_{23}^2}$$

7.3.- Fuentes y causas de errores:

El anemómetro realizado, al igual que cualquier aparato de medida que se pueda encontrar, tendrá una precisión máxima que es la que se debe dar como dato de nivel de exactitud del dispositivo. La desviación del valor real puede venir dada por dos tipos de errores:

Errores sistemáticos: estos errores aparecerán siempre en las medidas y serán provocados por diferencias de valor o de funcionamiento entre los dispositivos ideales incluidos en el diseño y los reales que se incluirán en el diseño. Se tendrán que averiguar en lo posible ya que al ser siempre lo mismo pueden ser fácilmente rectificadas. El objetivo será tenerlos lo más controlados posibles para poder llegar a rectificarlos si se pudiera dar el caso.

Errores aleatorios: estos errores aparecen por la naturaleza física de los componentes y seguirán distribuciones aleatorias por lo que no se podrán eliminar, pero si acotar y definir. En este caso, el objetivo estará en intentar hacerlos lo menor posibles para tener una medida lo más cercana a la realidad.

Estos dos tipos de errores son los que existirán en cualquier instrumento de medida, por ello se hace importante la calibración de los distintos equipos cada cierto tiempo. Deben tenerse en todo momento acotados dentro de un cierto margen, que permita dar las medidas como buenas. A continuación se describirá una posible clasificación de errores que nos podremos encontrar en nuestro diseño:

7.3.1.- Errores Hardware:

Estos errores pueden venir dados, por desviaciones en el valor y en el comportamiento de cualquier componente presente en la placa de pruebas, ya que no son componentes ideales y presentarán desviaciones en su comportamiento. El ejemplo más sencillo es una resistencia, cuyo valor nominal no tiene porqué coincidir con el real, sino que presentará un margen de tolerancia donde ese valor puede flotar. Estas diferencias provocarán pequeños cambios en el resto del circuito. Por ejemplo, si está integrada en un filtro puede variarse ligeramente la posición de algún polo.

Un error de este tipo puede ser provocado también por la disparidad de dos elementos que deberían funcionar de la misma forma o que deberían ser iguales. Como ejemplo se tienen las dos resistencias que hay en los pines de los sensores, que deben tener un valor lo más parecido posible.

Otro error de este tipo podría venir provocado si se intentase averiguar el valor de ese tiempo residual, que se dijo que sería bueno conocer para las medidas. El error viene en que ese tiempo no será el mismo para todas las placas que se puedan montar, sería propio para cada una de ellas. Si se usa este tiempo podría causar un error que se debe intentar evitar en lo posible, intentando no hacer necesario el cálculo de ese valor si no es necesario.

Con el tiempo los dispositivos pueden ir cambiando sus características o sus valores. En este caso este error es fácil de contrarrestar con un calibrado cada cierto periodo de tiempo.

Los tipos anteriores se refieren a errores sistemáticos que vienen dados por los componentes físicos del sistema. Generarán por tanto un resultado que no es siempre constante y preciso, sino levemente variable sobre un valor central. Se generará por tanto un resultado de tiempo que variará ligeramente, aunque se mantendrá siempre entre los mismos valores.

7.3.2.- Errores Software:

Estos errores serán producidos por las partes programables del sistema, es decir, en el programa en C que se incluye en el PIC o en la rutina de LabView que se ejecuta en el ordenador.

En cuanto al programa en C, las muestras escogidas pueden ser afectadas por algunas muestras erróneas que pueden afectar al resultado. Hay que tratar de hacer un código lo suficientemente robusto para que sea lo más insensible posible a estos errores y no tenga en cuenta las muestras que se desvíen de las medidas correctas.

Otro posible error viene dado porque en la parte de Labview se van a fijar unos umbrales a partir de los cuales ofrecer un resultado. Esto se hace porque, como se dijo anteriormente, no se obtendrá un resultado fijo, y por tanto no serían correctas las mediciones por debajo de ese nivel de seguridad.