

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

*Departament d'Enginyeria Electrònica*

**CONTRIBUCIÓN A LA MEJORA DE  
RESOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE  
OBTENCIÓN DE IMÁGENES POR  
ULTRASONIDOS**

Autor: Jordi Salazar Soler  
Director: Miguel J. García Hernández

Diciembre de 1997

## **CAPÍTULO 5**

# **Aplicación a métodos de medida por ultrasonidos**

### **5.1 Introducción.**

En la mayoría de las aplicaciones, la medida de distancia se realiza a partir de la velocidad de la onda de ultrasonidos evaluando el tiempo de vuelo de la onda (TOF) sobre dicha distancia. Desde el punto de vista tecnológico, como la velocidad de propagación de las ondas de ultrasonidos es entre 5 y 6 ordenes de magnitud más baja que la de las ondas electromagnéticas, la circuitería electrónica así como el propio transductor necesitan ser menos exigentes en cuanto a ancho de banda. Existe no obstante una gran desventaja que es la gran dependencia de la velocidad de las ondas de ultrasonidos con los parámetros del medio y su alta atenuación y dispersión, especialmente en aire que hace que los métodos de medida por ultrasonidos estén limitados a pequeñas distancias comparados con los métodos electromagnéticos.

## 5.2 Dependencia de la velocidad de la onda de ultrasonidos con los parámetros del medio de propagación.

Como se ha indicado en la introducción de este capítulo, una medida por ultrasonidos está basada en el uso de la velocidad de propagación de la onda de ultrasonidos. Por tanto, la medida se verá afectada por las fluctuaciones que puedan producirse en el valor de la velocidad durante la medida. La velocidad de la onda de ultrasonidos depende de las características del medio, entre ellas la temperatura, la humedad, el flujo de aire, etc. En consecuencia, si es posible reducir el tiempo que dura la medida, menos probabilidades habrá de que haya existido un cambio en la velocidad del aire y más precisa será la medida.

La influencia de los parámetros físicos del medio en la velocidad de propagación de una onda de ultrasonidos se muestra particularmente fuerte en el caso del aire.

La velocidad del sonido en función de la temperatura viene dada la expresión [KOCI96]

$$c = c_0 \sqrt{\frac{\Theta}{\Theta_0}} = c_0 \sqrt{\frac{\Theta_0 + \vartheta}{\Theta_0}} = 331.56 \sqrt{1 + 0.366\vartheta} \quad (5.1)$$

donde  $c_0$  es la velocidad del sonido a 0 °C,  $\Theta$  la temperatura absoluta [K] y  $\vartheta = \Theta - \Theta_0$  la temperatura en °C. La influencia de la temperatura representa un error en la medida de 0.1381 %/°C, el cual tiene una especial relevancia cuando se requiere realizar medidas precisas.

La influencia de la humedad del aire es menor. La expresión que define esta dependencia es [KOCI96]

$$c_d = c_h \sqrt{1 - \frac{e}{p_a} \left( \frac{\gamma_w}{\gamma_a} - \frac{5}{8} \right)} \quad (5.2)$$

donde

- $c_d$ : velocidad del sonido en aire seco
- $c_h$ : velocidad del sonido en aire húmedo
- $e$ : presión del vapor de agua
- $p_a$ : presión atmosférica
- $\gamma_w$ : relación de los calores específicos a presión constante y a volumen constante para el vapor de agua
- $\gamma_a$ : relación de los calores específicos a presión constante y a volumen constante para el aire

El flujo de aire representa una contribución mucho más significativa a la velocidad de propagación de una onda de ultrasonidos. El error en la medida causado por el flujo de aire es proporcional al vector velocidad en la dirección entre el transmisor y el receptor. Por ejemplo, el cambio en la velocidad de propagación es ya del 0.15% para una velocidad del flujo de aire de 0.5 m/s (en la dirección de propagación del sonido). Así en la medida de una distancia de 1 m, la velocidad del flujo de aire produce un error de 1.5 mm.

La compensación de los errores producidos en la medida debidos a cambios en la temperatura ambiente o la humedad suele hacerse sin que ello conlleve una complicación excesiva mediante el uso de sensores específicos. No ocurre lo mismo con los cambios en la velocidad de propagación por tratarse ésta de una magnitud vectorial y necesitarse una disposición compleja de sensores para su medida.

### 5.3 Métodos de medida.

Los métodos de medida por ultrasonidos pueden dividirse fundamentalmente en dos grandes grupos atendiendo al tipo de señal utilizada en las medidas. Así, nos encontraríamos con los métodos que utilizan onda continua y con los métodos que se basan en la utilización de pulsos de ultrasonidos.

En el caso de onda continua, la distancia medida se evalúa a partir del desfase existente entre la onda transmitida y la recibida. En el caso de utilización de pulsos de ultrasonidos, se evalúa el tiempo de propagación del pulso desde el transmisor al receptor.

En concreto, nuestro interés se centra en los métodos pulsados, siendo estos los que serán tratados en este capítulo.

### 5.4 Métodos pulsados de medida.

#### 5.4.1 Principio de medida.

Cuando se realiza una medida basada en pulsos de ultrasonidos, el requerimiento fundamental es medir el tiempo de vuelo o propagación del pulso de ultrasonidos de forma tan precisa como sea posible, desde su origen en el transmisor hasta su incidencia en la superficie del receptor.

En la figura 5.1 se ilustra el principio básico de medida así como las formas de onda más relevantes. El instante de comienzo de la medida viene marcado por el pulso eléctrico de excitación del transductor,  $V_i$ . Tras ser convertido por el transmisor en un pulso de ultrasonidos, éste viaja con velocidad  $c$  hacia el receptor. La señal  $V_i$  actúa sobre el conformador de pulsos haciendo que  $V_p$  pase a valor lógico '1', habilitando de esta

forma el contador de pulsos de reloj. En el momento en que el receptor detecta la llegada del pulso acústico, el pulso de salida del amplificador,  $V_a$ , actúa sobre el conformador de pulsos haciendo que  $V_p$  pase a valor lógico '0'. Es en este momento que finaliza el conteo por parte del contador.

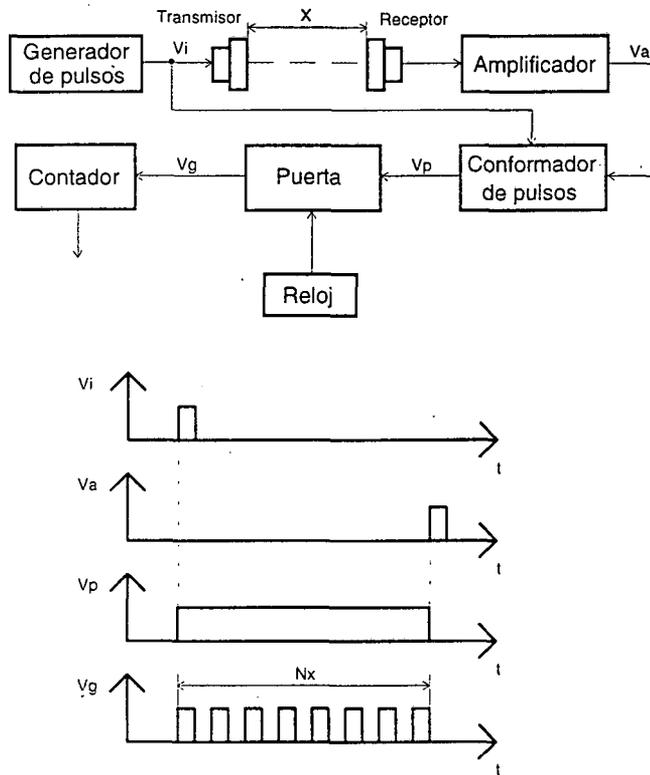


Fig. 5.1 Medida de distancias con un método pulsado.

Al terminar la medida, el número de pulsos contabilizados por el contador,  $N_x$ , se corresponderá con la distancia medida  $x$ . Ésta depende del tiempo de propagación del pulso de ultrasonidos según la expresión

$$x = c \cdot t_x \tag{5.3}$$

Por otro lado, el número de pulsos contabilizados,  $N_x$ , puede calcularse como

$$N_x = f \cdot t_x \tag{5.4}$$

La medida realizada se ve afectada por un error de discretización debido a la conversión realizada entre tiempo y número de cuentas. En consecuencia, utilizando las expresiones (5.3) y (5.4), la distancia medida  $x$  puede ser calculada utilizando la expresión siguiente:

$$x = \frac{c}{f}(N_x \pm 1) \quad (5.5)$$

donde el término  $\pm 1$  que aparece hace referencia al error de discretización introducido en la medida. Con la utilización de frecuencias de trabajo suficientemente elevadas, del orden de las decenas de MHz, se consigue minimizar el efecto del error de discretización sobre la medida.

#### **5.4.1.1 Determinación del instante de llegada del pulso de ultrasonidos.**

De acuerdo con el apartado anterior, el error cometido en la medida dependerá en gran parte de la exactitud con que se determinen los instantes de comienzo del pulso y de detección de la llegada del pulso de ultrasonidos en recepción.

El instante de comienzo puede ser determinado sin demasiados problemas, pero mucho más importante y complicada es la determinación del instante en que se detecta en el receptor la llegada del pulso de ultrasonidos. Existen fundamentalmente dos razones: el ruido ambiental, que actúa también sobre el receptor, y la atenuación sufrida por el pulso recibido, que hace que el pulso recibido sea detectado con un retardo adicional desconocido [KOCI96]. Este último efecto es el que se muestra en la figura 5.2.

La influencia del ruido ambiental puede ser eliminada mediante el uso de un *trigger* Schmitt con un nivel de disparo superior al ruido estimado.

Con respecto a la atenuación sufrida por el pulso recibido, existe una solución basada en la dependencia temporal de la atenuación sufrida por el pulso. Si ésta es conocida, se puede utilizar un amplificador con factor de amplificación dependiente del tiempo. De esta forma, se obtiene un pulso con amplitud constante a la salida del amplificador.

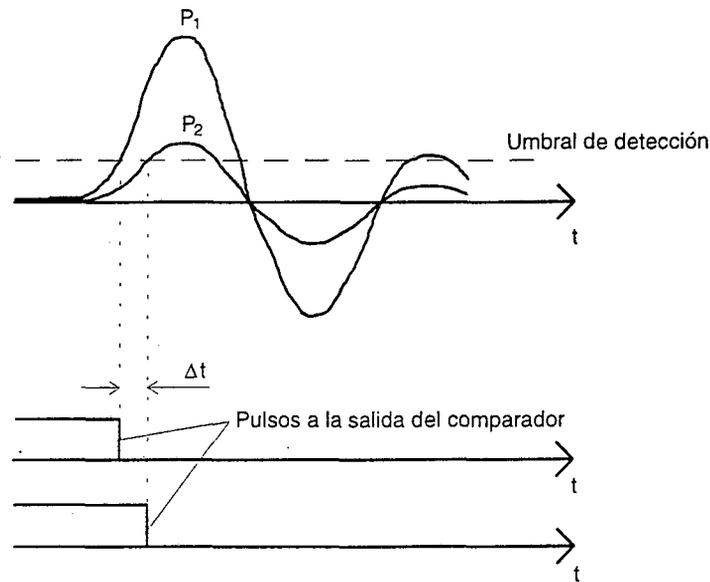


Fig. 5:2 Error en la determinación de la llegada del pulso de ultrasonidos.

Otra solución es la que aparece ilustrada en la figura 5.3. Se basa en la utilización de una línea de retardo en la cual la evaluación del instante de detección de la llegada del pulso de ultrasonidos es retardada un tiempo  $\tau$ . Después este valor es restado. El circuito asegura que el pulso a la salida del detector de paso por cero siempre se va a producir en el mismo instante del pulso detectado. El detector de pico a la salida del amplificador almacena el valor de tensión máximo alcanzado por el pulso,  $V_a$ , y este valor se divide por un factor determinado (a la mitad en el ejemplo de la figura 5.3). Este valor de tensión,  $V_e/2$ , es restado al pulso a la salida de la línea de retardo. La diferencia de tensión,  $V_d$ , es llevada a la entrada del comparador el cual cambia su estado de salida en el instante en que la tensión,  $V_d$ , pasa por cero.

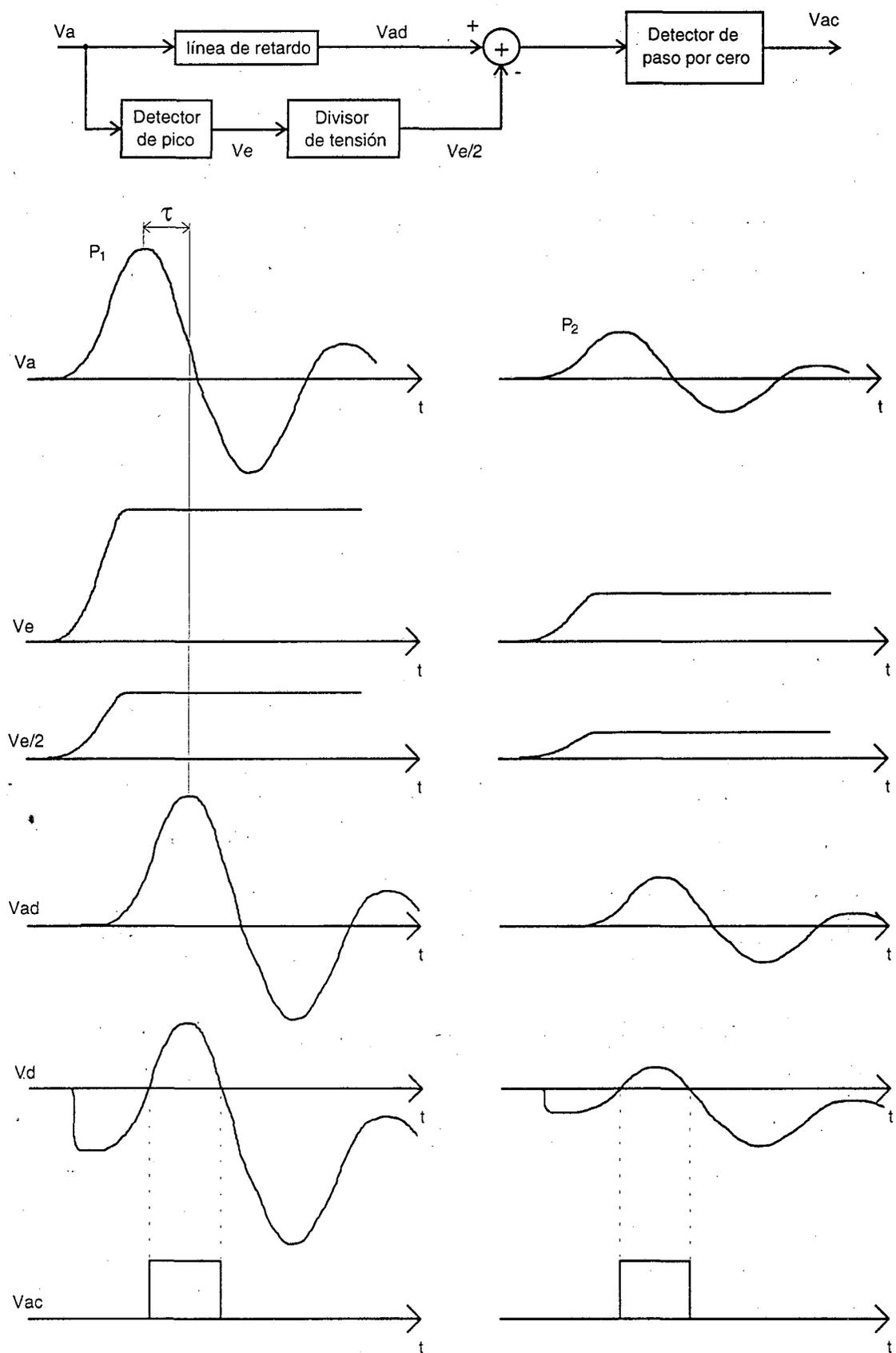


Fig. 5.3 Evaluación del instante de llegada del pulso de ultrasonidos por medio de una línea de retardo.

De acuerdo con el principio de funcionamiento del detector del instante de llegada del pulso de ultrasonidos acabado de describir, figura 5.3, la aplicación de la técnica de cancelación por pulso no únicamente va a proporcionar una mejor resolución en el sistema de medida, u otras como se verá más adelante en los siguientes apartados, sino que la amplitud máxima del pulso recibido aparece mucho más marcada en comparación con la que presenta un pulso sin cancelación, especialmente cuando se está transmitiendo en aire. Se aprecia en la figura 3.14 (superior derecha) la presencia de más de un máximo como consecuencia de la existencia de modos de resonancia muy poco acoplados al medio. Sin embargo, tras aplicar un segundo pulso para cancelar parte de la respuesta al primero, se puede apreciar en las figuras 3.14, 3.15 y 3.16 (derecha) la presencia de un único máximo bien definido.

#### **5.4.1.2 Efecto de las colas de emisión en la determinación del instante de llegada del pulso de ultrasonidos.**

Una de las limitaciones más importantes que poseen los métodos de ultrasonidos pulsados está originada por la cola del pulso emitido especialmente en transductores de aire muy poco amortiguados. La cola del pulso emitido puede enmascarar la detección del pulso eco o introducir un error en el instante de la detección del pulso eco recibido.

La detección del instante de llegada del pulso eco recibido puede hacerse, y a veces resulta más ventajoso hacerlo así, a partir de la detección de un paso por cero en el mismo, en lugar de hacerlo tomando como referencia un umbral de amplitud. Si el paso por cero se efectúa a gran velocidad, éste será fácil de detectar y además se verá proporcionalmente menos afectado por el nivel de ruido existente. Sin embargo, la presencia de una cola perteneciente a un pulso emitido con anterioridad puede introducir una indeterminación en el instante de paso por cero.

En la figura 5.4 se muestra esta última problemática. La señal con amplitud  $A_1$  pertenece al pulso eco recibido y la de amplitud  $A_2$  a la cola del pulso emitido, que

todavía no se ha extinguido. La suma de la cola de emisión en la señal pulso eco recibido resultará en un retardo  $\Delta t$  en ésta última, y en consecuencia se va a producir un error en la medida que se esté llevando a cabo.

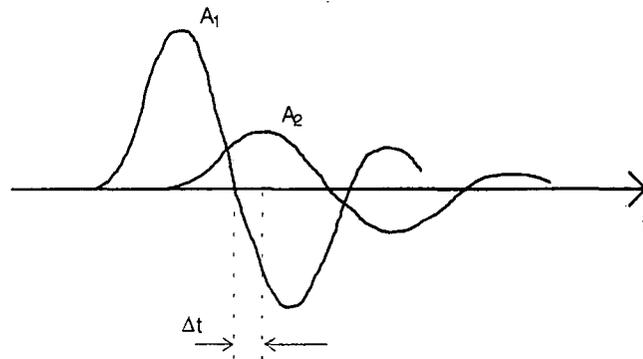


Fig. 5.4 Influencia de la cola de emisión en la determinación del instante de llegada del pulso recibido.

Si los transductores que se están utilizando en la medida están muy poco amortiguados, se puede llegar a considerar que las amplitudes presentadas por el pulso emitido y el pulso eco recibido son localmente constantes o que su valor varía muy poco en un período. Hecha esta suposición se puede plantear el problema a partir de dos senoideas de período  $T$  con amplitudes  $A_1$  y  $A_2$  y desfasadas un ángulo  $\varphi$ .

La expresión del error cometido en la determinación del instante de llegada del pulso eco recibido se puede calcular como

$$\Delta t = \frac{T}{2\pi} \operatorname{arctg} \left[ \frac{A_2 \operatorname{sen} \varphi}{A_1 + A_2 \operatorname{cos} \varphi} \right] \quad (5.6)$$

La expresión (5.6) presenta un valor máximo cuando el desfase entre las dos señales toma el valor

$$\varphi = \operatorname{arccos} \left( \frac{-A_2}{A_1} \right) \quad (5.7)$$

siendo la expresión resultante del error máximo en función de las amplitudes  $A_1$  y  $A_2$ ,

$$\Delta t_{max} = \frac{T}{2\pi} \operatorname{arctg} \left[ \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1}} \right] \cong \frac{T}{2\pi} \frac{A_2}{A_1} \quad (5.8)$$

donde aparece también la expresión simplificada para el caso en que  $A_1 \gg A_2$ .

Así por ejemplo, con una relación de amplitudes  $A_1/A_2=5$ , el error que se podría llegar a cometer sería de un tiempo igual al 3.2% del período de la señal. Este error, en una medida de la velocidad del aire con transductores a 40 kHz separados una distancia de 10 cm, en el caso peor, según la expresión (5.14) representaría un error en la velocidad medida de 0.87 m/s.

Se describen a continuación tres tipos de medida distintos teniendo todos en común la utilización de métodos de ultrasonidos pulsados. Una descripción más completa de los mismos puede encontrarse en [KOCI96] Seguidamente se estudia en que sentido la emisión/recepción de un pulso corto supone una mejora en el proceso global de medida, en concreto de la resolución del sistema.

#### 5.4.2 Medida de distancias y de nivel.

La medida de distancias y de nivel o profundidad son las aplicaciones más antiguas en las que se utilizaban las técnicas de ultrasonidos. Ambas medidas están basadas en el principio de funcionamiento de un *echo sounder*. El origen de este tipo de medida se remonta a tiempos de la Segunda Guerra Mundial.

En la figura 5.5 aparece ilustrado el principio de funcionamiento de un *echo sounder*. Un pulso de ultrasonidos es emitido en una determinada dirección. Tras una reflexión del pulso en un obstáculo el pulso eco resultante es captado, siendo la distancia medida,  $l$ , proporcional al tiempo,  $t$ , transcurrido desde la emisión del pulso hasta la detección del eco,

$$l = \frac{t \cdot c}{2} \quad (5.9)$$

donde  $c$  es la velocidad de propagación de la onda en el medio en cuestión.

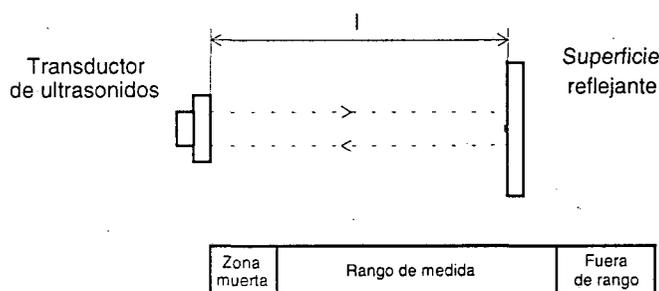


Fig. 5.5 Principio de funcionamiento de un *echo sounder*.

La figura 5.5 muestra en su parte inferior tres zonas bien diferenciadas. El *rango de medida* está delimitado por la *zona muerta* y la zona de medida *fuera de rango*. El inicio de esta última está relacionada con la frecuencia de repetición de pulsos,  $PRF$ , por parte del transductor de ultrasonidos. Así, la distancia máxima,  $d_{max}$ , sin que existan falsos ecos vendrá determinada por la relación

$$d_{max} = \frac{c}{2PRF} \quad (5.10)$$

La *zona muerta* fija una distancia mínima,  $d_{min}$ , detectable que depende de la duración de los pulsos emitidos. La distancia mínima se corresponde con el intervalo de tiempo en el cual la cola del pulso emitido interfiere con el eco esperado. De este modo, siendo  $T_p$  la duración del pulso emitido, la distancia mínima se puede determinar como

$$d_{\min} = \frac{c \cdot T_p}{2} \quad (5.11)$$

La solución comúnmente adoptada para disminuir la distancia mínima detectable consiste en utilizar frecuencias de trabajo elevadas. Si bien ello trae consigo una mejora notable de la resolución en la medida, se hace necesario también el uso de grandes potencias en emisión debido a la atenuación introducida por el medio que es proporcional al cuadrado de la frecuencia.

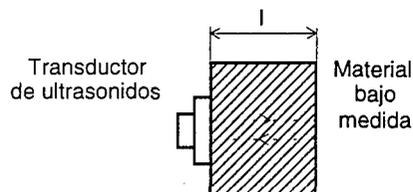
La solución alternativa de bajo coste que se propone es el uso de la técnica de excitación del transductor con un segundo pulso complementario de cancelación descrita en los capítulos 2 y 3 de esta Tesis. Con ella se consigue trabajar a bajas frecuencias, potencias bajas de emisión, reduciendo la distancia mínima detectable al mismo tiempo que se aumenta la resolución de la medida.

En [TURO96a, TURO96b] se describe un sensor inteligente basado en un transductor de ultrasonidos para la medida de nivel de sedimento en un canal de agua. El sensor fue desarrollado para el Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental de la Universitat Politècnica de Catalunya. Por una pura cuestión de fechas y plazos no se utilizó en la medida de nivel la técnica de cancelación por pulso aunque no se descarta hacerlo en un futuro.

### 5.4.3 Medida de espesores.

La medida de espesor en materiales se lleva a cabo como la medida del tiempo de propagación, ida y vuelta, de un pulso de ultrasonidos en la dirección deseada de la medida. En la figura 5.6 se puede apreciar el proceso de medida. Siendo  $c$  la velocidad de propagación en el material y  $t$  el tiempo de ida y vuelta que tarda el pulso en propagarse por el material, el espesor  $l$  puede obtenerse como

$$l = \frac{c \cdot t}{2} \quad (5.12)$$



*Fig. 5.6 Principio de medida de espesor de materiales.*

Cuando se trata de medidas de espesor de materiales muy delgados el problema que aparece es que el pulso reflejado queda enmascarado por el pulso que se está emitiendo. La solución que se suele adoptar en esta situación consiste en realizar una medida indirecta. El pulso de ultrasonidos no es aplicado directamente sobre el material bajo medida sino que se hace a través de otro material o columna líquida. Es por ello que a este método se le conoce método de la línea de retardo sólida o método de la línea de retardo líquida. Un inconveniente de esta solución es la pérdida de energía en el pulso eco recibido por tener que propagarse a través de dos medios distintos.

Al igual que se apuntó en el apartado 5.4.2 de medida de distancias y nivel, puede pensarse también en una solución alternativa consistente en la emisión de un pulso más corto utilizando la técnica de un segundo pulso complementario de cancelación. En la mayoría de los casos se conseguiría poder medir con facilidad espesores dos y tres veces más delgados que el original.

Por otro lado, cuando lo que se desea es la determinación de los espesores de una estructura laminar formada por capas de espesor distinto, lo más apropiado sería aplicar la técnica de cancelación por pulso sobre el pulso recibido en lugar de hacerlo sobre el emitido. Lo que se consigue en esta situación es una mejora de la resolución axial del sistema de medida, ya que los pulsos eco recibidos van a tener una duración inferior a la

que se tendría si no se aplicara la técnica de cancelación. Conviene recordar que no necesariamente la emisión de un pulso muy corto en emisión implica la recepción de un pulso eco de muy corta duración. De forma análoga, la recepción de un pulso eco muy corto tampoco implica la emisión de un pulso muy corto. Este efecto ya fue estudiado por [PERS81].

#### 5.4.4 Medida de velocidad del viento y de caudal.

Cuando las medidas por ultrasonidos tienen lugar en un medio líquido o gaseoso, la velocidad de flujo que pueda tener el propio medio va a influir en la medida. Aunque la velocidad sea una magnitud vectorial también puede medirse por medio de ultrasonidos.

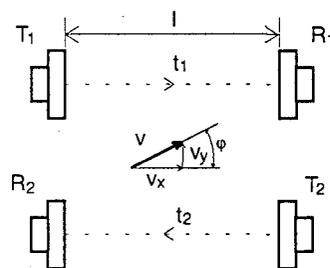
La figura 5.7 muestra el principio de medida de la velocidad del viento en una dimensión, siendo fácilmente extensible a dos y tres dimensiones. Se ha supuesto que la velocidad del viento es uniforme en todo el volumen donde se está realizando la medida. Sea  $v$  la velocidad del viento y  $c$  la velocidad de propagación del pulso de ultrasonidos en aire. Al ser la velocidad  $v$  una magnitud vectorial, en un plano, se divide ésta en dos componentes,  $v_x$  y  $v_y$ .

El principio de medida es bastante simple y se compone de dos medidas. Primero se mide el tiempo de propagación  $t_1$  del pulso de ultrasonidos desde el transmisor  $T_1$  hasta el receptor  $R_1$ . A continuación se intercambian las posiciones del transmisor y receptor y se mide el tiempo de propagación  $t_2$  desde el transmisor  $T_2$  hasta el receptor  $R_2$ . Bajo el supuesto que se utilicen transductores recíprocos, la diferencia de tiempos  $\Delta t = t_2 - t_1$  contendrá la información sobre la velocidad media del viento en la dirección de la línea que une el transmisor con el receptor. Esta relación se pone de manifiesto en la expresión siguiente

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{l}{c - v_x} - \frac{l}{c + v_x} = \frac{2lv_x}{c^2 - v_x^2} \cong \frac{2lv_x}{c^2} \quad (5.13)$$

donde se ha asumido que la velocidad de propagación en aire  $c$  es mucho mayor que la del viento  $v$ , en nuestro caso  $v_x$ . Despejando el valor de  $v_x$  en la expresión (5.13)

$$v_x = \frac{c^2}{2l} \Delta t \quad (5.14)$$



*Fig. 5.7 Principio de medida de velocidad de flujo.*

Si la dirección de la velocidad de flujo es paralela a la línea que conecta el transmisor y el receptor ( $\varphi=0$ ), entonces la medida realizada coincide con el valor del módulo de la velocidad de flujo. En caso de que  $\varphi \neq 0$ , la velocidad medida sería módulo de  $v$  multiplicado por el coseno del ángulo  $\varphi$ .

El principio de medida del caudal en una conducción es muy similar al acabado de describir. La medida de caudal realizada de esta forma presenta la ventaja de que se hace sin perturbar el medio de medida, calculándose a partir de la medida de la velocidad media del flujo  $v$  en el interior de la conducción.

Atendiendo a la disposición y número de transductores a lo largo de la conducción, pueden diferenciarse varios tipos de medida. De entre ellos se ha escogido el que aparece en la figura 5.8.

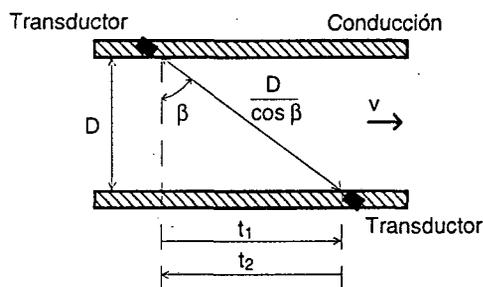


Fig. 5.8 Medida de caudal en una canalización.

La determinación de la velocidad media del flujo se basa en la medida de dos tiempos. El tiempo de propagación del pulso de ultrasonidos desde el transductor situado en la parte superior hasta el transductor situado en la parte inferior  $t_1$ , y el tiempo  $t_2$  como el tiempo que tarda en propagarse un pulso desde el transductor de la parte inferior al transductor de la parte superior. La diferencia de tiempos será proporcional a la velocidad media del flujo

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{D/\cos\beta}{c - v \cdot \sin\beta} - \frac{D/\cos\beta}{c + v \cdot \sin\beta} \cong \frac{2D \cdot \sin\beta}{c^2 \cdot \cos\beta} v \tag{5.15}$$

donde se ha supuesto que el término  $v^2 \cdot \sin\beta$  es mucho menor que  $c^2$ .

La velocidad medida  $v$  es un valor promediado de velocidad a lo largo de la trayectoria dentro de la canalización. A partir del valor promediado se puede obtener la distribución de velocidad en la sección de la canalización, y finalmente, llegar a calcular el caudal que circula por la canalización.

Atendiendo a las expresiones (5.13) y (5.15), se observa que la precisión con que se determine la velocidad va a depender en gran medida de como se haya realizado la medida de la diferencia de tiempos  $\Delta t = t_2 - t_1$ . Según el procedimiento de medida descrito para la medida de la velocidad del viento y la de caudal, éstas se deberían llevar a cabo con el uso de contadores de alta frecuencia y con un número de cuentas elevado.

Se propone para la medida de velocidad del viento y de caudal que la medida de los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  se haga simultánea. La medida así realizada comporta dos ventajas. Por un lado, se reduce el tiempo de medida y por tanto el número de variaciones que se puedan producir en la velocidad del fluido mientras dura la medida. Para ello deberíamos asegurar que el pulso transmitido por cada uno de los transductores se ha extinguido por completo antes de la llegada del pulso proveniente del otro transductor. Con esta situación de medida, se necesitaría emitir pulsos lo más cortos posible.

Por otro lado, con la medida simultánea se evitaría el uso de contadores de pulsos de alta frecuencia y con un gran número de cuentas, ya que bastaría con medir con precisión únicamente la diferencia de tiempos  $\Delta t = t_2 - t_1$ . El contador se pondría en marcha en el instante que se detectara la llegada del primer pulso en uno de los transductores, finalizando el conteo con la llegada del segundo pulso en el otro transductor.

## **5.5 Conclusiones.**

En este capítulo de aplicaciones dedicado a métodos de medida por ultrasonidos se han identificado las mejoras introducidas por el uso de la técnica de cancelación por pulso en diversos tipos de medidas basadas en métodos de ultrasonidos pulsados.

Primero se ha hecho una breve descripción del principio físico de medida en que se basan cada una de las medidas tratadas identificando las limitaciones propias del sistema de medida. Posteriormente se presenta la solución clásica normalmente adoptada siendo los resultados de ésta contrastados con los que se obtendrían al utilizar la técnica de cancelación por pulso estudiada en esta Tesis.

La conclusión global alcanzada en este capítulo se podría resumir diciendo que la técnica de cancelación por pulsos permite mejorar las prestaciones de los sistemas de medida de ultrasonidos pulsados sin que ello suponga incrementar notablemente el coste del equipo. Se evita, en parte, trabajar a frecuencias elevadas con el fin de reducir la duración del pulso eco recibido. Esto permite tener menos pérdidas por atenuación del

medio y consecuentemente una mayor eficiencia. Por ejemplo, reducir en un factor dos la duración del pulso eco detectado se conseguiría aumentando en un factor dos la frecuencia de trabajo, lo que significaría multiplicar por cuatro las pérdidas por atenuación. Sin embargo, factores de reducción dos y tres en la duración del pulso emitido/recibido son de fácil obtención con la técnica de cancelación por pulso, tal y como se ha visto ya en esta Tesis, y todo ello trabajando con una frecuencia más baja.