

Medición de Nivel y Caudal por Ultrasonido

Josey Avilés Espinoza, alumno Ing. Civil Electrónica
Universidad Técnica Federico Santa María

Abstract-- El presente trabajo otorga una primera visión respecto a la utilización del ultrasonido en la medición de niveles y flujos. Se entrega una descripción de los principios físicos involucrados y algunos aspectos prácticos.

I. INTRODUCCIÓN

Sin duda el nivel y caudal constituyen dos de las variables más importante dentro del ámbito del control de procesos. No es difícil imaginar algunas aplicaciones en que la determinación de estas variables resulta relevante, por ejemplo en el caso de un artefacto tan cotidiano como lo es el estanque de un inodoro, éste posee un sistema de control para regular el paso de agua hasta alcanzar el nivel necesario para su correcto funcionamiento. En este caso hablamos de un dispositivo llamado “flotador” que se suspende sobre el agua conectado a una válvula que regula el ingreso de agua al estanque, así, por acción mecánica la válvula se va cerrando a medida que el nivel del estanque aumenta. Algo sencillo que quizás puede pasar inadvertido en nuestro quehacer cotidiano, de no ser porque a veces este sistema falla...!qué incómoda situación!. Bueno, si ahora nos situamos en un contexto más sofisticado, digamos una planta de producción de papel, o en general, una industria en donde se tiene un estanque para la mezcla de ciertas sustancias como parte del proceso de producción. Entonces, seguramente será necesario mantener un cierto nivel de mezcla en el interior de tal manera que las aspas que ayudan a la cohesión de las sustancias cumplan su función en forma íntegra, como también será de interés el permitir el ingreso de las sustancias en la proporción adecuada. Así, ahora es de interés también determinar la cantidad de sustancia que está ingresando para saber cuando es necesario aumentar o disminuir la cantidad de una u otra sustancia que ingresa al estanque. Esto es, ahora es importante medir el flujo de las sustancias necesarias para la mezcla, y probablemente van a existir algunas otras variables de importancia dependiendo del tipo de proceso: temperatura, presión, entre otras. A diferencia del ejemplo anterior, en este caso el hecho que se produzca una falla no solo implica una situación incómoda, existen costos involucrados que hacen muy importante el correcto funcionamiento de los sistemas.

Es posible notar entonces la importancia de escoger los elementos apropiados para lograr el correcto desarrollo de un proceso de interés. En este caso en particular, los sensores de nivel y flujo.

II. PRINCIPIO DE MEDICIÓN

Actualmente en el mercado existe una gran variedad de productos para la medición de nivel y flujo, principalmente diferenciados por el principio de medición que utilizan. Por mencionar algunos: de efecto coriolis, vórtex, electromagnético y ultrasonido, para la medición de flujo; y para el caso de nivel: por flotación (como el caso del inodoro), microondas, capacidad, conductividad y ultrasonido.

Cada uno de estos métodos o principios de medición poseen características que les hacen apropiados para diversas aplicaciones, en particular en este caso nos abocaremos al estudio del ultrasonido como instrumento para la medición.

Antes de continuar, se mencionarán algunos aspectos básicos sobre el ultrasonido.

A. El ultrasonido

Un oído normal tiene un rango de frecuencias audible que va de los 20 a los 20K Hertz aproximadamente. Una onda sonora que posee una frecuencia por sobre este rango se denomina **ultrasonido**.

El sonido es una forma de transmisión de energía descrita por medio de las diferencias de presión que se producen en un medio, adoptando las características de una onda en su propagación. Este tipo de ondas se denominan *ondas mecánicas* y una de sus principales características es que para su propagación necesitan de un medio transmisor, cuyas características influirán principalmente en su velocidad de propagación.

De esta forma, el sonido se propaga a través de un medio a una velocidad dependiente de su composición y temperatura principalmente. La tabla 1 presenta una lista de la velocidad de propagación del sonido en distintos medios a una temperatura dada.

Medio	Velocidad [m/s]
Aire (0° C)	331
Aire (20° C)	343
Helio	965
Agua (0° C)	1402
Agua (20° C)	1482
Aluminio	6420

Tabla 1. Velocidad del sonido en algunos medios

B. Medición de Flujo

La medición de caudal se lleva a cabo mediante dos métodos: *tiempo de tránsito* y *efecto doppler*, los cuales se describen a continuación.

1) Tiempo de Tránsito

El método consiste en la disposición de dos transductores situados en las paredes de la tubería por donde circula el fluido, los cuales actúan como emisor-receptor de ultrasonido. Tal como se ilustra en la figura, existe uno situado en la parte superior, el cual envía un pulso de ultrasonido en sentido descendente hasta ser recibido por el transductor inferior. Este último transmite a su vez un pulso en sentido ascendente que es recibido por el transductor situado en la parte superior.

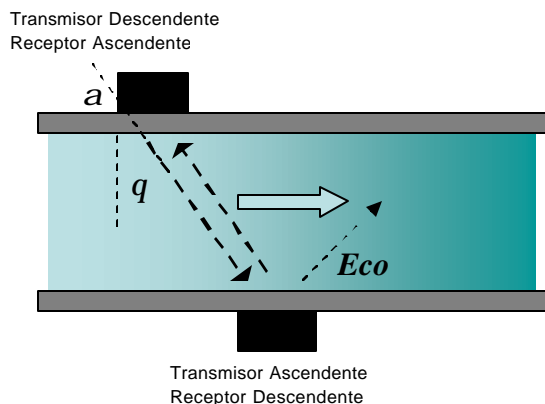


Figura 1. Tiempo de tránsito.

De esta forma, dado que el pulso descendente se encuentra a favor del flujo, demorará menos tiempo en llegar al receptor inferior, comparado con el tiempo que demorará el pulso ascendente, en contra del sentido del flujo, en alcanzar el receptor superior. De esta forma, el flujómetro transmite pulsos ascendentes y descendentes en forma alternada midiendo la diferencia de tiempo en la recepción de ellos.

$$V_F = \frac{(T_U - T_D)V_s}{\sin q} \cdot \frac{V_s \sin q}{d} = \frac{\Delta t V_s}{T_L \sin q} \quad (1)$$

La ecuación (1) permite relacionar la velocidad del medio (flujo) V_F con el ángulo de emisión del pulso θ y la diferencia de tiempo entre los pulsos ascendente y descendente; también intervienen el diámetro de la tubería d y T_L es el tiempo que tardan en ser recibidos los pulsos cuando no hay flujo.

Aplicando la ley de Snell¹ a la ecuación (1), se obtiene:

$$\frac{V_s}{\sin q} = \frac{V_c}{\sin a} = K \quad (2)$$

$$\therefore V_F = K \frac{\Delta t}{T_L}$$

El resultado anterior muestra la característica lineal que posee la relación entre el flujo y diferencia de tiempo entre la recepción de los pulsos ascendente y descendente.

2) Efecto Doppler²

En 1842, Christian Doppler predijo que la frecuencia de ondas recibidas dependía del movimiento del observador o la fuente, respecto al medio de propagación. Este principio es utilizado en diversas aplicaciones, y permite determinar el flujo dentro de una tubería como se ilustra en la figura

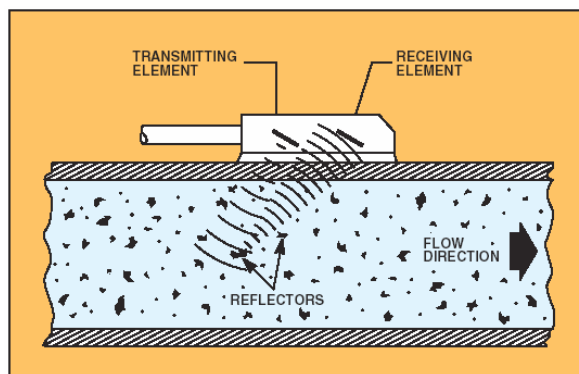


Figura 2. Efecto Doppler.

En este caso, se dispone de un transductor en la pared de la tubería, el cual emite un pulso de ultrasonido en un ángulo apropiado y a una frecuencia determina, hacia el centro de la tubería, luego, las partículas suspendidas en el fluido producen reflexiones de la onda sonora que son detectadas por el transductor. La frecuencia de la señal emitida difiere de la que posee la señal recibida de acuerdo al Efecto Doppler, como se ilustra en las siguientes ecuaciones:

$$\Delta f = 2 f_T \sin q \cdot \frac{V_s}{V_F} \quad (3)$$

Nuevamente recurriendo a la ley de Snell es posible sintetizar una expresión similar a (2) como sigue:

[1] La ley de Snell se relaciona con el paso de una onda desde un medio a otro.

[2] Christian Andreas Doppler, matemático y astrónomo. Nació en 1803 en Salzburg, Austria y falleció en 1853 en Vence, Italia.

$$\frac{\sin \alpha}{V_T} = \frac{\sin \alpha}{V_s} \quad (4)$$

$$\therefore V_F = \frac{\Delta f}{2f_T} \cdot \frac{V_T}{\sin \alpha} = K \Delta f$$

En forma similar al caso anterior, se obtiene linealidad entre las variables involucradas.

C. Medición de Nivel

Para el caso de la medición de nivel, existen igualmente dos métodos: medición por resonancia y medición por eco.

1) Resonancia.

Es sabido que un cuerpo tiene la capacidad de vibrar de una forma determinada de acuerdo a sus propiedades físicas y mecánicas (composición, dimensiones, etc.), a esta forma particular de vibrar se le denomina *frecuencia natural*. Cuando un cuerpo es sometido a una excitación mecánica, en este caso una onda sonora, de una frecuencia igual a su frecuencia natural, se produce el fenómeno llamado *resonancia*, que consiste en un aumento en la amplitud de oscilación del cuerpo en forma sostenida a causa de la excitación. Este fenómeno es aprovechado para la detección de nivel en un estanque.

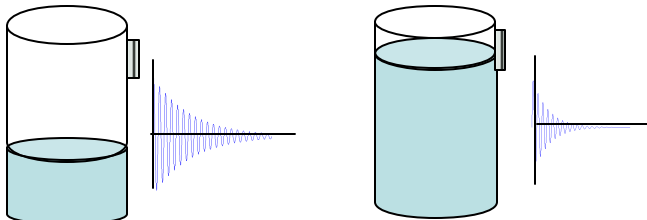


Figura 4. Detección de nivel por resonancia.

La figura 3 ilustra el método. Un aparato emisor de ondas sonoras es adosado a las paredes del estanque de tal manera que la onda de ultrasonido produce la vibración de éste. Mediante un proceso de calibración se ajusta la frecuencia del aparato a la frecuencia natural del estanque cuando está vacío, con lo que se obtiene una amplitud de oscilación como muestra la figura. Una vez que el estanque se llena con líquido, sus características mecánicas han cambiado y por ende su frecuencia natural, en estas condiciones la amplitud de la vibración inducida por el aparato se ve amortiguada, pues ya no existe resonancia. Así, el aparato envía una señal tipo on/off indicando si el estanque está vacío o no.

2) Eco (Tiempo de Retorno).

El *eco* se produce cuando una onda sonora que viaja en un medio se encuentra con una superficie y como resultado de ello, parte de ella retorna al medio. Esta reflexión es la que provoca el efecto habitualmente experimentado en habitaciones vacías, en que se puede oír una repetición retardada de nuestra voz al hablar.

Para el caso de la medición de nivel, la idea consiste en enviar un pulso de ultrasonido de tal manera que al incidir sobre la superficie parte de la onda es reflejada de regreso al medio y recibida luego por el transductor, como se ilustra en la figura 4.

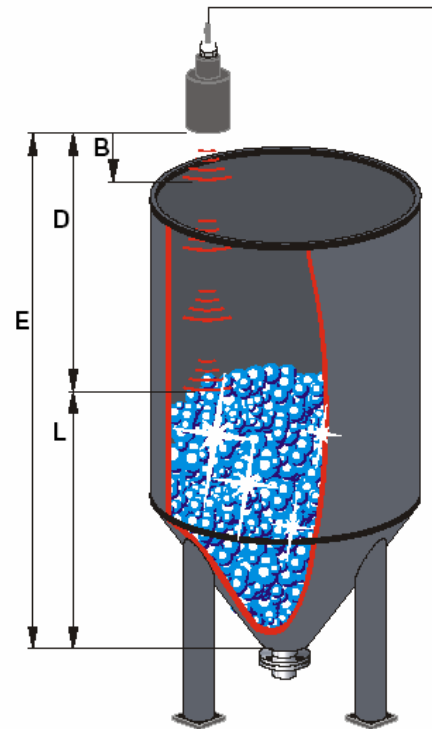


Figura 4. Detección de nivel por reflexión (eco).

Entonces, la forma de determinar consiste en medir el tiempo que demora en ir y volver el pulso de ultrasonido. Esto se determina de acuerdo a la expresión:

$$D = \frac{t \cdot V_s}{2} \quad (5)$$

Como se puede deducir de la expresión, lo que en realidad se determina es el espacio vacío del estanque, sin embargo, se realiza una calibración al momento de instalar el sensor midiendo el fondo del estanque, y luego L se determina como:

$$L = E - D \quad (6)$$

La distancia B corresponde a la *zona de bloqueo*. Esta zona varía de acuerdo a las características del sensor propiamente tal y se debe a que existe un tiempo mínimo que se requiere

desde el momento en que se genera el pulso de ultrasonido y hasta que el transductor está en condiciones de recibir el pulso reflejado. Esta zona está típicamente alrededor de los 0.3 a 0.8 m .

III. IMPLEMENTACIÓN ELECTRÓNICA

Para implementar los métodos señalados se hace uso de los *cristales piezoeléctricos*. Estos cristales tienen la propiedad de expandirse o contraerse al excitarlos con un determinado voltaje de polarización. La figura 5 ilustra esta situación:

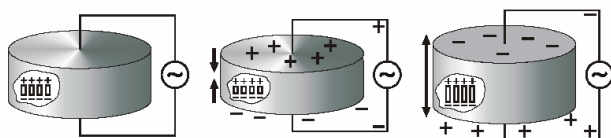


Figura 5. Cristal piezoeléctrico.

En estado natural, el cristal se encuentra polarizado, al aplicar un voltaje en sentido directo, el cristal se contrae. Por el contrario, si se aplica un voltaje inverso, el cristal se expande. De esta forma, al excitar el cristal con una señal de voltaje alterna de frecuencia determinada, el cristal provee la fuente de vibración mecánica a dicha frecuencia necesaria para generar la onda sonora. Sin embargo, no es suficiente la

amplitud de la vibración como para generar la onda sonora por sí misma, es necesario realizar una amplificación mecánica, tal como sucede con el cono de un parlante, se hace uso de una membrana que en definitiva se encarga de generar la onda sonora. La figura 6 muestra tres tipos de membranas utilizadas típicamente para estos efectos.

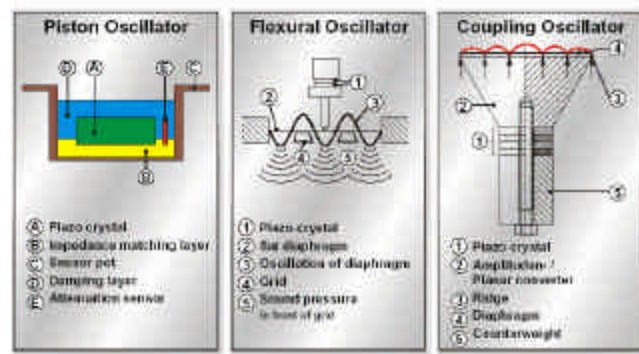


Figura 7. Tres métodos para amplificar la oscilación del cristal piezoeléctrico.

Así también, cuando los cristales son excitados en forma mecánica, varía su estado de polarización natural, generando entonces una señal de igual frecuencia que la excitación.

Finalmente, las señales son sometidas a etapas de acondicionamiento electrónico y procesamiento, tal como se ilustra en la figura 8.

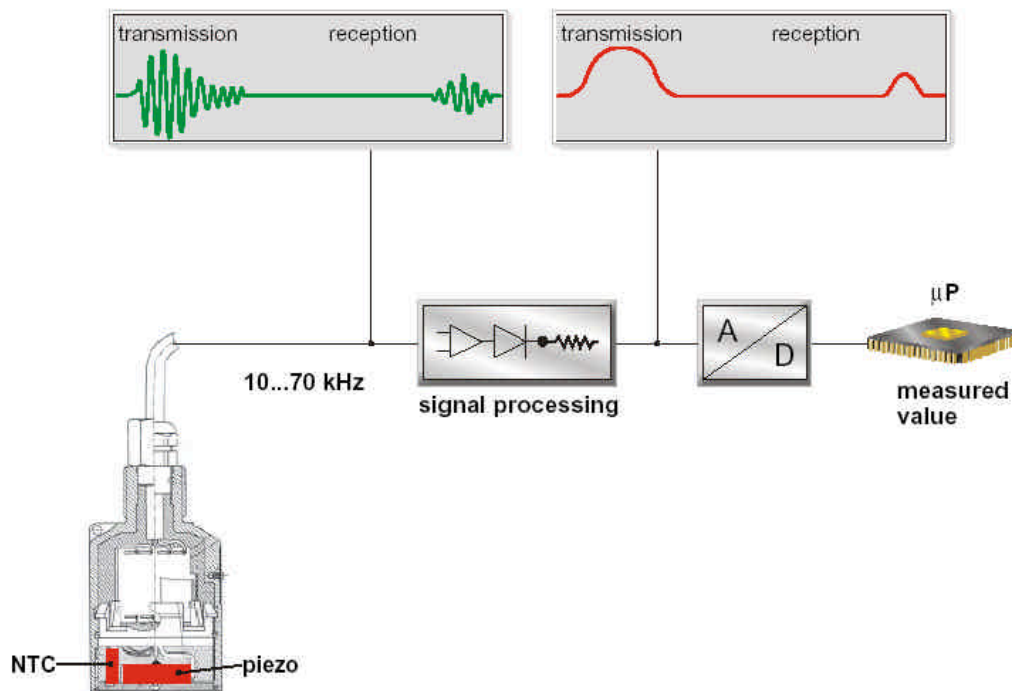


Figura 8. Obi

IV. ALGUNOS ASPECTOS PRÁCTICOS

Para concluir, es necesario hacer notar algunos aspectos prácticos, limitaciones y ventajas, que caracterizan el desempeño de estos métodos de medición, lo cual se resume en la tabla 1 que se muestra a continuación:

Medición de Nivel		
L I M I T A C I O N E S	Resonancia	<p>Depende del material de las paredes del contenedor (2-12 mm espesor en metal, vidrio y algunos plásticos son materiales típicamente aceptados).</p> <p>Solo detección de nivel (vacío – lleno)</p>
	Eco	<p>T° afecta veloc. del sonido (Compensación de T° =0,17 %/°C, para lo cual se incluye un sensor de t° en el transductor de ultrasonido).</p> <p>Superficie debe tener propiedades de reflexión adecuada.</p>
V E N T A J A S	<p>Gran variedad de aplicaciones.</p> <p>“Bajo costo” comparado con otros métodos de medición de nivel</p>	

Medición de Caudal		
L I M I T A C I O N E S	Doppler	<p>Mínimo 25 PPM de partículas suspendidas o burbujas, con tamaño no menor a 30 micrones. (1 Mhz), para que exista reflexión adecuada.</p> <p>Fluido debe ser conductor de sonido.</p>
	Tiempo tránsito	<p>Fluido debe estar libre de partículas y burbujas para evitar interferencias.</p> <p>Fluido debe ser conductor de sonido.</p>
V E N T A J A S	<p>No invasivos, su instalación es externa.</p> <p>Fácil instalación.</p> <p>No requiere detención del proceso.</p> <p>“Bajo costo”</p>	

V. BIBLIOGRAFÍA

- Resnick, Halliday y Krane** – “Física I”.
- Endress+Hauser** – Teoría y Práctica de medición de niveles”.
- T. T. Yeh and P. I. Espina**
(Fluid Flow Group, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland 20899, USA) –
“Special Ultrasonic Flowmeters For In-Situ Diagnosis Of Swirl And Cross flow”

www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/wmm/index.htm
www.flowmeterdirectory.com/flowmeter_ultrasound.html
www.eesiflo.com/client_pictures.html