

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN LÍQUIDOS BINARIOS Y SUS MEZCLAS

M. A. Postigo*, A. C. Veca**, C. Fritsch***, L. Ullate***, A. Ibañez***

*Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstraße 12 - 76128 Karlsruhe - Deutschland
e-mail: Miguel_Angel.Postigo@iurz.ui-heidelberg.de

**Instituto de Automática, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan
Libertador 1109 (oeste) - (5400) - San Juan- Argentina
e-mail aveca@inaut.unsj.edu.ar

***Instituto de Automática Industrial. Consejo superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
Ctra. Campo Real, Km. 02 - La Poveda, Arganda del Rey
28500 - Madrid - España
e-mail carlos@iai.csic.esr

En este trabajo se presenta el desarrollo y realización de un sistema para medir la velocidad de propagación de ultrasonidos en medios líquidos con una resolución de 0.1m/s. En primer lugar, se analizan tres posibles metodologías para abordar la solución, adaptando el Método de muestreo aleatorio de Monte Carlo. En segundo lugar, se explica brevemente las características electrónicas del instrumento y el diseño de la celda de medición. Finalmente, se discuten los resultados experimentales obtenidos y se extraen conclusiones.

In this work it is presented the development and realization of a system to measure the speed of ultrasound propagation in liquid means with a resolution of 0.1m/s. In the first one, three possible methodologies are analyzed to approach the solution, adopting the Method of aleatory sampling of Mount Carlo. In second place, it is explained the electronic characteristics of the instrument and the design of the mensuration cell shortly. Finally, we discusses the obtained experimental results and conclusions are extracted.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la velocidad del sonido en líquidos puros y sus mezclas binarias es medida usando un interferómetro con un cristal de cuarzo⁽¹⁾. Las mezclas de líquidos componentes son preparadas en una celda con un volumen de aproximadamente 30 cm³. Un cristal de cuarzo es colocado en la celda de medición y excitado a su frecuencia de resonancia para producir una onda de ultrasonido de 3Mhz que viaja por el líquido dentro de una celda de medición.

Un micrómetro con una exactitud de ± 0.0001 cm se utiliza para medir el desplazamiento de un plato reflector (que es colocado en forma paralela al cristal). Este plato se desplaza de forma tal que en su desplazamiento, encuentre 2 máximos sucesivos de la señal emitida por el cristal (los máximos indican que la señal emitida y la reflejada están en fase), con lo cual el plato ha recorrido en total una longitud de onda.

Con la longitud de onda (λ), y la frecuencia de resonancia del cristal (f), se obtiene la velocidad (c) a la que viaja el sonido por el líquido:

$$c = \lambda \cdot f \quad (1)$$

La exactitud con que trabaja este sistema es de ± 0.5 m/seg. Este método presenta dos grandes problemas a la hora de su implementación. Por un lado, el costo del mecanismo para realizar las mediciones micrométricas, y por otro, la dificultad de encontrar los máximos en la señal obtenida. En base a esto, se decidió estudiar otras formas de realizar la medición, sin el empleo de elementos mecánicos.

II. ANALISIS DE METODOS ALTERNATIVOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO POR TIEMPO DE TRANSITO

a. Empleo de un sistema sincrónico

Esta alternativa se basa en la emisión de un pulso de ultrasonido por un transductor y simultáneamente con el disparo se habilita un contador, cuyo reloj está sincronizado con la emisión del pulso(Fig. 1).

Al arribar el pulso al receptor (**Rx**) este es comparado con un umbral para determinar el instante de arribo de la señal emitida por el transmisor (**Tx**).

Cuando esto sucede, la salida del comparador genera la la detención de la cuenta. Multiplicando este valor por el tiempo de cada ciclo de reloj, se obtiene el tiempo de tránsito.

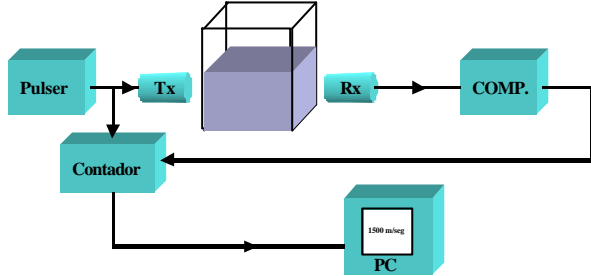


Figura 1. Determinación de velocidad por método sincrónico

Como la distancia que recorre la onda de ultrasonido es conocida, puede determinarse la velocidad. Pero, para poder implementar esta metodología es necesaria la utilización de un contador con frecuencia de trabajo impracticable, para la resolución de velocidades que se requieren (en el orden de 0.1m/seg).

b. Diferencia de fase entre la señal emitida y recibida

Como se sabe, al atravesar una onda de ultrasonido distintos medios, su velocidad de propagación cambia en cada uno de ellos. Basándose en ésto, la solución consistiría en medir la diferencia de fase existente entre la señal emitida y la recibida⁽²⁾. En este caso se tiene un oscilador que emite una señal senoidal y continua, que excita al Tx.

Cuando esta señal llega al Rx, es comparada con un umbral, generando una señal que está desfasada con respecto a la que se transmite en un tiempo igual al que le toma a la onda transmitida, arribar al Rx. Estas dos señales son ingresadas a un circuito detector de fase (discriminador de fase) cuya salida proporciona una tensión proporcional a esta diferencia (Fig. 2).

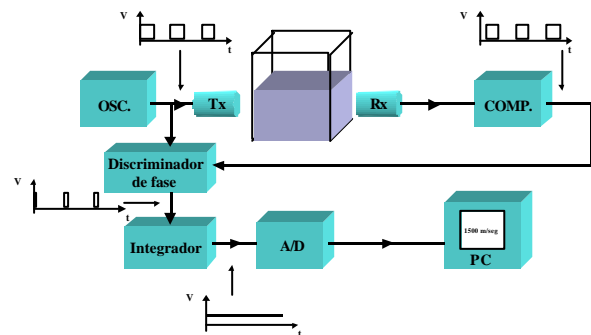


Figura 2. Determinación de velocidad por diferencia de fase

Como el rango de velocidades que se trabaja está comprendido entre los 1000m/seg (C_1) y 1500m/seg

(C_2), la f de la señal a obtener está dada por:

$$f \leq \left[2l \left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_2} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

donde l es la longitud del camino que recorre la onda de ultrasonido (en este caso es de 0.05m por detalles constructivos de la celda de medición). El rango de frecuencias que se obtiene es $f \leq 30\text{Khz}$. Como la variación de velocidad deseada es de 0.1m/seg, para obtener esta resolución es necesario dividir en 5000 partes a un semiciclo de la onda. Con lo cuál el tiempo entre divisiones es de 3.33ns ($1/2 * 30\text{Khz} * 5000$). Por lo tanto, si la señal en el Rx tiene una diferencia de fase que se sitúa en alguna de las 5000 divisiones de la señal emitida, se obtendría el valor de la velocidad, encontrando en cuál porción, se encuentra ubicada esta diferencia de fase. Esto está indicando que el sistema debe ser capaz de poder discriminar 5000 niveles de fase distintas. La Fig. 3 muestra un caso en el que la diferencia de fase es tal que el tiempo de este desfasaje está en el orden de los 5ns, lo que se correspondería a una velocidad de 1499.9m/seg.

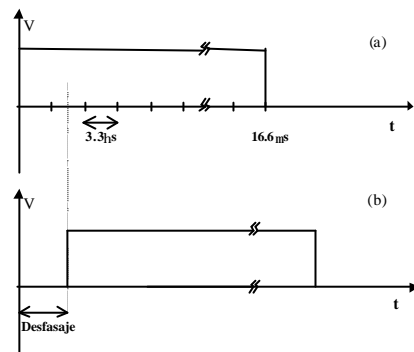


Figura 3. En (a) se representa la señal emitida por el Tx y en (b) la señal que llega al Rx

El discriminador de fase podría ser implementado con una lógica digital que básicamente realice una suma exclusiva (XOR) de las dos señales. Pero el problema que se presentaría sería que las señales deberían ser perfectamente cuadradas. Además, los tiempos entre las distintas divisiones son muy bajos para que un circuito digital pueda reconocerlos con la precisión que se requiere para estas pequeñas variaciones.

c. Determinación de la velocidad del sonido por el método de Monte Carlo

Otra alternativa planteada fue el empleo de muestreo aleatorio de tiempos de tránsito basado en el método de Monte Carlo^(3,4). El principio de funcionamiento es similar al método expuesto en (a) sólo que el reloj del contador debe trabajar en forma

asincrónica con respecto al pulso emitido. Debido a que este pulso es generado por un PC (empleado como supervisor del proceso de medición), se puede afirmar que la condición que se debe cumplir es que los relojes (del sistema y del PC) no deben estar en fase, lográndose de esta forma que el muestreo sea aleatorio.

Para poder interpretar lo expresado, supóngase que la señal de reloj (del contador) se representa como lo muestra la Fig.4, y como segmentos de una determinada longitud al tiempo de vuelo (T_v). De las gráficas se ve que dependiendo de la posición en que se inicie la cuenta (lado izquierdo del segmento T_v) y en la que termine (extremo derecho del segmento T_v), el contador tomará un número de ciclos de reloj determinado (esto puede verse al contar el número de las flechas, que representan el flanco ascendente del pulso de reloj encerradas en un segmento T_v determinado). Suponiendo el primer caso representado en (a) donde el tiempo de vuelo (T_{v1}) es menor que un determinado número entero de ciclos de reloj, en una fracción de medio ciclo de reloj.

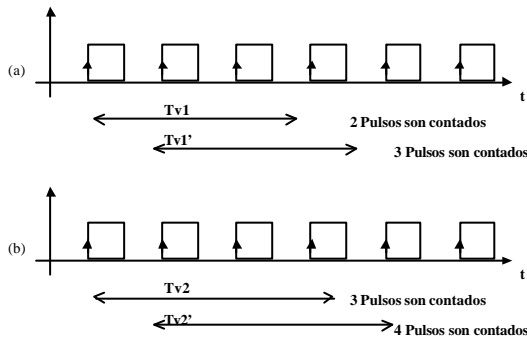


Figura 4. Determinación del número de pulsos tomados por el contador

Entonces, cuando el tiempo de vuelo es T_{v1} , dos ciclos de reloj son contenidos por este segmento. Pero supóngase que este se desplaza (T_{v1}'), ahora la cuenta tendría un valor igual a 3 pulsos de reloj. Esto significa que dependiendo de la posición donde se encuentre el segmento, será el valor obtenido en la cuenta.

El otro caso representado en (b) es considerando que T_{v2} es mayor que un determinado número de ciclos de reloj, en una fracción de medio ciclo de reloj. También puede verse, que al desplazarse el segmento que representa el T_{v2} , el número de pulsos contados depende de la posición relativa del segmento. La diferencia que hay entre (a) y (b), es que en el primer caso, si se realizaran varias medidas, la cantidad de valores que se obtendrían con 3 pulsos en la cuenta, sería mayor que con 2 pulsos (Fig. 4. (a)). Aquí, A y B representan de alguna manera el porcentaje de cada caso. En cambio en (b) si también se realizaran varias mediciones, la cantidad de valores obtenidos con un número menor en la cuenta sería mayor (3 en este caso).

Del análisis anterior se desprende que si se toma el segmento representativo de T_{v1} o T_{v2} comenzando con la parte izquierda del segmento en un

flanco ascendente del reloj, se desplaza este segmento a lo largo de un ciclo de reloj (siempre tomando como referencia de desplazamiento el lado izquierdo del segmento). Observándose que, a medida que se desplaza el segmento se van contando la cantidad de flancos ascendentes que son abarcados por T_v .

En este caso al estar las señales incorreladas, la posición de los segmentos en relación a los ciclos de reloj, tienen una distribución de probabilidad uniforme. Al computar la media de una cierta cantidad de valores medidos, se obtiene la medida del tiempo de tránsito real, que se encontraría teóricamente en el medio de la suma de los segmentos representados por A y B en la Fig. 5. El tiempo de tránsito se obtiene de la siguiente manera

$$T_v = KT + aT \quad (3)$$

Donde T es el período del reloj, K es el número de ciclos enteros de reloj que entran en el segmento representativo del tiempo de vuelo y a representa la fracción de segmento (Fig. 6).

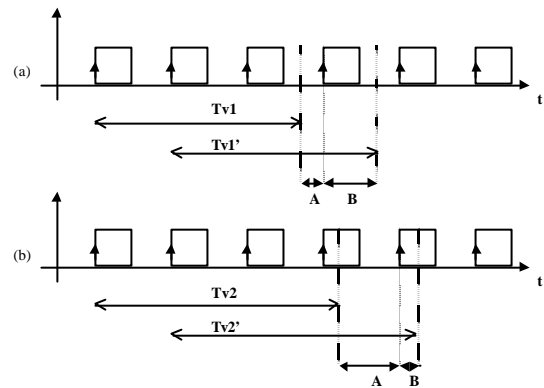


Figura 5. Porcentaje del número de pulsos que en cada caso son capturados por el contador

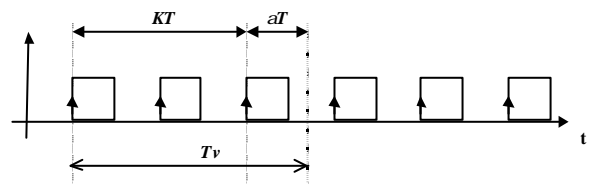


Figura 6. Determinación del tiempo de vuelo por el método de Monte Carlo

Como se dijo que la distribución de los segmentos era uniforme, entonces se deduce que a se distribuye uniformemente entre 0 y 1, obteniéndose que la varianza muestral (S_N) es igual a 1/2. Luego por el teorema central del límite

$$S_N = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

y estableciendo un intervalo de confianza de $3S$ se llega a la conclusión de que la cantidad de muestras necesarias a promediar para poder tener la resolución que se exige (0.1 m/seg) es de aproximadamente 170 muestras. Por lo visto, este método permite la utilización de un contador con una frecuencia de reloj que puede ser realizable en la práctica y sin elementos mecánicos.

III. REALIZACION DEL SISTEMA DE MEDICION

En la Fig. 7 se muestra el esquema de medición para la determinación de la velocidad del sonido basada en el método de Monte Carlo. Como se observa, se trata de un sistema clásico de pulso-eco. El pulser genera un pulso de 12 volt con un ancho adecuado para hacer oscilar a un palpador de 5 Mhz. El amplificador está compuesto por un CI AD829⁽⁵⁾ con ganancia fija de 40 dB, suficiente para asegurar un buen nivel de tensión del eco recibido. Para la elección del comparador se tuvo en cuenta el tiempo de decisión, por ello se adoptó el CI MAX941⁽⁶⁾. La función del módulo generador de zona ciega es de proveer la zona de sombra, necesaria para que no sea tomada la señal que es introducida a las etapas de amplificación y comparación cuando se genera el pulso de disparo, lo que provocaría que el sistema detectara arriba del eco cuando en realidad sólo está detectando el disparo del palpador, dando una medida incorrecta.

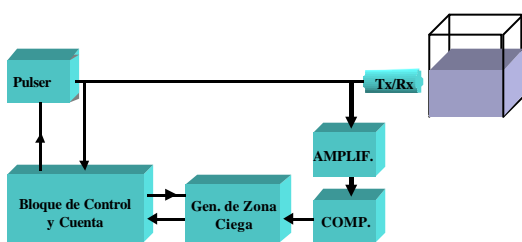


Figura 7. Diagrama en bloques de la realización del Método de Monte Carlo

Básicamente, este bloque está compuesto por un circuito monoestable que inhabilita la cuenta del contador hasta que se haya extinguido el transitorio de excitación del palpador.

IV. PLATAFORMA DE MEDICIÓN

a- Elección del transductor

Se adoptó como transductor un palpador de banda ancha (BA) por las siguientes razones:

Un transductor de banda ancha presenta una respuesta impulsiva más abrupta que uno de banda estrecha (BE), por ello, en el caso de que se detecte el cruce por nivel (umbral). Este hecho se muestra en la Fig. 8, donde en (a) se representa la señal y el eco utilizando un transductor de BE y en (b) uno de BA.

Si el eco sufre variaciones en su amplitud (por ejemplo es atenuado), en el caso de utilizar un transductor

de BE, esta variación puede causar que la indeterminación aumente ya que la detección del cruce del nivel establecido puede ocurrir en un ciclo posterior (Fig. 8 (a)). También, puede observarse que al aumentar la frecuencia, la indeterminación es menor en ambos casos (Fig. 8 y Fig. 9).

Por lo tanto, el eco puede estar solapado por la señal transmitida. Este caso se observa cuando el tiempo de tránsito es menor que el tiempo de extinción de la señal generada, lo cual es más probable que ocurra al emplearse un transductor de BE. La Fig. 10 ejemplifica este caso.

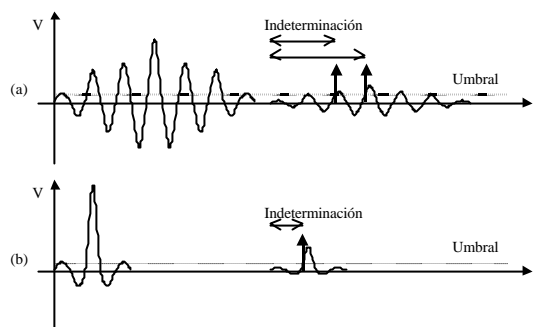


Figura 8. Indeterminación en las señales generadas por palpadores de BE (a) y BA (b)

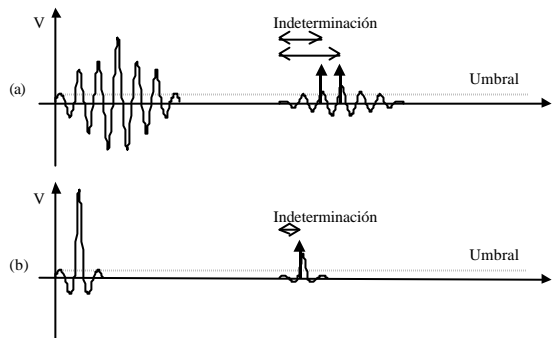


Figura 9. Efecto de reducción en la indeterminación con el aumento de la frecuencia del palpador

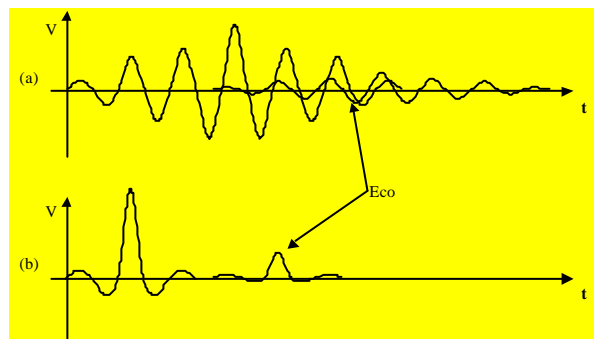


Figura 10. Señales obtenidas con un palpador BE (a) y de BA (b)

b. Desarrollo de la celda de medición

Debido a que los líquidos que se les determinaría la velocidad del sonido no son corrosivos,

esta podía realizarse en diferentes materiales. En este caso, la celda fue construida en metacrilato de metilo.

Se plantearon distintas formas de construcción. Finalmente, el diseño fue realizado en función de las características del palpador (frecuencia de resonancia, tamaño y forma) a utilizar. Esta celda debía tener un tamaño que fuera mayor al diámetro del transductor, para evitar los problemas que se podían presentar al viajar parte de la onda a través de las paredes de ella, con lo cual se desvirtuaría la medición del tiempo de tránsito en el fluido medido.

Además, debía tener una longitud para el camino de la onda (2l) no muy reducido, ya que esto provocaría utilizar un reloj de mayor frecuencia.

En base a lo expuesto, la forma y las dimensiones finales de la celda se muestran en la Fig. 11.

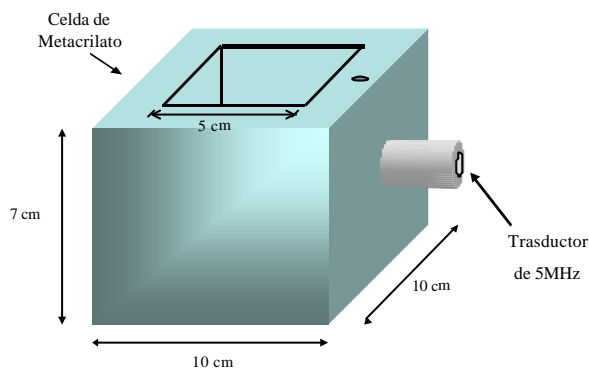


Figura 11. Forma y dimensiones de la celda de medición

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se realizaron mediciones y de éstas se determinó la forma en que los valores medidos se distribuían, para poder contrastar si estos tenían una distribución uniforme como la que se planteó anteriormente. Lo que se obtuvo fue la cantidad de valores que contabiliza el contador al desplazarse el segmento representativo del tiempo de tránsito

Que la variación de medida en medida pueda variar en +/- un pulso de reloj se debe a que el fin de la cuenta, depende del momento en el que el pulso del eco genera a la salida de la lógica de comparación la deshabilitación de la cuenta del contador. Los resultados obtenidos se presentan en la gráfica siguiente.

Al verificar que la distribución de las muestras es de forma tal que existe una mayor cantidad de muestras centrales (con mayor número de ocurrencias) y muestras que se encuentran a ambos lados de ésta pero que tienen un menor número de ocurrencias se hacen otras serie de pruebas teniendo en cuenta esta característica. Las diferentes pruebas que se realizaron consistieron en:

- Tomar todos los valores obtenidos de las muestras y calcular un promedio. Es decir, el tiempo de tránsito expresado en número de pulsos de reloj (Fig. 13).

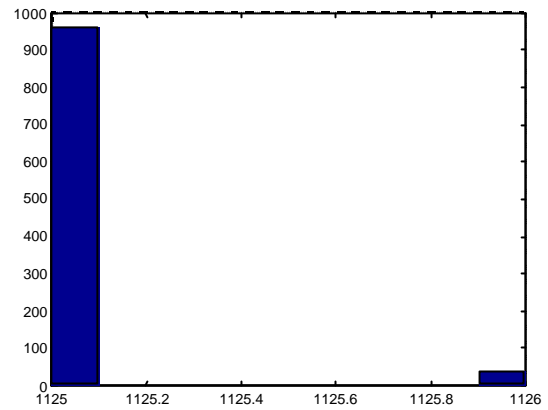


Figura 12. Forma en que se Distribuyen 1000 muestras

- Tomar solamente los valores de las muestras que correspondan a la moda del total de las muestras y los valores que estén inmediatamente encima de este (Fig. 14).
- Tomar los valores de las muestras que estén inmediatamente por encima y por debajo de la moda de los valores obtenidos, es decir +/- un pulso de reloj (Fig. 15)

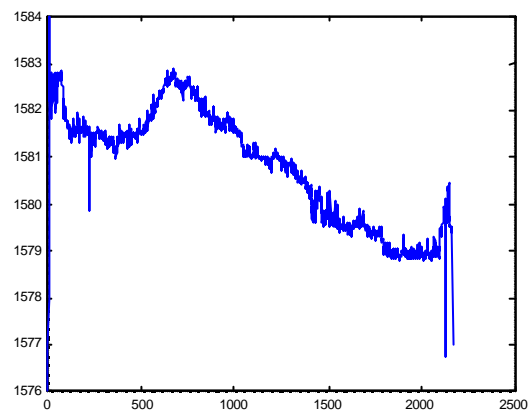


Figura 13. Promediado de todas las muestras

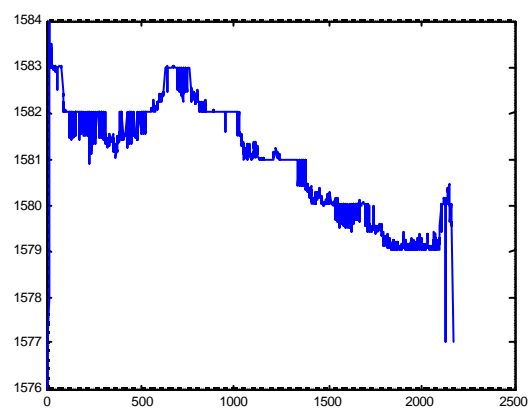


Figura 14. Promediado de las muestras comprendidas en un rango de variación de la moda \pm un pulso de reloj

Como puede apreciarse en estas hay variaciones, que son debidas a que las mediciones (valor

promedio de las 1000 muestras) se tomaron durante todo un día con un intervalo de 20 segundos entre muestra y al variar la temperatura del agua se modificó el tiempo de tránsito. Por lo tanto, el número de pulsos de reloj captados por el contador también varió. Los picos que se observan son debidos a ruidos que se introdujeron en el sistema los cuales causan que la medida del promedio obtenido, no sea válida debiéndose descartarse.

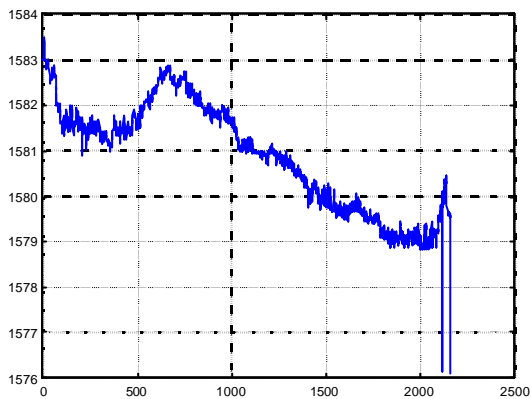


Figura 15. Promediado de las muestras comprendidas en un rango de variación de la moda \pm un pulso de reloj

Para realizar alguna inferencia sobre cuál es el mejor resultado que se obtiene al acotar el rango de valores para realizar el promediado, se obtuvo la diferencia de los promedios entre el valor promediado y el promedio con los valores acotados en + un pulso de reloj y \pm un pulso de reloj. Estos resultados son representados en la Fig. 16 y Fig. 17 respectivamente.

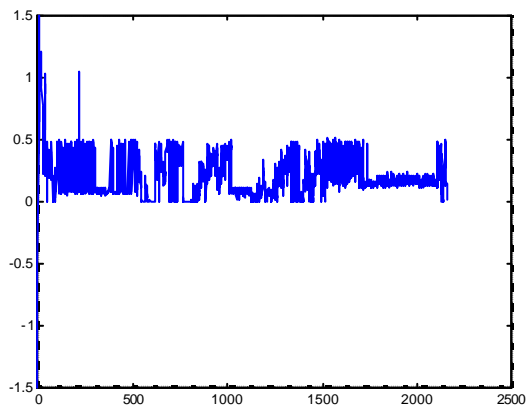


Figura 16. Diferencia entre los valores obtenidos en el primer y segundo caso

Como se observa, la diferencia es menor en todos los puntos (salvo en los lugares donde se producen perturbaciones), lo que hace pensar que ésta es la mejor forma de aproximación para obtener el valor muestral promedio medido.

Se realizaron otras pruebas con tiempos más reducidos entre promedio y promedio, en los que no se tenía una gran variación del tiempo de tránsito por efecto de la temperatura. En este caso, se tomaron únicamente las medidas del promedio de todos los números y el

promedio con los números acotados en \pm un ciclo de reloj.

Otra condición que se estableció fue que si no se satisfacía que del total de las muestras el 90% como mínimo de los valores de ellas estaban contenidas dentro de estos 3 valores muestras permitidos (la moda y \pm un pulso de reloj), el valor resultante del promedio era eliminado y se mantenía el último valor válido.

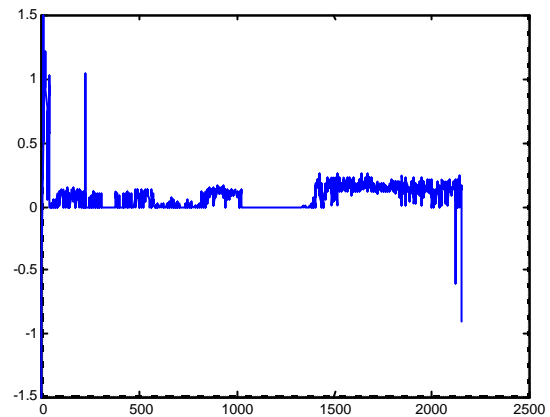


Figura 17. Diferencia entre los valores obtenidos en el primer y tercer caso

Con este criterio se eliminó el problema picos debido a las perturbaciones que se introducían en el sistema. La Fig. 18 muestra el caso en el que todas las muestras son tomadas para realizar el promedio.

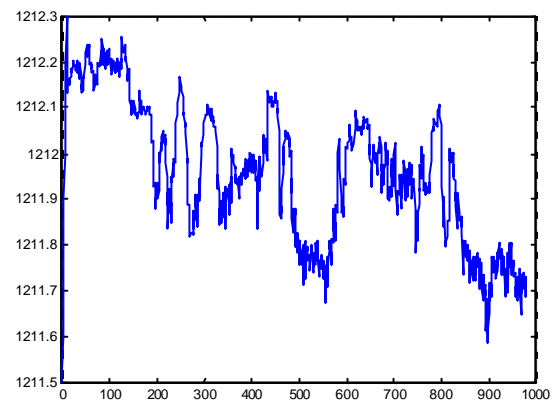


Figura 18. Promediado de todas las muestras

La Fig. 19 muestra los valores que en realidad se obtienen con el equipo de medición. Estos valores, son leídos y después de verificar si pueden tomarse como válidos, son mostrados, en caso contrario, se muestra el último valor válido que se halla tomado anteriormente. En la Fig. 20 se muestra la diferencia entre las mediciones de los dos casos graficado en las Fig. 18 y 19, verificándose una vez más que la diferencia entre estos se encuentra en un rango pequeño de valores.

Finalmente, es oportuno citar que la variación entre medida y medida se mantiene en un reducido rango de valores muestra. Esto puede observarse en la Fig. 21, donde la variación entre medidas adyacentes no supera el valor de ± 0.06

muestras, lo cual implica que la variación en velocidad es de aproximadamente ± 0.07 m/seg entre mediciones adyacentes

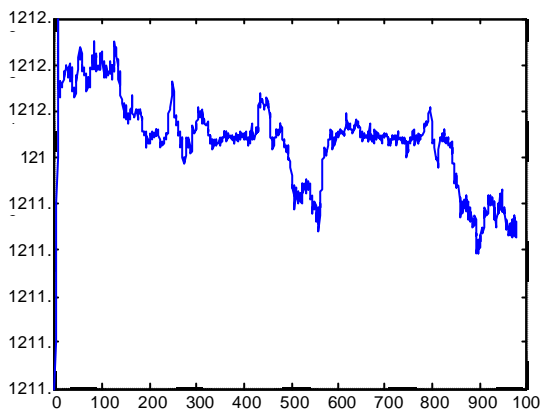


Figura 19. Promediado de las muestras comprendidas en un rango de variación de la moda \pm un pulso de reloj

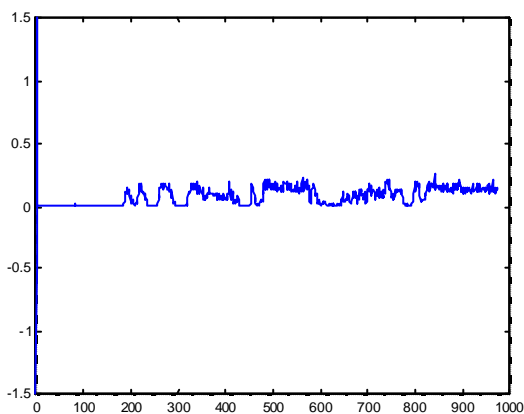


Figura 20. Diferencia entre los valores obtenidos en los casos anteriores

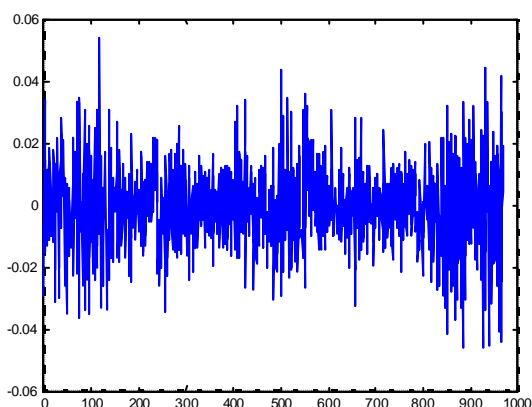


Figura 21. Variación entre los valores adyacentes tomados en el último caso

CONCLUSIONES

Al resolver el problema planteado, los aportes a los conocimientos abarcaron distintos aspectos, tanto desde el punto de vista de la electrónica aplicada al ultrasonido como del empleo de distintos métodos para determinar el tiempo de tránsito.

En cuanto a los objetivos propuestos se puede decir que se han cumplido de manera satisfactoria; ya que se ha logrado medir la velocidad del sonido a través de líquidos, con una resolución que cumple con los requerimientos que se presentaron, al solicitar el instrumento.

También, se consiguió el diseño de una celda de medición que requiere un reducido volumen de solución, importante por el alto costo de los líquidos empleados.

Con respecto a la calibración de este instrumento es necesario el empleo de una solución patrón, con velocidad del ultrasonido conocida.

Finalmente, es importante señalar que para obtener resultados valederos, hay que mantener en la celda de medición, la temperatura estable con una precisión de 0.1 °C.

Referencias

- 1 -Nath Jagan, "Speeds of sound in and isentropic compressibilities of (1,1,2,2-tetrachloroethane + aisole, 1,4-dioxane, methyllethylketone, and pyridine) at T=303.15K. Journal Chemical of Thermodynamics, 1996, 28, 1083-1092
- 2 - F. E. Gueuning, M. Varlan, C. E. Eugenie, P. Dupuis, "Accurate Distance Measurement by an Autonomous Ultrasonic System Combining Time-of-Flight and Phase-Shift Methods". IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, vol 46 N° 6, 1236- 1240, December 1997.
- 3 - A. Papoulis. "Probability and Statistics". Prentice Hall, N. J., 1995.
- 4 - S. E. Derenzo. "Intrefacing. A Laboartory Approach Using the Microcomputer for Instrumentation, Data Analysis, an Control". Prentice-Hall, Englewood Cliffs, Nj, 1990.
- 5 - AD829. Analog Devices Inc, 1995.
- 6 - MAX841. Voltage Comparator Maxim Corporation, 1995.