

# Medición de espesores delgados con ultrasonido

Juan Carlos Gómez y Sergio Gwiric  
Instrumentación y Control – Electrónica e Informática  
Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)  
San Martín, República Argentina  
juanca@inti.gob.ar sng@inti.gob.ar

**Resumen – Abstract:** *La medición clásica de espesores con ultrasonido, basada en el tiempo de vuelo, tiene su límite cuando los ecos recibidos se superponen. Se describe un método para medición de espesores delgados que, mediante procesamiento de señales identifica los parámetros de los múltiples ecos y obtiene el espesor de la pieza bajo ensayo.*

**Keywords:** *Ultrasonido; medición de espesores*

## I. INTRODUCCIÓN

La medición de espesores tiene en la industria y en los laboratorios, una demanda continua. La gama de necesidades es muy amplia y va desde la verificación de espesores debido a pérdidas por corrosión a la medición de espesores de recubrimientos aplicados sobre un sustrato, en un determinado proceso.

Una de las metodologías más difundidas es la que emplea ultrasonido. Esta ofrece ventajas significativas debidas a que es un ensayo no destructivo, de fácil y rápida realización y además no es costosa.

La medición clásica de espesores empleando ultrasonido basa su principio en la determinación del tiempo de vuelo (ToF) entre dos reflexiones producidas en las caras anterior y posterior de la pieza bajo ensayo [1]. Conocida la velocidad de propagación en el material, el cálculo de espesor es directo. Se conoce a esta medición como pulso–eco, modo 2.

Para este tipo de mediciones, se posiciona un transductor frente a la pieza a medir, separada una cierta distancia mediante una línea de demora. Este dispositivo cumple una doble función, por un lado introduce una demora fija entre la emisión del transductor y la recepción del eco producido sobre la cara anterior de la pieza a medir y por otro, acopla acústicamente el transductor y la pieza bajo ensayo. La demora introducida debe ser suficientemente grande como para separar la excitación de la recepción del eco, y que no influyan en la medición los ecos múltiples producidos entre el transductor y la cara posterior del separador. La restricción en su longitud viene dada por la atenuación introducida en el material del separador.

Marioli et al en [2] logran un aumento de la resolución, hasta unas pocas décimas de la longitud de onda, utilizando correlación cruzada entre el pulso emitido y el eco recibido. Al pulso emitido lo miden, en período de calibración, empleando un segundo transductor como receptor y almacenándolo como referencia. En tiempo de medición, al eco lo miden con el mismo transductor empleado como transmisor. En ese trabajo se consideró que el eco sólo es afectado en amplitud.

Dispositivos de este tipo, una vez caracterizados, requieren de un único transductor, que alterna su función entre transmisor y receptor. Resulta un método de bajo costo y simple de utilizar e implementar.

Evidentemente, cuando se pretende medir espesores más pequeños, los ecos recibidos desde la cara anterior y desde la posterior de la pieza comienzan a superponerse. Además aparecen ecos provenientes de múltiples reflexiones entre las caras de la pieza a medir que no alcanzan a atenuarse.

En general un pulso de este tipo tiene un largo de algunas pocas longitudes de onda, i.e. tiene una duración de algunos pocos períodos. Debe considerarse además que el eco recibido desde la cara posterior de la pieza, sufre alteraciones en su fase, dependiendo del tipo de materiales en cada una de las interfases.

Una forma de aumentar la resolución es elevar la frecuencia de trabajo del transductor utilizado y amortiguarlo más, de manera de obtener pulsos cortos y poder discriminar ambos ecos, evitando su superposición.

En resumen, la medición de espesores delgados, esto es del orden de la longitud de onda o menores, presenta una serie de dificultades, entre ellas la más importante es la recepción de ecos múltiples. Esto obliga al uso de procesamiento de señales para determinar el espesor buscado.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un método para la medición de espesores delgados de acero. Esta es la primera etapa, de un proyecto de mayor alcance, para medir espesores de recubrimientos sobre distintos sustratos, como por ejemplo pintura sobre acero o plástico. El esfuerzo está dirigido a que el procedimiento de medición se automatice y se implemente en un sistema portátil para uso industrial y/o de laboratorio.

## II. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

El método propuesto puede clasificarse como una medición de pulso–eco con el agregado de procesamiento de señales para trabajar aún en condiciones de superposición de múltiples ecos. Se utiliza un único transductor piezoeléctrico como transmisor y receptor, acoplado con la pieza a medir mediante una línea de demora.

Como hipótesis se asume que el modelo del pulso  $\Psi_1(t)$  emitido por el transductor y sus parámetros es conocido o bien se puede caracterizar realizando mediciones, en ambos casos considerando la línea de demora.

De igual manera se asume conocida la densidad  $\rho_0$  y la velocidad de propagación  $C$  de cada uno de los materiales involucrados. Por lo tanto se calculan los coeficientes de transmisión  $\Gamma_t$  y reflexión  $\Gamma_r$  en cada una de las interfases entre distintos materiales.

Además, se considera al eco recibido  $E_r(t)$  como una superposición de pulsos con igual forma que el transmitido, sólo modificados en amplitud por los coeficientes de transmisión y  $\Gamma_t$  y reflexión  $\Gamma_r$  de las interfases que atraviesa o se refleja y demorados en el tiempo acorde al camino que recorran.

Cuando el espesor de la pieza bajo ensayo es suficientemente grande, los ecos demorados en el tiempo no se superponen y son identificables por separado. La demora  $\tau$  entre los dos primeros ecos está directamente relacionada al espesor de la pieza  $d$ , ver Ec. (1).

$$d = \frac{C_s \cdot \tau}{2} \quad (1)$$

Donde  $C_s$  es la velocidad de propagación del sonido en el acero.

En general, para espesores delgados, el eco recibido  $E(t)$  se considera como una superposición de: el eco generado en la pared anterior de la pieza a medir; el eco proveniente de la pared posterior; un segundo eco proveniente de la pared posterior producto de la reflexión múltiple en el interior de la pieza y así hasta que la amplitud, reducida por atenuación, sea despreciable a los efectos de la medición.

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = & \psi_t(t) \cdot \Gamma_{rds} + \psi_t(t - \tau) \cdot \Gamma_{tds} \cdot \Gamma_{rsa} \cdot \Gamma_{tsd} + \\ & + \psi_t(t - 2 \cdot \tau) \cdot \Gamma_{tds} \cdot \Gamma_{rsa} \cdot \Gamma_{rsd} \cdot \Gamma_{rsa} \cdot \Gamma_{tsd} + \\ & + \psi_t(t - 3 \cdot \tau) \cdot \Gamma_{tds} \cdot \Gamma_{rsa} \cdot (\Gamma_{rsd} \cdot \Gamma_{rsa})^2 \cdot \Gamma_{tsd} + \\ & + \psi_t(t - 4 \cdot \tau) \cdot \Gamma_{tds} \cdot \Gamma_{rsa} \cdot (\Gamma_{rsd} \cdot \Gamma_{rsa})^3 \cdot \Gamma_{tsd} \dots \end{aligned} \quad (2)$$

Donde  $\Gamma_{r12}$  es el coeficiente de reflexión en la interfase de los materiales 1-2. Los subíndices utilizados corresponden a: 'd' para línea de demora; 's' para el acero y 'a' para el aire.

Ver que el pulso  $\Psi_t(t)$  aparece en todos los términos de la (2) modificado en escala y demorado en valores enteros de  $\tau$ .

El objetivo es encontrar  $\tau$  para calcular el espesor 'd' mediante la (1). La ecuación (2) se ajusta al eco medido  $E_m(t)$  variando  $\tau$  como parámetro.

Deben considerarse un par de parámetros extra. El primero es un factor de amplitud introducido por ligeras diferencias entre  $\Psi_t(t)$  medido o calculado y el que está incluido en la (2) al momento de la medición. El segundo, también por consideraciones prácticas, para homogeneizar el tiempo del  $\Psi_t(t)$  utilizado como referencia y el incluido en la (2).

En definitiva se ajusta (2) al eco medido con tres parámetros. Uno de amplitud 'A' y dos de tiempo 't<sub>1</sub>' y 'τ'. Ver ecuación (3).

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = & A \cdot [\psi_t(t - t_1) \cdot K_0 + \psi_t(t - t_1 - \tau) \cdot K_1 + \\ & + \psi_t(t - t_1 - 2 \cdot \tau) \cdot K_2 + \psi_t(t - t_1 - 3 \cdot \tau) \cdot K_3 + \\ & + \psi_t(t - t_1 - 4 \cdot \tau) \cdot K_4 \dots] \end{aligned}$$

Ecuación 3

Donde las constantes  $K_n$  son calculadas a partir de los coeficientes de transmisión y reflexión, y los parámetros son 'A', 't<sub>1</sub>' y 'τ'.

En esta primera etapa de desarrollo se emplearon diferentes mecanismos de ajuste de MATLAB [3]. Un ajuste por cuadrados mínimos no lineal, utilizando "lsqnonlin()" y otro por medio de algoritmos genéticos (AG) "ag()".

En ambos casos las funciones permiten (y conviene) proveer valores límites superior e inferior para los parámetros, acotando de esta forma el espacio de búsqueda de cada una.

Ambas fueron aplicadas una cierta cantidad de veces en sendos lazos, para quedarse finalmente con la que más ajusta, considerando la suma de los errores cuadráticos.

### III. CARACTERIZACIÓN DEL PULSO

Para realizar el ajuste múltiple, presentado en este trabajo, es necesario contar con  $\Psi_t(t)$  como referencia. Este se obtiene aislando el primer eco y considerando el cambio de amplitud producido al reflejarse en la interfase entre la línea de demora y la pieza. Con este objetivo se utiliza una pieza del mismo material pero de espesor suficiente como para que no se superpongan los ecos recibidos y pueda aislarse el primer eco. La configuración para la medición es la misma que se describe en V.

La señal aislada del eco obtenida  $E(t)$  cuando  $\tau$  es mayor a la duración del pulso es directamente:

$$\varepsilon(t) = \psi_t(t) \cdot \Gamma_{rds} \quad (4)$$

Lo que indica que tiene la misma forma que el pulso transmitido, afectado por el coeficiente de reflexión entre la línea de demora y la cara anterior de la pieza a medir.

En la Figura 1. se muestra el pulso medido en las condiciones descriptas.

Los datos del eco  $E_{ref}(t)$  adquiridos se almacenan para utilizarlos como sustituto de  $\Psi_t(t)$  en la (3). Nótese que  $E_{ref}(t)$  tiene igual forma que el pulso transmitido pero con diferente amplitud. Este cambio de amplitud obedece esencialmente al cambio introducido por el coeficiente de reflexión en la discontinuidad línea de demora–cara anterior de la pieza, junto con la atenuación en la línea de demora. Además, puede haber, al momento de hacer nuevas mediciones, otro factor en amplitud debido a diferencias de acoplamiento.

En particular para la obtención de este pulso, que será utilizado como referencia, pero en general para todas las mediciones, debe cuidarse de acoplar bien ambas superficies con gel para ultrasonido, de manera de obtener una señal estable. Es útil visualizar la forma de onda del mismo en un osciloscopio.

Una opción interesante es contar con un modelo del pulso [4], y ajustar los parámetros de ese modelo para que coincida con el pulso medido. La ventaja reside en que los parámetros reflejan características físicas del transductor y su eco se relaciona con las características del blanco.

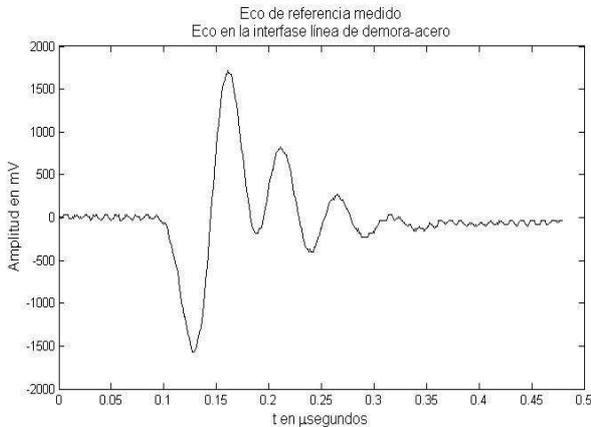


Figura 1. Eco medido

#### IV. SIMULACIONES

Para la comprobación de la metodología se utilizó como referencia el eco medido que se muestra en la Figura 1. y se indicó en III. A partir de ese pulso, se construyeron ecos  $E(t)$  para diferentes espesores. En la Figura 2. se muestra el eco construido para un espesor de 0.21 mm.

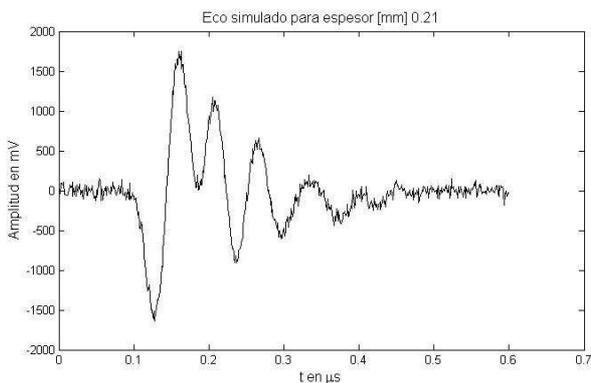


Figura 2. Eco simulado

Para su construcción se consideraron los coeficientes de transmisión  $\Gamma_t$  y reflexión  $\Gamma_r$  en cada una de las interfaces.

Sobre el eco simulado se aplicaron los métodos de ajuste hasta encontrar los parámetros, en particular el tiempo de demora  $\tau$ . Con este valor y la ecuación (1) se calculó el espesor de chapa simulado.

Para obtener resultados fue necesario acotar el rango de variación de los parámetros de entrada, cuanto mejor se acoten más rápido encuentran la solución.

El método de ajuste por algoritmos genéticos resultó más robusto puesto que no requirió tanta restricción del espacio de búsqueda.

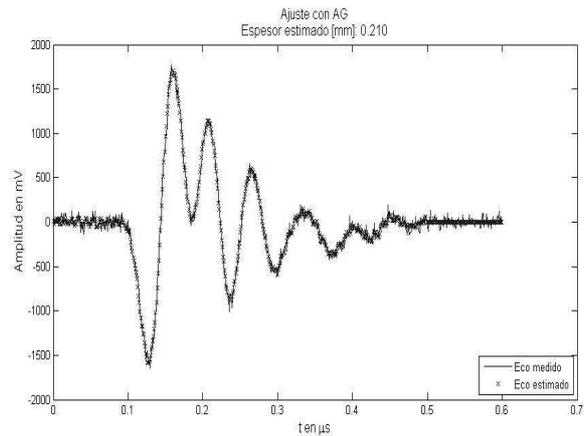


Figura 3. Eco simulado y estimado superpuestos

#### V. MEDICIONES

Se realizaron mediciones sobre placas de acero de espesores del orden de la longitud de onda empleada. Se utilizó un ecógrafo digital de barrido en modo “A” para normalizar la generación del pulso de excitación sobre un transductor con línea de demora. La medición del eco se realizó sobre el mismo transductor con un amplificador construido en el laboratorio y un osciloscopio digital. El pulso generado es de una duración aproximada de 250 ns y con un largo de 1,4 mm en el acero. Por lo tanto los ecos se superponen para espesores menores a 0.7 mm. Se utilizó gel para mejorar el acoplamiento acústico.

El Transductor utilizado es modelo DS 6 PB 14- 4 de gran ancho de banda y la línea de demora utilizada es de 8.6  $\mu$ s construida de Polystyrol–Polystyrene.

En la Figura 4. se muestra el eco medido en una placa de acero de 0.398 mm de espesor.

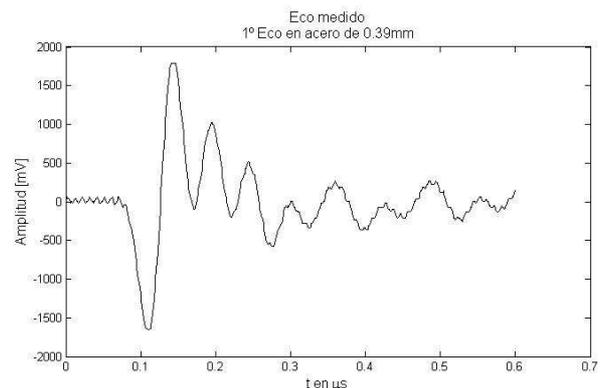


Figura 4. Eco medido en placa de acero de 0.39 mm

Se tomó como referencia el eco medido que se muestra en la Figura 1. , se realizó el ajuste mediante AG, con restricciones muy holgadas y el resultado fue 0,373 mm.

En la Figura 5. se muestra el resultado obtenido.

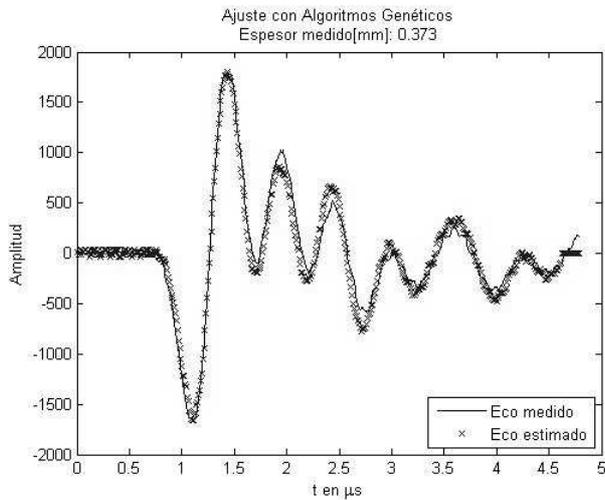


Figura 5. Eco estimado para placa de 0.39 mm

El tiempo de muestreo del osciloscopio utilizado fue de 1ns lo que implica una resolución de aproximadamente  $\pm 5.8 \mu\text{m}$  para el acero.

La relación de impedancias acústicas en la pared posterior causa inversión del pulso al reflejarse. Igual sucede al reflejarse en la interfase acero-línea de demora.

## VI. RESULTADOS

El resultado obtenido en las simulaciones, utilizando AG, para distintos espesores, con el agregado de ruido, normalmente distribuido de hasta 250mV, mostró ser robusto al repetir el resultado dentro de la resolución ( $1 \mu\text{m}$ ).

El resultado en las simulaciones, utilizando "lsqnonlin()" mostró ser bueno sólo si se acota suficientemente.

Las diferentes mediciones realizadas sobre la misma placa de acero mostraron resultados repetitivos con una diferencia máxima entre si de  $6 \mu\text{m}$ , esto concuerda con la resolución del instrumento para tiempo de muestreo de 1 ns. El error respecto del valor medido con micrómetro es de  $25 \mu\text{m}$ . El error relativo obtenido es del 6.3%.

## VII. CONCLUSIONES

Si bien hay equipos comerciales que resuelven este problema, es importante su desarrollo local, no sólo para, en lo posible abaratar los costos, sino también para manejar esa tecnología. Este conocimiento seguramente posibilitará un mejor aprovechamiento de los transductores desarrollados en el país.

El parámetro  $t_1$ , puede eliminarse en un equipo donde se cuente con una apropiada señal de disparo que garantice el tiempo "0" esto es, no habrá diferencias entre el pulso medido y el utilizado como referencia.

La incertidumbre en el conocimiento de la velocidad del sonido en el material bajo ensayo incide directamente en la medición. Se hace necesaria una calibración con placas de espesores bien conocidos. Esto puede explicar la diferencia de  $25 \mu\text{m}$  encontrada, Además de posibles inhomogeneidades en el espesor de la placa.

El error de menos de 7% es halagüeño para esta etapa del desarrollo.

Trabajar con la superposición permite, dentro de ciertos límites, independizarse de la frecuencia del transductor. Dicho de otra forma, permite extender el rango de utilización de un determinado transductor.

El uso de algoritmos genéticos para el ajuste se mostró más eficaz debido a que, por su naturaleza, no queda atrapado en mínimos locales. Por el contrario, para obtener buenos resultados con "lsqnonlin()" hubo que acotar en demasía el espacio de búsqueda.

## VIII. TRABAJOS FUTUROS

En primera instancia es conveniente realizar un trabajo de calibración con placas de diferentes espesores calibrados.

Se plantea utilizar modelos para el pulso de referencia, de manera de sacar provecho de la relación entre los parámetros y las características físicas del transductor y su relación con el material del espécimen a medir. Esta permite además ir en la dirección a la medición de espesores de recubrimientos.[5] .

Sería interesante trabajar con transductores de ancho de banda angosto, para realizar otros algoritmos que saquen provecho de esta propiedad.

## IX. AGRADECIMIENTOS

A Nestor Mariño por la medición de los primeros pulsos.

A Pablo Etchepareborda por las enriquecedoras discusiones mantenidas durante el desarrollo de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] Kenneth A. Fowler, Gerry M. Elfbbaum, Karen A. Smith and Thomas J. Nelligan. "Theory and application of precision ultrasonic thickness gaging". The Journal of the British Institute of Non-Destructive Testing October 97 Vol 2 N° 10.
- [2] D. Marioli, C. Narduzzi, C. Offelli, D. Petri, E. Sardini, A. Taroni, "Digital time of flight measurement for ultrasonic sensor" IEEE Trans. Instr. Measurement. IM-41 (1) (1992) 93.
- [3] MATLAB, optimization toolbox y genetic algorithm and direct search toolbox.
- [4] Ramazan Demirli, Jafar Saniie. "Model-based estimation of ultrasonic echoes" part I y II. IEEE trans. On ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, Vol 48 n° 3, may 2001.
- [5] Richard Croce, Pierre Calmon, Luc Paradis. "Modeling of propagation and echo formation in a multilayered structure" Ultrasonics 38 (2000) 537-541 Elsevier