



## Efectos de la densidad del pulso ultrasónico en la detección de discontinuidades en sistemas automáticos

Carballal C.<sup>1,2</sup>, Claus A.<sup>1</sup>, Posadas Liaudat E.<sup>1</sup>, Russi D.<sup>2</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Delta. Grupo de Ensayos No Destructivos  
Av. San Martín 1171 (2804) Campana Pcia. de Buenos Aires, Argentina.  
Tel 03489-420400 int 109 Fax 437617

<sup>(2)</sup> Auditec Argentina S.A.  
Av. Balbín 952 (2804) Campana Pcia. de Buenos Aires, Argentina.  
Tel 03489-439053

e-mail: clausa@frd.utn.edu.ar y ccarballal@auditec.com.ar

### RESUMEN:

Los sistemas de inspección por ultrasonido automatizados brindan inmejorables condiciones operativas cuando de productividad se trata, el permanente avance tecnológico permite, entre otras cosas, la reducción de tiempos improductivos, de los costos de mantenimiento y la generación de mayores velocidades de inspección. Sin embargo, existen factores de suma importancia en la inspección automática e incluso muchas veces se encuentran de manera intangible en estadísticas productivas, las cuales pueden ser no deseables o insatisfactorias tanto para el cliente como para el prestador del servicio. Quizás, el factor de mayor relevancia para este caso sea la “densidad del pulso ultrasónico” utilizada en los ensayos automáticos, es decir, la distancia del barrido que puede desplazarse el transductor donde el eco obtenido del reflector de calibración supera el umbral establecido de aceptación del producto. El propósito de este trabajo es determinar una densidad de pulso para lograr la velocidad máxima de barrido de un transductor o unidad de inspección, sobre una superficie a ensayar para un sistema de inspección automatizado de ultrasonido, minimizando la segregación de piezas inspeccionadas, debido a “falsas reflexiones” de menor amplitud a la proporcionada por el reflector de calibración.

Para ello centraremos nuestro estudio en el efecto de la densidad del pulso ultrasónico DP (*pulse space o pulse density*) sobre la velocidad tangencial de barrido. Siendo:

$$Vel_{tag} = \frac{FRP \times DP}{N_{canales}} = \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Considerando fijos:

- Cantidad de canales del equipo.
- Tipo de transductores.
- FRP.
- Piezas a inspeccionar.
- Ranuras de calibración.

La variable que podemos ajustar para poder determinar la velocidad máxima de un sistema dado es la DP.

FRP es la frecuencia de repetición de pulsos en un equipo de ultrasonido. Por ejemplo en un equipo de inspección manual, el rango de ajuste de la FRP va desde 16 a 1000 Hz, en cambio en un sistema automático, es lógico hablar de valores en el orden de los 20000 Hz.

N<sub>canales</sub> Es la cantidad de transductores que se conectan a una unidad multiplexora para lograr distintos tipos de configuración de inspección.

Densidad de pulso es la distancia total recorrida por el transductor, desde que el Eco perteneciente al reflector de referencia supera el umbral predeterminado (*Gate*), alcanza su amplitud máxima y deja de superarlo (*descripción de una campana de Gauss*).

La importancia de este estudio radica en la determinación técnica de la densidad del pulso ultrasónico utilizada en la inspección automática, lo que nos permitirá optimizar con precisión los parámetros de Velocidad Tangencial, RPM y Velocidad de Avance o Traslación. De esta manera, se reducirá al mínimo, la cantidad de señales obtenidas por reflectores físicamente menores que el reflector de referencia, las cuales podrían accionar los dispositivos de rechazo o segregación del material en el caso que el haz principal del transductor, justo intercepte el reflector en cuestión en su punto más favorable, lo que ocasionaría un alto porcentaje de material rechazado por los sistemas automáticos, incrementando así los costos de reinspección o reposición de material.

Para el caso de una densidad de pulso muy pequeña, aumentaría considerablemente la calidad de inspección y por ende, se reducirían al mínimo la cantidad de piezas segregadas por “falsos reflectores” menores al de referencia; sin embargo, para lograr este aumento en la calidad del producto inspeccionado, la velocidad de barrido deberá ser muy lenta, lo cual nos producirá una caída en la productividad de la inspección. Es aquí donde la optimización de los parámetros de inspección y la búsqueda del equilibrio técnico del sistema, es una herramienta de vital importancia en la inspección automática.

Siendo que la  $FRP_{max}$  es inherente al equipo, el trabajo a realizar, es determinar la densidad de pulso DP para una determinada gama de transductores (*Frecuencia, tamaño, ángulo, etc*).

## DESARROLLO

### 1. INTRODUCCION

La densidad de pulso es una variable muy importante en la configuración de equipos automáticos de ultrasonido.

Se eligió empezar a realizar las mediciones de DP con una chapa plana y agujeros pasantes (SDH) en forma cuasi-estática a fin de tener mayor control sobre las mediciones.

Se eligió un reflector de calibración (*agujero pasante de 2,5 mm*) cuyo eco fue maximizado y se registró la amplitud.

Luego se fijó el nivel de los umbrales de detección (*GATES*) con el eco máximo correspondiente al reflector del SDH de 1,5mm.

Se midió la DP del agujero pasante de 2,5 mm.

La densidad de pulso se midió como la distancia en la cual el eco correspondiente al reflector de 2,5mm supera el umbral fijado, correspondiente al reflector de 1,5mm.

Se presentan aquí los resultados.

### 2. EQUIPOS UTILIZADOS

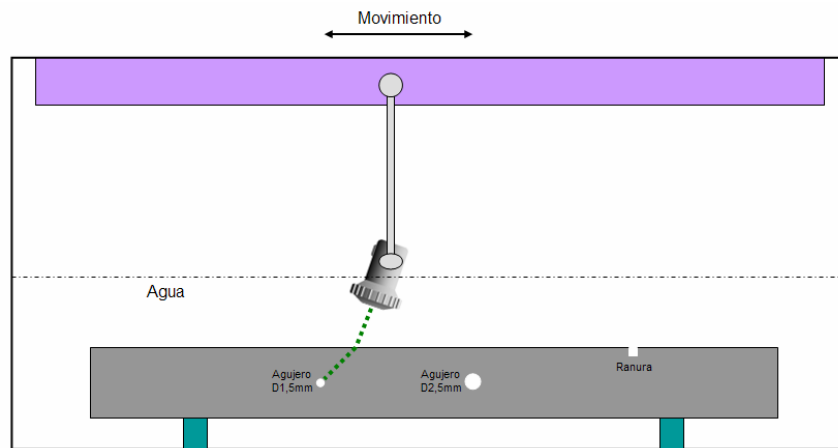


Figura 1. Batea y manipulador

#### 2.1 BATEA PARA ENSAYO DE INMERSION

Esta batea cuenta con un manipulador de 300 mm de recorrido instrumentado con un encoder capaz de resolver 0,003 mm.

#### 2.2 EQUIPO DE ULTRASONIDO BASADO EN PC

Se integró y configuró para estas mediciones el siguiente conjunto de componentes:

- PC Pentium III 1200 Mhz, 256 MB, (*WINDOWS*).
- PULSER JSR Ultrasonics PRF 5000 (*ISA*).
- DIGITALIZADORA SONIX 8Bit 100 MS/s (*ISA*).
- DAQ Nacional Instruments PCI-6014 (*PCT*)

Así como también se realizaron diferentes programas basados en LabVIEW.



Figura 2. Placa Pulsar JSR –PRC35

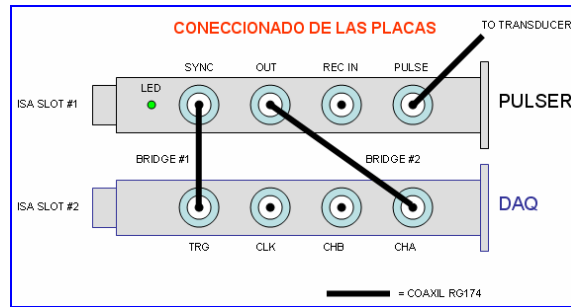


Figura 3. Puentes

- El programa que controla la pulser permite:

- Apagarla y encenderla.
- Controlar la ganancia.
- Controlar la FRP.
- Controlar el amortiguamiento.
- Ajustar la energía del pulso.
- Setear filtros pasa alto y pasa bajos.

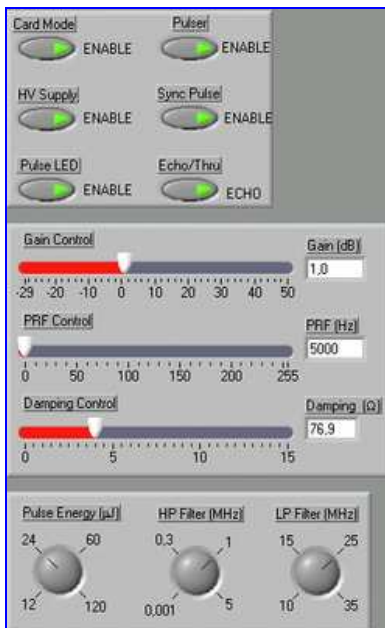


Figura 4. Panel de control para la configuración del Pulsar

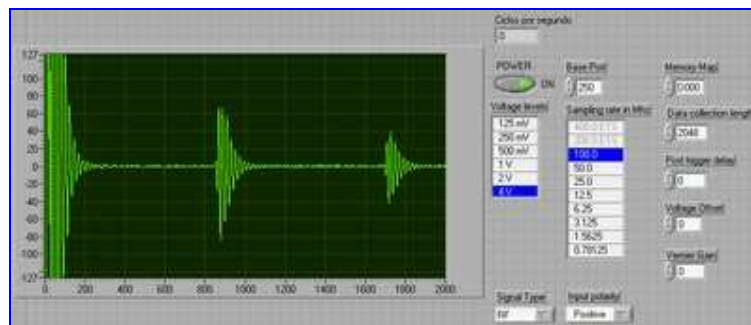
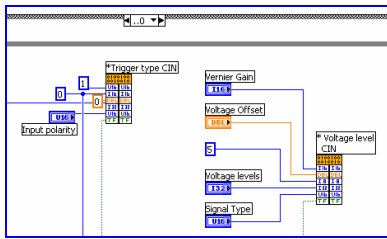
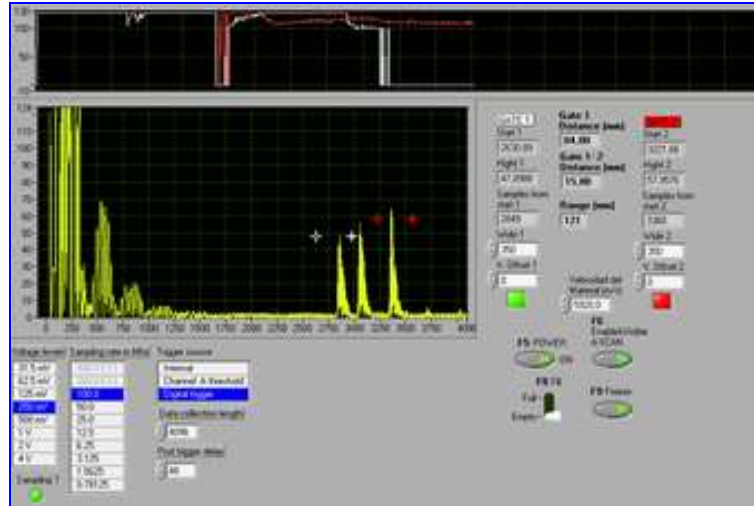


Figura 5. Vista modo osciloscopio A-SCAN RF

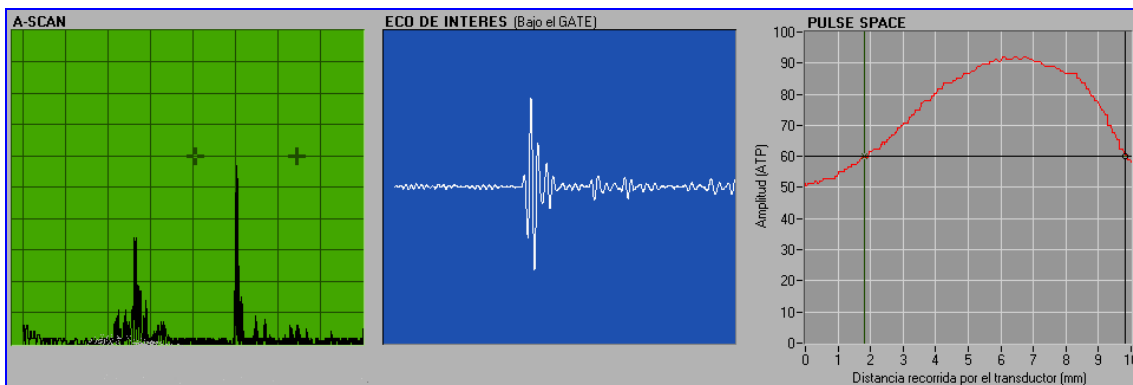


**Figura 6.** Parte del código de los drivers en labview



**Figura 7.** Vista modo Equipo US y chart en gates

- El programa que digitaliza y funciona como un osciloscopio permite visualizar la onda de ultrasonido en forma de radio frecuencia, y adquirir datos a disco (*limitado a 8000 puntos por vez*).
- El programa completo ídem a un equipo tradicional presenta:
  - Rango en mm.
  - Dos gates.
  - Función medición, 0 a Gate, y Gate a Gate.
  - Modo congelado y Modo retención de picos.
  - Graficación de la salida de los dos gates en un “chart” de un minuto de duración
- El programa dedicado a la medición de la DP presenta:
  - Rango en mm.
  - Un gate para la medición de la DP.
  - Modo congelado de pantalla (Freeze).
  - Modo retención de picos.
  - Función “gate expand” que muestra el detalle del eco bajo el gate.
  - Grafica DP, con cursores para la medición.



**Figura 8.** Vista pantalla equipo UT- vista pulso RF – y chart con el perfil del haz ultrasónico

### 2.3 TRANSDUCTORES UTILIZADOS (Todos nuevos)

- Panametrics 5MHz, diámetro 9.5 mm, de contacto.
- Panametrics 10MHz, diámetro 9.5 mm, de contacto.
- Krautkramer 5MHz, diámetro 9 mm, de inmersión.
- Krautkramer 5MHz, diámetro 15 mm, de inmersión focalizado cilíndrico.
- Sonatest 5MHz, diámetro 9.5 mm, de contacto.

### 2.4 BLOQUE ENSAYADO

Se utilizo un bloque de acero SAE 1020 de 20 mm de espesor con los siguientes reflectores artificiales:

- Ranura externa de 1,30 mm de profundidad, 0.43 mm de ancho y 20 mm de largo (*EDM*).
- Agujero lateral (*SDH*) al 50% del espesor de diámetro 1,5 mm y 30 mm profundidad.
- Agujero lateral (*SDH*) al 50% del espesor de diámetro 2,5 mm y 30 mm profundidad.

### 3. MEDICIONES

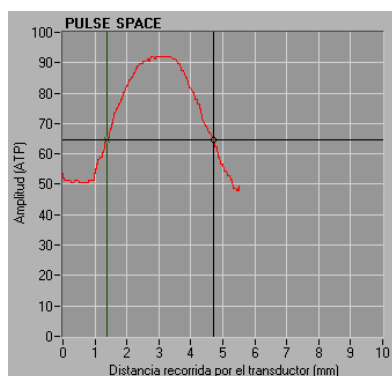
Las mediciones sobre los SDH se realizaron con la siguiente configuración:

- 15 mm de camino sónico en agua (*Aproximado*)
- Señal del SDH de 2,5 mm maximizada (*Dentro del 100% de ATP*) y umbral de detección seteado con el máximo eco correspondiente al SDH de 1,5 mm.
- Mediciones de DP sobre la señal del SDH de 2,5 mm.
- Ganancia según tabla.
- Damping 333 $\Omega$ , Energía del pulso 24 $\mu$ J, FRP en 1000.
- Filtro pasa altos en 0,3 MHz, Filtro pasa bajos en 25 MHz.
- 100 MS/s, 8 Bits en +- 1V, A-SCAN de 4000 puntos.

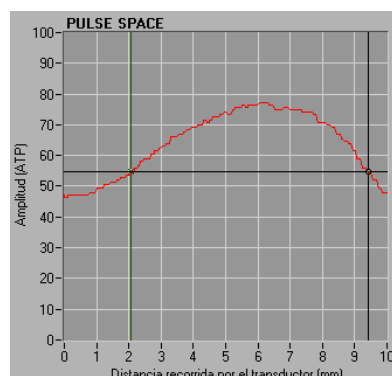
**Tabla I.** Secuencia de ensayos

ENSAYO	TRANSDUCTOR	SDH 1.5 mm		SDH 2.5 mm	ATENUACIÓN ENTRE ECOS	DP	ANGULO - GANANCIA
		ATP	Umbral	ATP			
A	Panametrics A551S 5MHz, 9.5mm	65%	65%	93%	3.1 dB	3.3 mm	45° - 18dB
B	Panametrics A551S 5MHz, 9.5mm	55%	55%	80%	3.3 dB	7.4 mm	70° - 18dB
C	Panametrics A552S 10MHz, 9.5mm	63%	63%	94%	3.5 dB	6.7 mm	45° - 16.5dB
D	Panametrics A552S 10MHz, 9.5mm	72%	72%	95%	2.4 dB	7.5 mm	70° - 26dB
E	Krautkramer H5K 5MHz, 9mm	65%	65%	87%	2.5 dB	4.9 mm	45° - 26dB
F	Krautkramer H5K 5MHz, 9mm	65%	65%	87%	2.5 dB	7.2 mm	70° - 31dB
G	Krautkramer 389029- 150 5MHz, 15mm focalizado	65%	65%	90%	2.8 dB	4.1 mm	45° - 11dB
H	Sonatest QCR3750 5MHz, 9.5mm	58%	58%	83%	3.1 dB	3.4 mm	45° - 16dB

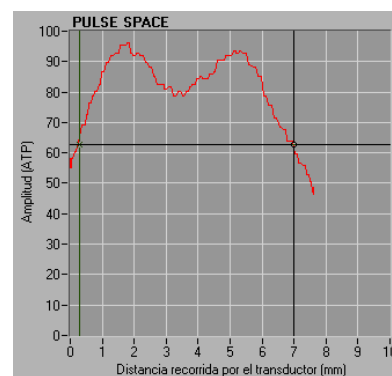
**Tabla II. Pantallas de DP en agujeros**



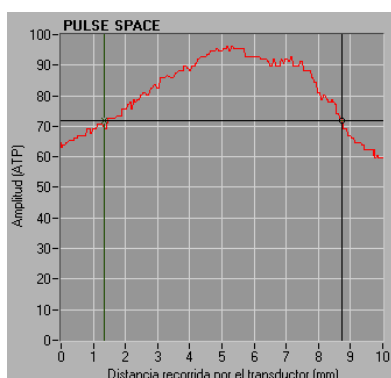
Ensayo "A" con transductor Panametric 5MHz, 9.5mm - 45 grados refracción



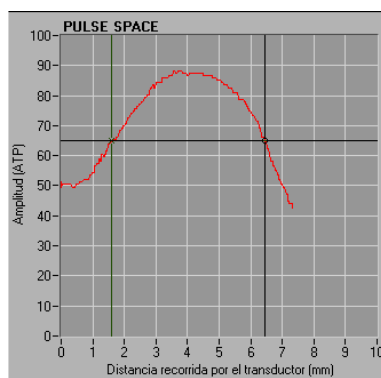
Ensayo "B" con transductor Panametric 5MHz, 9.5mm - 70 grados refracción



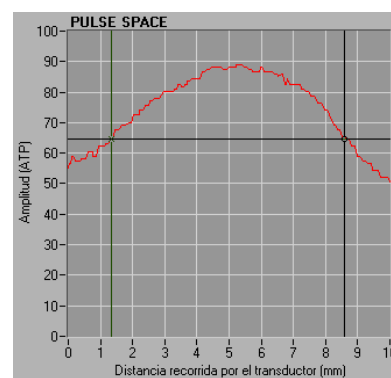
Ensayo "C" con transductor Panametric 10MHz, 9.5mm - 45 grados refracción



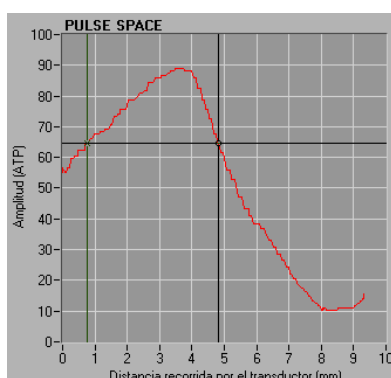
Ensayo "D" con transductor Panametric 10MHz, 9.5mm - 70 grados refracción



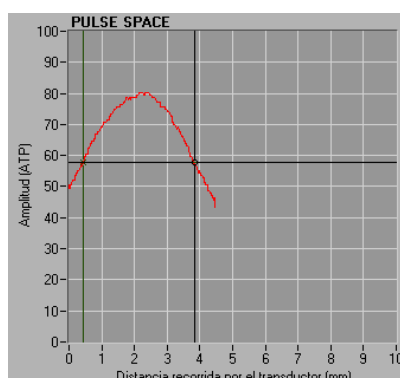
Ensayo "E" con transductor Krautkramer H5K 5MHz, 9mm 45 grados refracción



Ensayo "F" con transductor Krautkramer H5K 5MHz, 9mm 45 grados refracción



Ensayo "G" con transductor Krautkramer focalizado 5MHz, 15mm 45 grados refracción



Ensayo "H" con transductor Sonatest 5MHz, 9.5mm - 45 grados refracción

Los agujeros transversales de 1.5 mm y 2.5 mm dependiendo del camino sónico y de la frecuencia del transductor serán equivalentes a un reflector de disco circular plano (FBH) según la formula (1) y una relación de amplitud de acuerdo a la formula (2). Para el caso de un material con atenuación debida únicamente a la divergencia, los valores se muestran en la Tabla III

$$d_{disc} = 0.67 \sqrt{\lambda \sqrt{d_{cyl} z}}$$

Formula (1)

$$\frac{H_F}{H_B} = \frac{KP_O \pi^2 D^2 D_F^2}{16 \lambda^2 z^2} = \frac{\pi D_F^2}{8 \lambda z}$$

Formula (2)

Tabla III. Relaciones entre reflectores

ángulo refractado	frecuencia Hz	velocidad mm/seg.	$\lambda$ mm	z mm	$d_{cyl}$ mm	$d_{disc}$ mm	HF % ATP	relación
45°	5.E+06	3.E+06	0.64	14	1.50	1.15	23.08	2.22
45°	5.E+06	3.E+06	0.64	14	2.50	1.30	29.80	
70°	5.E+06	3.E+06	0.64	29	1.50	1.38	16.04	2.22
70°	5.E+06	3.E+06	0.64	29	2.50	1.56	20.70	

Para el caso de la ranura realizada por electroerosión de un largo de 20 mm, ancho 0.43 mm y una profundidad de 1.30 mm (6.45% del espesor de la chapa)

La densidad de pulso para ½ paso y para 1 paso será de:

Tabla IV. DP de ranura como reflector

Camino sónico	% ATP de la Ranura	Atenuación para situar el umbral en:	% ATP del gate	Densidad de Pulso
½ paso (14.15 mm)	86 % ATP	-1 dB	76 % ATP	2.2 mm
	86 % ATP	-2 dB	68 % ATP	2.8 mm
	86 % ATP	-3 dB	61 % ATP	3.3 mm
	86 % ATP	-6 dB	43 % ATP	5.3 mm
1 paso (28.30 mm)	86 % ATP	-1 dB	76 % ATP	4.4 mm
	86 % ATP	-2 dB	68 % ATP	5.6 mm
	86 % ATP	-3 dB	61 % ATP	6.6 mm
	86 % ATP	-6 dB	43 % ATP	9.3 mm



El siguiente ensayo se realizó con un transductor Panametrics A551S - 5MHz, 9.5 mm con un ángulo refractado de 45 grados:

**Tabla V. Pantallas de DP en ranura**

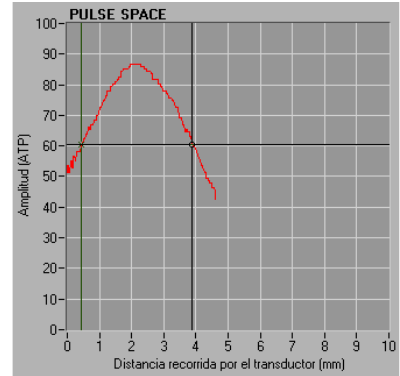
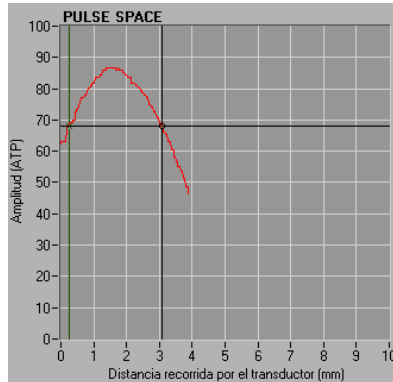
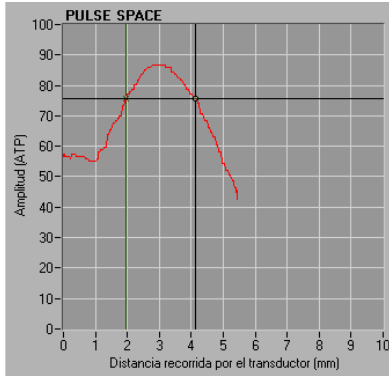
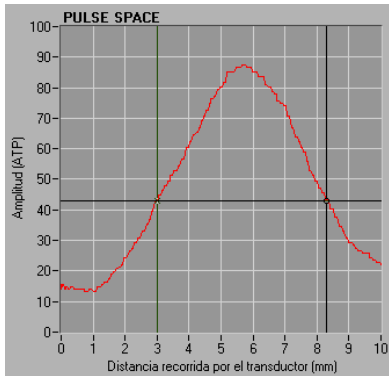


Grafico de la Densidad de Pulso para 1/2 paso con el umbral de medición a -1 dB

ídem umbral de medición a -2 dB

ídem umbral de medición a -3 dB



ídem umbral de medición a -6 dB

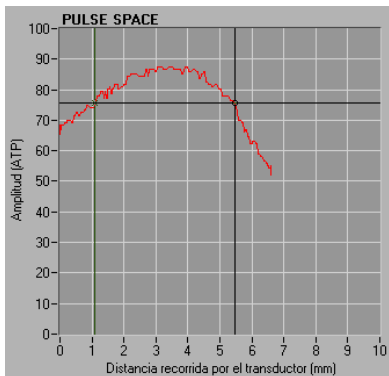
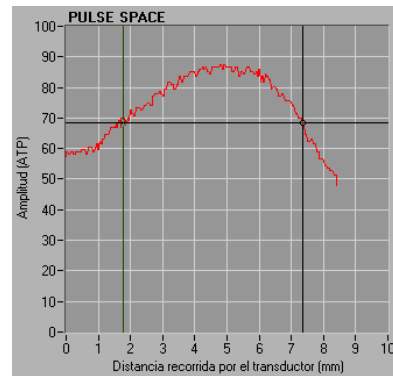
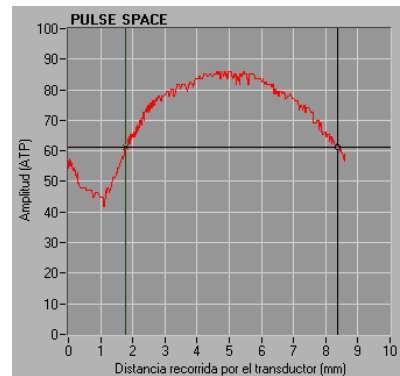


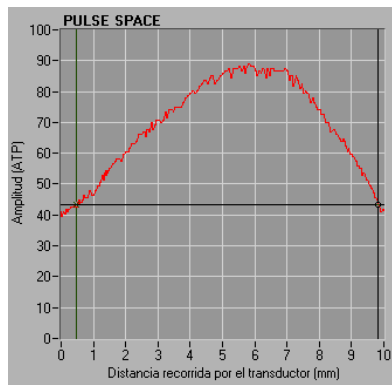
Grafico de la Densidad de Pulso para 1 paso con el umbral de medición a -1 dB



ídem umbral de medición a -2 dB

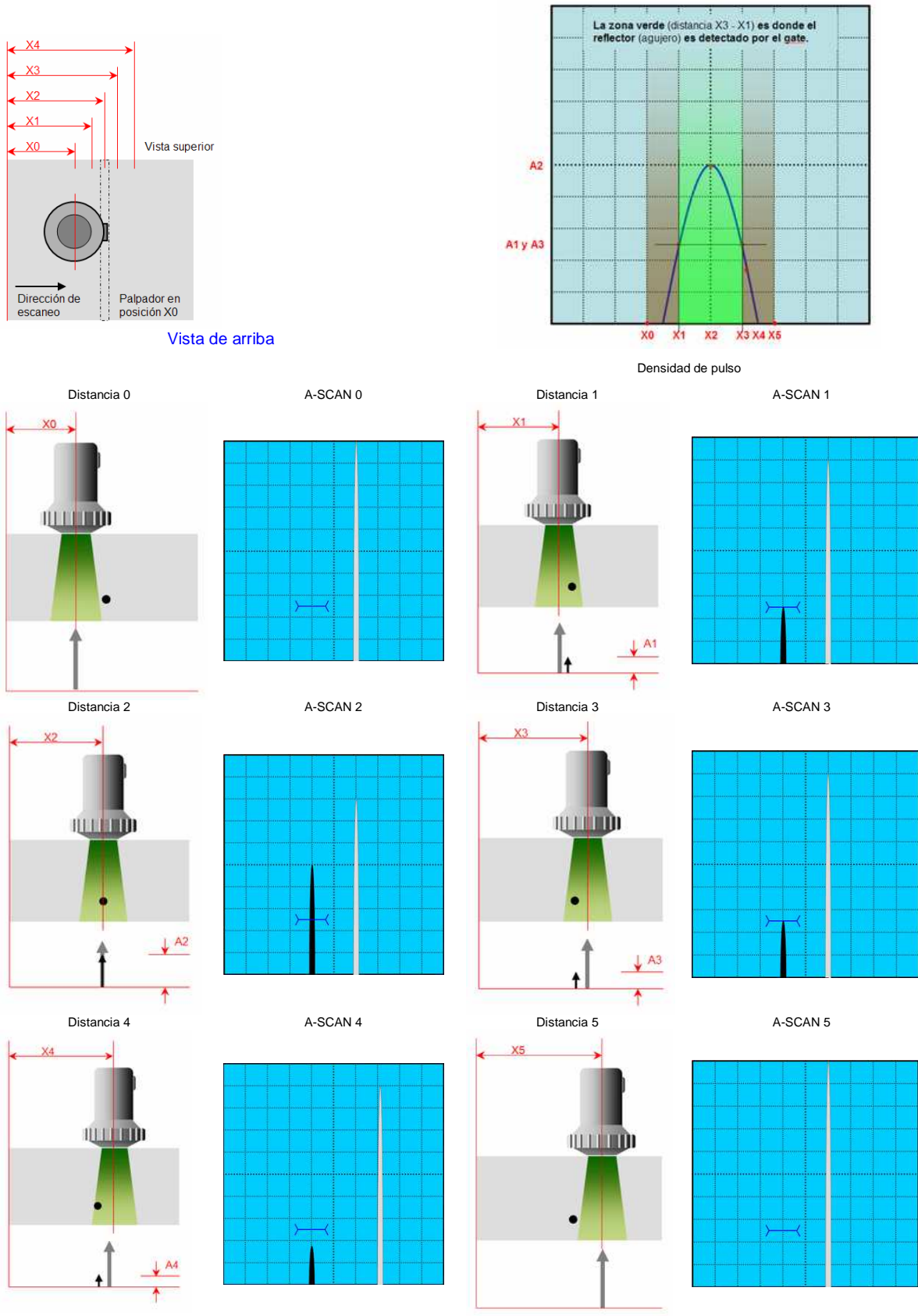


ídem umbral de medición a -3 dB



ídem umbral de medición a -6 dB

**Tabla VI.** Esquema del ensayo de medición de la DP



**Tabla VI:** El esquema de esta tabla muestra el proceso utilizado para la determinación de la densidad de pulso.

Transductor normal que avanza sobre plancha de aluminio con un agujero pasante, cuyo diámetro es equivalente al 10% del espesor.

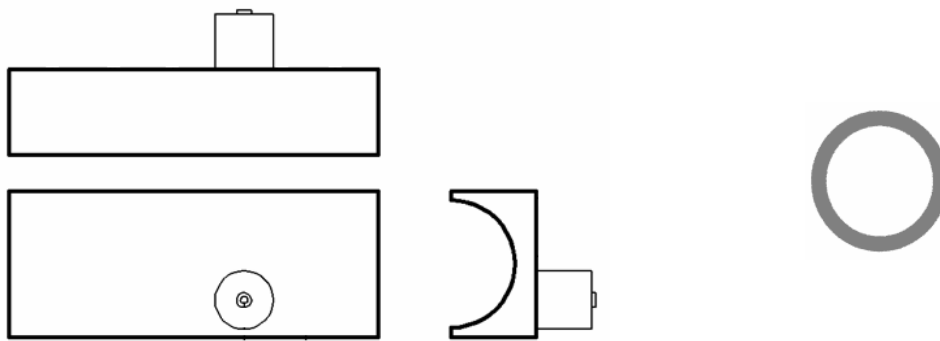
Con el umbral situado al 25% de la altura total de pantalla, solo se detecta desde las posiciones del transductor correspondientes  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ .

#### 4. INSPECCION DE TUBOS DE ACERO SEGUN ASTM E-213

Para el desarrollo de este punto decidimos establecer parámetros de inspección, que sumados a la DP determinada, nos permitirán realizar una demostración específica de la influencia de la DP en el cumplimiento de la ASTM E-213 (*punto 12.3*), cuyo requisito es que la inspección realizada deberá tener un 100% de cobertura de la superficie.

Para ello, suponemos el caso de utilizar un equipo con una FRP de 1000 Hz para realizar la inspección de discontinuidades longitudinales internas y externas, en un tubo de un determinado diámetro, con un transductor montado en una zapata diseñada para tal fin.

Ahora, se necesita saber a cuantas RPM debe girar el tubo, y el avance axial del transductor, para lograr una cobertura del 100% de la superficie a ensayar.



**Figura 9.** Zapata y tubo

##### 4.1 Cálculo de velocidad tangencial

La densidad de pulso aplicada a este problema es aquella que se encontró en este estudio para poder discriminar dos reflectores que presentan una variación entre ellos de 3 dB (*SDH 1,5mm y SDH 2.5mm*).

Para un transductor de 5MHz de 0.375" (*9.5 mm*) de diámetro, utilizando un ángulo refractado en el material de 45°, la DP es 3,3mm.

$$Vel_{tag} = \frac{FRP \times DP}{N_{canales}} = \left[ \frac{mm}{s} \right]$$

Obteniéndose una velocidad tangencial de  $\Rightarrow Vel_{tag} = \underline{3300 \text{ mm/s}}$ .

#### 4.2 Calculo de las RPM

Las RPM se determinan como:

**Fehler! Es ist nicht möglich, durch die Bearbeitung von Feldfunktionen Objekte zu erstellen.**

Para un tubo de OD: 60 mm tendríamos 1050 RPM

#### 4.3 Cálculo del avance axial o de traslación

Para el caso de un único transductor, los requerimientos mínimos para la cobertura del 100% de un material, es que el paso debe ser menor que el ancho del haz.

Como valor aproximado del ancho del haz, se toma el 70% del diámetro del transductor (ver referencia 9).

El paso será de 7mm

#### 4.4 Cálculo de la velocidad axial o de translación máxima

**Fehler! Es ist nicht möglich, durch die Bearbeitung von Feldfunktionen Objekte zu erstellen.**

Resultando una velocidad axial:  $V_{axial} = 122,5$  mm/seg.

### CONCLUSIONES

- Entre camino recorrido por el haz ultrasónico con  $\frac{1}{2}$  paso a el camino recorrido por el haz ultrasónico 1 paso, la densidad de pulso para lograr el mismo efecto es el doble. Para determinar la velocidad máxima de inspección se tomara la menor densidad de pulso.
- Comparando el mismo tipo de transductor, igual ángulo refractado y caminos sónicos sin reflexiones en paredes posteriores, los agujeros transversales y la ranura por electro erosión, tienen igual densidad de pulso (3.3 mm) para el caso en que sitúe el gate a -3dB de la amplitud de eco máxima (80% ATP máxima señal y 56% posición del gate).
- Para tener la menor cantidad de re-procesos debido a reflectores de menor tamaño que el utilizado en la calibración se tendría que optar por una densidad de pulso menor a 2.2 mm que es equivalente a tener una relación del 10% entre el valor máximo del reflector de calibración y la ubicación del umbral o nivel de rechazo.
- A medida que se trabaja con mayores ángulos refractados aumenta la densidad de pulso pero también se obtendrán ecos de menor amplitud – Por ejemplo para  $45^\circ$  se tiene DP de 3.3 mm y con  $70^\circ$  una DP de 7.4 mm.
- Este estudio permite una idea del perfil del haz sónico (*beam profile*); por ejemplo, se determino que el transductor de 10MHZ tenía dos lóbulos principales.

## **DISCUSION y TRABAJOS FUTUROS**

Aunque este trabajo se realizó con una pieza plana (*chapa*) conteniendo ranuras por electro erosión y agujeros transversales, y el movimiento de los transductores sobre esta superficie fue realizada en forma causi estática en una columna de agua por inmersión, las conclusiones son validas para el caso de:

- Superficies curvas donde se deberá tener en cuenta para el cálculo de la velocidad máxima de inspección que los ángulos de refracción en la superficie interna del tubo son mayores que el de refracción en la superficie externa respecto de la normal. Por ejemplo para una configuración de inspección de un tubo de diámetro 60 mm por 5 mm de espesor se podría tener un el ángulo refractado interno será de  $45^\circ$  y el ángulo refractado externo será de  $36.1^\circ$

Como trabajo futuro se plantean las siguientes actividades:

- Correlacionar los resultados obtenidos en la determinación de densidad de pulso y la velocidad máxima de avance calculada con un sistema dinámico de inspección.
- Proponer una metodología que permita establecer: Niveles de los umbrales de descarte, Máxima velocidad tangencial (barrido), Máxima velocidad de avance (traslación) en forma automática en base a una especificación, diámetro, espesor del producto y cantidad de transductores.
- Realizar estudios con transductores focalizados con distintos trayectos previos en agua para analizar su influencia en la determinación de la densidad del pulso.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a:

- TENARIS Siderca por su apoyo brindado para este proyecto, en forma especial al personal del TAND y CAPE.
- Auditec Argentina SA por la colaboración brindada en la provisión de equipamientos, transductores y zapatas.

## **BIBLIOGRAFIA**

1. ASNT, *Nondestructive Testing Handbook*, second edition: Volume 7, *Ultrasonic Testing*, Columbus, Ohio, American Society for Nondestructive Testing, 1991.
2. ASTM International, *E 1065-99: Standard Guide for Evaluating Ultrasonic Search Units*, West Conshohocken, Pennsylvania, ASTM International, 2003.

3. Beck, K.H., "Ultrasonic Array Configuration for Interlaced Scanning," *Materials Evaluation*, Vol. 46, 1988, pp. 771-772.
4. Beck, K.H., "Ultrasonic Transducer Focusing for Inspection of Cylindrical Material," *Materials Evaluation*, Vol. 49, 1991, pp. 875-882.
5. Beck, K.H., "Ultrasonic Refraction Angles for Inspection throughout the Total Wall Thickness of Tubes and Pipes," *Materials Evaluation*, Vol. 51, 1993, pp. 607-612.
6. Bergmann, L., *Der Ultraschall*, Zurich, S. Hirzel Verlag, 1954, pp. 319-329.
7. Krautkramer, J. and H. Krautkramer, *Ultrasonic Testing of Materials*, fourth edition, New York, Springer-Verlag, 1990.
8. Singh, G.P. and J.L. Rose, "A Simple Model for Computing Ultrasonic Beam Behavior of Broad-band Transducers," *Materials Evaluation*, Vol. 40, No. 8, 1982, pp. 880-885.
9. Carballal, C y Russi, D, "*Determinación de la distancia axial entre transductores de ultrasonido en la inspección de productos tubulares*".