

# Applying Acoustic Pulse Reflectometry (APR) for the Detection of Pinholes in Heat Exchanger Tubes

Daniel Bobrow <sup>1</sup>, Jayder Carrillo <sup>2</sup>, Jorge Clemente <sup>2</sup>

<sup>1</sup> AcousticEye; 4 Harechev St, Tel Aviv, Israel  
Phone: +972 50 661718; e-mail: [daniel.bobrow@acousticeye.com](mailto:daniel.bobrow@acousticeye.com)

<sup>2</sup> Cantarell Nitrogen Plant, The Linde Group, State of Campeche, México

## Abstract

Acoustic Pulse Reflectometry (APR) is a tube inspection method that has been gradually gaining acceptance as a tool for heat exchanger tube inspection due to its numerous advantages compared to other techniques used for this purpose, notably: (1) the high rate of inspection attainable (at the speed of sound); (2) the independence from physical sensors and transducers, allowing its application to a wide range of tube configurations and (3) its insensitivity to the tube material, since the acoustic signals are transmitted and reflected through the air, rather than by the tube wall. In this paper we present the application of APR for the fast detection of pinhole sized perforations in tubes of sea-water cooled heat exchangers in the Cantarell Nitrogen plant, located in the state of Campeche, Mexico.

The main result of this work is that a NDT scheme combining a first screening stage by APR, comprising 100% of the tubes, with a final stage based on pneumatically testing only those tubes showing APR indications, is highly effective in the detection of pinholes while drastically reducing the total inspection cycle time – in this case (3180 tubes) from more than 200 to less than 30 hrs.

**Keywords:** Reflectometry, Acoustics, Heat Exchangers, Tubes, Inspection

## Aplicación de la Reflectometría de Pulso Acústico (RPA) para la Detección de Agujeros Pequeños en Tubos de Intercambiadores de Calor

Daniel Bobrow <sup>1</sup>, Jayder Carrillo <sup>2</sup>, Jorge Clemente <sup>2</sup>

<sup>1</sup> AcousticEye; Calle Harechev 4, Tel Aviv, Israel  
Tel: +972 50 661718; e-mail: [daniel.bobrow@acousticeye.com](mailto:daniel.bobrow@acousticeye.com)

<sup>2</sup> Planta de Nitrógeno Cantarell, Grupo Linde, Estado de Campeche, México

## Resumen

La Reflectometría de Pulso Acústico (RPA) está siendo aceptada últimamente para la inspección de tubería de intercambiadores de calor debido a sus numerosas ventajas, en comparación a otras técnicas usadas para este fin, notablemente: el alto ritmo de inspección obtenible (a la velocidad del sonido), su independencia de sondas y de palpadores físicos que permite su aplicación a una gran gama de configuraciones de tubos y su idoneidad a toda clase de material de tubo, propagándose las señales transmitidas y reflejadas por el aire, en vez de por el material del tubo. En este trabajo presentaremos la aplicación de la técnica de reflectometría de pulso acústico para la rápida detección de agujeros pequeños en flusería de intercambiadores de calor enfriados por agua de mar en la Planta de Nitrógeno Cantarell, Grupo Linde, localizada en el Estado de Campeche, México.

El principal resultado de este trabajo es que un plan de ensayos END combinando una primera etapa de filtraje por RPA del 100% de los tubos con una etapa final de ensayos neumáticos solamente de aquellos tubos con indicaciones RPA, es muy eficaz en la detección de pequeñas perforaciones y reduce a la vez drásticamente el tiempo de inspección total – en éste caso (3180 tubos) desde más de 200 horas a menos de 30 horas.

**Palabras clave:** Reflectometría, Acústica, Intercambiadores de Calor, Tubos, Inspección

## 1. Introducción

La Reflectometría de Pulso Acústico (RPA) es un método de inspección de tubos que está últimamente ganando aceptación en la inspección del interior de tubos de intercambiadores de calor [1, 2, 3, 4, 5] para la detección de pérdida de espesor de pared – por picaduras o erosión, de perforaciones y de bloqueos. Las técnicas más comunes hoy en día en la inspección de tubos de intercambiadores de calor, son: las corrientes parásitas y sus derivativas, la inspección ultrasónica rotativa interna (IRIS) y las pruebas neumáticas.

La RPA, no se destaca solamente por su alto ritmo de inspección (del orden de 300 tubos por hora) sino que, por estar basada en la detección de reflejos acústicos causados por cambios locales en la presión local del aire dentro del tubo, es sumamente eficaz en la detección de perforaciones de pared donde la presión acústica local coincide con la atmosférica, y alcanzando límites de detección del orden de 0.4 mm de diámetro.

La Planta de Nitrógeno Cantarell localizada en el Estado de Campeche, México, está compuesta de cinco módulos de producción que incluyen compresores de aire e intercambiadores de calor enfriados por medio de agua de mar (Fig. 1). Debido a las características de ésta última, se hace importante la detección oportuna de fugas en las tuberías del intercambiador, para evitar la contaminación del producto y por consiguiente la generación de daños en las partes internas del compresor, lo cual disminuiría considerablemente su vida útil aunado a la disminución de producción de la planta por el paro del equipo.

Los resultados de análisis de rutina de los condensados de dichos intercambiadores habían indicado la posible existencia de fugas de agua de mar. Esta ponencia describe la aplicación de la RPA en la inspección de la fluxería con el objetivo de detectar tubos perforados, causantes de las fugas.



Figura 1, Diagrama a bloques del enfriamiento de aire

## 2. Detalles y desarrollo del trabajo

### 2.1. Fundamentos de RPA

La idea fundamental en la que se basa el RPA es la de inyectar al tubo un pulso acústico de banda de frecuencias ancha. Mientras el pulso no se tope con discontinuidades geométricas, este continuará propagándose a lo largo del tubo sin causar reflejos. Cuando el pulso se topa con una discontinuidad, como ser bloqueos, expansiones y perforaciones – se origina un

reflejo. Este reflejo puede ser detectado, medido, registrado y almacenado en el disco duro de una computadora.

La amplitud y forma de ese reflejo son determinadas por las características de la discontinuidad, según la representación esquemática en la Fig. 2.



**Figura 2,** Ejemplos esquemáticos de reflejos causados por discontinuidades de diferentes tipos.

El propósito ulterior de la inspección de tubos por este método es conducir una serie de mediciones de tubos lo más rápidamente posible y luego analizar los resultados obtenidos de manera automática y objetiva. Actuando como una sonda virtual, el pulso acústico recorre la longitud del tubo a la velocidad del sonido, resultando en un ritmo de inspección mucho más alto que el posible con métodos intrusivos basados en el recorrido del tubo por palpadores o con ensayos de presión neumática o hidrostática.

## 2.2. El equipo inspeccionado

Los intercambiadores inspeccionados fueron el 60-CM-401-HX-1 y el 60-CM-401-HX-2 (Fig.1) con 1722 y 1460 tubos respectivamente. Los tubos son de acero inoxidable tipo superduplex, de 19 mm de diámetro externo, 1 mm de espesor y 10.5 m de longitud. Las siete columnas de tubos más calientes de cada intercambiador están revestidas con tubos de 17 mm de diámetro externo y 0.5 mm de espesor, hechos de Hastelloy alloy C-276.

## 2.3. Metodología:

El proceso de inspección consistió en las siguientes etapas:

- Desensamble del equipo y preparación del haz de tubos (Fig. 3).
- Limpieza del 100% de los tubos con el empleo de agua dulce a alta presión (8,000 lbs/in<sup>2</sup>), para la eliminación de depósitos mecánicos, químicos, biológicos, etc; y secado de éstos con aire a presión.
- Inspección de los tubos mediante RPA empleando equipo marca Acousticeye, modelo HE-3000 (Fig. 4).
- Verificación de resultados con prueba neumática y boroscopia (Fig. 4).
- Acciones correctivas y prueba hidrostática al haz de tubos.



**Figura 3,** Intercambiadores 60-CM-401-HX-1(izquierda) y 60-CM-401-HX-2



**Figura 4,** Ensayo de RPA (izquierda) y prueba neumática

## ***2.4. Resultados de inspección***

### ***2.4.1. Ensayos de RPA***

Como podrá observarse en el ejemplo de informe RPA presentado en la Fig. 5, el registro de resultados RPA incluye información muy importante como es la clasificación, las dimensiones y la ubicación del hallazgo.

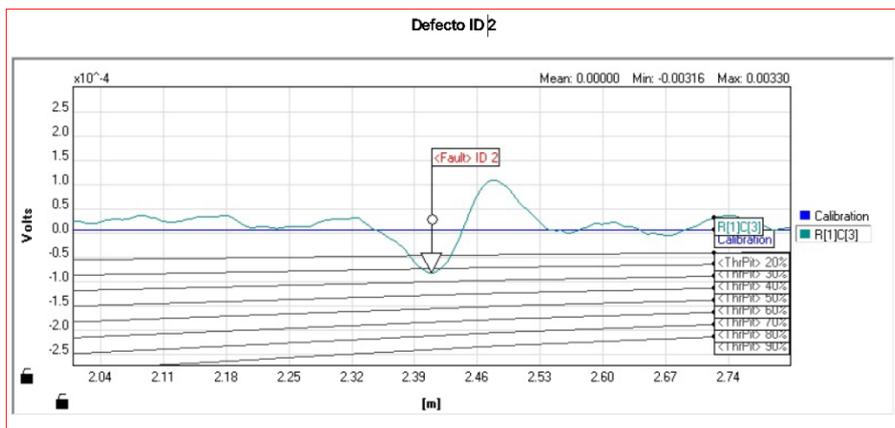
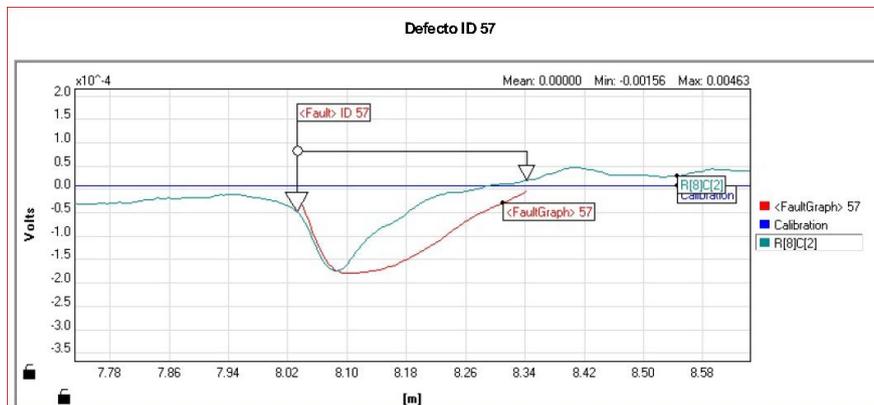
La inspección del 100 % de la fluxería resultó en la detección de defectos en alrededor del 6% de los tubos inspeccionados; la gran mayoría de los defectos fueron clasificados como perforaciones del orden de 0.4 mm de diámetro (o en caso de perforaciones de geometría irregular: el equivalente al de un orificio circular con el mismo efecto RPA) pero también se detectaron tubos con bloqueos y picaduras, según lo exhibido en las tablas No. 1 y No. 2.

### Perforaciones

ID defecto	ID Tubo	Pos[m]	Diámetro[mm]	Condición	Comentarios
<a href="#">38</a>	R[7]C[2]	8.2	0.4		
<a href="#">57</a>	R[8]C[2]	8.03	0.4		
<a href="#">83</a>	R[9]C[3]	7.46	0.4		
<a href="#">210</a>	R[18]C[2]	7.88	0.4		
<a href="#">328</a>	R[25]C[1]	7.85	0.4		
<a href="#">342</a>	R[26]C[1]	8.03	0.4		
<a href="#">367</a>	R[27]C[1]	7.84	0.4		
<a href="#">413</a>	R[29]C[2]	7.86	0.4		

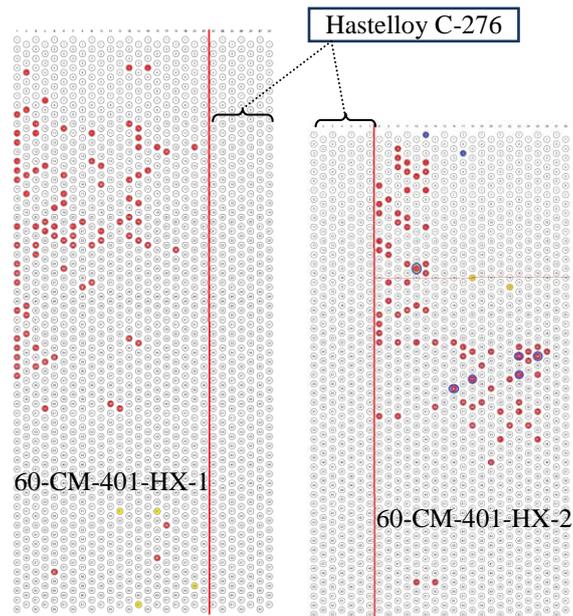
### Picaduras

ID defecto	ID Tubo	Pos[m]	Reducción de espesor de pared	Condición	Comentarios
<a href="#">28</a>	R[5]C[5]	1.02	76.1		
<a href="#">2</a>	R[1]C[3]	2.41	33.4		



**Figura 5**, Extractos de informe RPA de equipo 60-CM-401-HX-2: tablas de defectos, gráficos de señales de tubo perforado (ID 57, tubo R[8]C[2]) y de tubo con picadura (ID 2, tubo R[1]C[3])

Según los mapas de defectos presentados en la Fig. 6 es destacable que, en los dos intercambiadores, el RPA no indica defecto alguno en las siete columnas con revestimiento de Hastelloy C-276, hecho relacionado muy probablemente a la superior resistencia a la corrosión de esta aleación.



**Figura 6,** Mapeo de tubos con indicaciones RPA; se nota que todas las columnas de tubos revestidos con Hastelloy C-276 se encuentran libres de indicaciones de defectos, en comparación con las otras, compuestas de tubos de acero inoxidable superduplex sin revestimiento, que casi todas contienen tubos con indicaciones.

#### 2.4.2. Ensayos Neumáticos

Para validar los resultados, se llevaron a cabo pruebas neumáticas a todos los tubos que presentaron indicaciones de RPA. Inicialmente se realizaron esos ensayos según el procedimiento estándar de la planta, basado en la aplicación de una presión de 5 barg por 20 segundos. Estos ensayos no resultaron en verificación de perforación alguna, pero tras aumentar la presión a 6 barg así como el tiempo de su aplicación, de 2 a 4 minutos, se verificó la existencia de tubos perforados en un 30 % de los casos.

**Tabla No. 1, Resumen de resultados en el equipo 60-CM-401-HX-1**

Tipo de defecto	Tubos perforados según RPA	Tubos no perforados, según prueba neumática	Tubos perforados, según prueba neumática	Comentarios
Agujeros	106	79	27	Las dimensiones establecidas por RPA fueron en 104 casos de 0.4 mm de diámetro, en un caso de 0.5 mm (no verificado por prueba neumática) y en otro de 1 mm (verificado por prueba neumática).
Bloqueos	4	2	2	Porcentaje de área interna bloqueada entre 20 a 78 %, sin correlación con la verificación neumática.

**Tabla No. 2, Resumen de resultados en el equipo 60-CM-401-HX-2**

Tipo de defecto	Tubos perforados según RPA	Tubos no perforados, según prueba neumática	Tubos perforados, según prueba neumática	Comentarios
Agujeros	83		30	Las dimensiones establecidas por RPA fueron en 80 casos de 0.4 mm de diámetro y en 3 casos de 0.5 mm.
Bloqueos	1		1	Varios bloqueos a lo largo del tubo.
Picaduras	6		1	Pérdida de espesor entre 33 á 76%, sin correlación con la verificación neumática

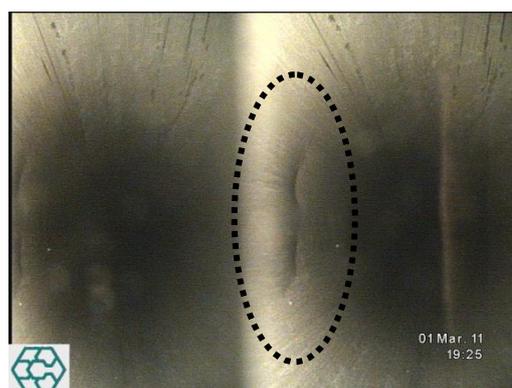
### 2.4.3. Inspección visual remota

AL efecto de verificar indicaciones RPA, corroboradas o no por medio de los ensayos neumáticos, se efectuó una inspección visual remota en algunos de los tubos del intercambiador 60-CM-401-HX-2, a la distancia indicada por la tecnología RPA (Fig. 7).

**Resultado RPA:** El tubo 49,9 presenta una indicación de perforación de 0.4 mm a 7.50 m del espejo frontal.

**Prueba Neumática:** Positiva.

**Inspección Visual Remota:** Se aprecia una deformación en el tubo a la distancia RPA indicada.



**Resultado RPA:** El tubo 49,8 presenta una indicación de perforación de 0.4 mm a 7.88m del espejo frontal.

**Prueba Neumática:** Negativa

**Inspección Visual Remota:** Se aprecia una deformación en el tubo a la distancia RPA indicada.



**Figura 7,** Imágenes de inspección visual remota en zonas con indicaciones RPA de tubos del equipo 60-CM-401-HX-2

### 2.4.4. Prueba hidrostática

Tras taponear todos los tubos verificados por los ensayos neumáticos, se condujeron pruebas hidrostáticas a los dos haces de tubos, según el siguiente procedimiento: (i) aplicación de 2.0

barg durante 20 minutos, (ii) aplicación de 4.0 barg durante 20 minutos, (iii) aplicación de 6.0 barg durante 20 minutos. No se detectaron fugas

### **3. Conclusiones.**

En base a los resultados obtenidos se pueden formular las siguientes conclusiones:

- a) Todos los tubos verificados por las pruebas neumáticas fueron indicados como defectuosos por la previa inspección por RPA.
- b) Ningún tubo sin indicaciones de RPA, fue detectado por medio de ensayos neumáticos o por la prueba hidrostática final.
- c) La verificación neumática fue efectiva solamente al modificar el procedimiento estándar: elevando la presión, de 5 barg a 6 barg, y prolongando el tiempo de ensayo, de 20 segundos a 2-4 minutos.

El resultado a destacar de este trabajo es que un plan de ensayos END combinando una primera etapa de filtraje por RPA del 100% de los tubos con una etapa final de ensayos neumáticos concentrados solamente en aquellos tubos con indicaciones RPA, es muy eficaz en la detección de pequeñas perforaciones y reduce a la vez drásticamente el tiempo de inspección total – en éste caso (3180 tubos) desde más de 200 horas a menos de 30 horas.

### **Reconocimientos**

Éste trabajo fue hecho posible gracias a la cooperación de la compañía Vicont de Toluca, la cual proporcionó el equipo y apoyo técnico y logístico para la ejecución de los ensayos RPA.

### **Referencias**

- [1] David Bryan Sharp, “Acoustic pulse reflectometry for the measurement of musical wind instruments”, PhD Dissertation, University of Edinburgh, 1996
- [2] N. Amir, O. Barzelay, A. Yefet, T. Pechter, “Condenser Tube Examination Using Acoustic Pulse Reflectometry”, J. Eng. Gas Turbines Power, Volume 132, Issue 1, 014501, DOI:10.1115/1.3125302
- [3] N. Amir, O. Barzelay, A. Yefet, T. Pechter, “Inspecting U-tube Bundles Using Acoustic Pulse Reflectometry”, Proceedings of ASME Power 2009, Albuquerque, New Mexico
- [4] Noam Amir, Daniel Bobrow, Tal Pechter, “Inspección y Evaluación de Tubos por Reflectometría de Pulso Acústico”, presentado al VII Congreso Regional de ENDE, Rosario, Argentina, Noviembre 11-13, 2009.
- [5] Daniel Bobrow, Noam Amir, “Aplicación de la Reflectometría de Pulso Acústico (RPA) al Control de Calidad de Limpieza de Intercambiadores de Calor”, presentado al XIII Congreso Internacional de Mantenimiento, Bogotá, Colombia, Abril 6-8, 2011