

# Aplicación de la Reflectometría de Pulso Acústico (RPA) al Control de Calidad de Limpieza de Intercambiadores de Calor

Daniel Bobrow, Noam Amir  
AcousticEye – Tel Aviv – Israel

Tel Aviv, P.O. Box 52489, Israel 67771

Teléfono: +972 3 7586506

Fax: +972 3 6870755

[daniel.bobrow@acousticeye.com](mailto:daniel.bobrow@acousticeye.com)

## Resumen

La contaminación de las superficies de tubos de intercambiadores de calor de tipo carcasa y tubos puede reducir drásticamente la eficiencia de aquellos debido a la disminución del flujo del fluido de proceso así como por el impacto negativo que tiene esa contaminación en la conducción térmica de la pared de tubo.

Esta ponencia exhibe los resultados de un trabajo experimental realizado en una refinería de petróleo con el propósito de evaluar la idoneidad del RPA para el control de calidad del proceso de limpieza de tubos de intercambiadores de calor.

Las conclusiones del trabajo son que el RPA es capaz de calificar cuantitativamente la calidad de limpieza de tubos; hecho que puede ser aplicado para validar nuevos procesos y establecer procedimientos, así como para formular especificaciones y contratos de limpieza.

## Introducción

Durante la operación de intercambiadores de calor de plantas de proceso, entre ellas las refinerías de petróleo, las superficies de intercambio de calor se van cubriendo por capas de materias de contaminación, como ser productos de corrosión, depósitos mecánicos, químicos y biológicos, inherentes a la operación de las plantas (Fig. 1). Este efecto causa el deterioro de la eficiencia de transmisión calorífica con el resultado final de reducir la eficiencia operativa de toda la planta.



**Fig. 1:** Vista de tubos, después de limpieza por chorro de agua a presión, con restos de depósitos calcáreos

Entre las varias tareas y procesos que se aplican al mantenimiento de intercambiadores de calor, la limpieza de tubos tiene la importancia de restaurar la capacidad de transmisión de calor reducida por la acumulación de las materias no conductivas arriba mencionadas. Uno de los métodos de limpieza más comunes que se aplica a ese fin aplica un chorro de agua a alta presión (ente 500 á 2000 atmósferas) con el propósito de desintegrar, desprender, desalojar y extraer el material de contaminación (Fig. 2).



**Fig. 2:** Limpieza manual por chorro de agua a presión – fase principal.

Este proceso de limpieza puede sufrir de inconsistencias de diferente índole, como ser en el control de la presión del chorro de agua o en el tiempo dedicado a la limpieza de cada tubo; cuando siempre existe la posibilidad de saltar tubos.

Por falta de método de inspección simple y eficaz, el control de calidad de la limpieza del interior de los tubos se basa

generalmente en la inspección visual, método que no tiene la sensibilidad y cuantibilidad adecuadas para su aplicación a requerimientos de limpieza en contratos, especificaciones técnicas y procedimientos internos.

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] para la detección de pérdida de espesor de pared por picaduras o erosión, perforaciones y bloqueos.

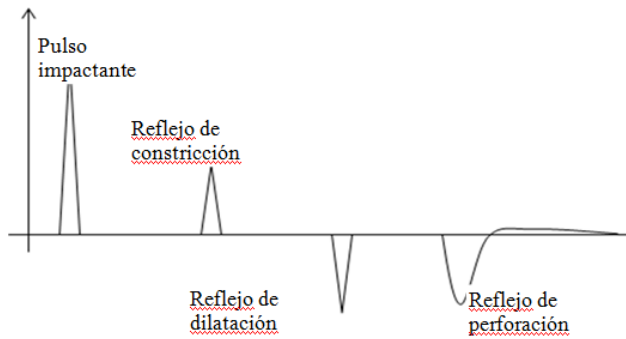
Este trabajo presenta una descripción condensada de la técnica de RPA, la cual ha sido descrita ya en otros trabajos. Procederemos presentando los resultados de una serie de ensayos llevados a cabo en una refinería de petróleo con el fin de investigar la idoneidad del RPA para la evaluación cuantitativa del estado de limpieza de tubos de intercambiadores de calor.

### La inspección de tubos con RPA

#### Fundamentos de RPA

La idea fundamental en la que se basa el RPA es inyectar a un tubo un pulso acústico de banda 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. 3.



**Fig. 3:** 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 las mediciones de la forma más rápida y objetiva. Actuando como una sonda virtual el pulso acústico recorre la longitud el tubo a la velocidad del sonido, resultando en un ritmo de inspección mucho más alto que el posible con otros métodos. Así mismo, la carencia de sonda física, que pudiese atascarse en restos de contaminación, hace que este método sea especialmente adecuado para la inspección de limpieza de tubos.

#### Análisis de la Señal

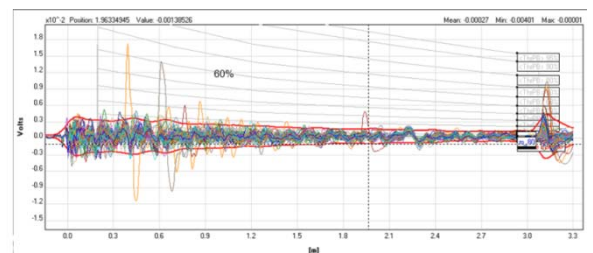
La realización de las mediciones físicas de los tubos es el primer paso para evaluar el estado de limpieza de los tubos (Fig. 4). El análisis de estas mediciones es una tarea de enormes proporciones, a menos que este sea hecho por medio de un software de análisis automático.

Las señales de las mediciones siempre contienen un cierto grado de variabilidad, debido al ruido ambiental, al ruido interno del sistema electrónico y a las fluctuaciones causadas por los reflejos de suciedad residual. Por lo tanto, el primer paso del análisis es encontrar el "nivel básico" del ruido y la definición de una "manga de

ruido" calculada en base a desviaciones estándar. El software también superpone una serie de curvas que representan pautas de medición de bloqueo como las representadas en la Fig. 5.



**Fig. 4:** Inspección de tubos de intercambiador de calor por medio de sistema RPA; a derecha inspector y unidad de control computarizada, y a izquierda – operario tomando mediciones con sonda acústica.



**Fig. 5:** Gráfico típico de señales RPA mostrando señales de tubos, banda de ruido y pautas de bloqueos superpuestas, con dos señales de medición mostrando bloqueos de 60%, 65% y menores.

La caracterización cuantitativa del estado de limpieza (o de suciedad) puede hacerse aplicando dos parámetros cuantitativos: (i) el ancho de la banda de ruido a distancia determinada a lo largo del tubo y (ii) el porcentaje de tubos con bloqueos mayores que una pauta de bloqueo determinada.

## Inspección de condición de limpieza con RPA

### Los ensayos

Tuvimos a nuestra disposición un intercambiador de calor de tipo carcasa y tubos (número de identificación 602A), retirado de servicio para su limpieza y retubado, con el que nos fue permitido controlar el proceso de limpieza de chorro de agua variando el nivel de presión aplicado así como el tiempo de aplicación del chorro de agua a cada tubo.

El proceso de limpieza consistió en tres fases: (i) la primera fase tuvo como propósito desprender depósitos adheridos a la superficie interna del tubo introduciendo a lo largo del tubo una sonda con orificios normales a las superficie del tubo e inyectando agua a bajo caudal y a presión de 7-8 KSI; (ii) durante la fase principal se aplicó, por medio de una pistola (Fig. 2), un chorro de agua dirigido a lo largo del tubo y a presión de 7.5-10 KSI; por último se enjuagaron los tubos por medio de un hidrante de baja presión hasta la extracción completa de los restos de agua contaminada.

Durante los ensayos nos enfocamos en la fase principal, aplicando dos niveles de presión de agua: 7,500 y 10,000 libras por pulgada cuadrada, y cuatro tiempos de limpieza: 5, 10, 20 y 30 segundos por tubo.

Al cabo del proceso de limpieza, los tubos fueron sopleteados con aire a presión para extraer restos de agua que pudiesen causar reflejos de artefacto durante la subsecuente inspección por RPA.

Por último, se realizaron sesiones de inspección por RPA en un intercambiador nuevo, de referencia, y en el intercambiador sujeto de los ensayos de limpieza controlada mencionado arriba. Los resultados fueron analizados, cuantificando el nivel de obstrucción de los tubos según lo detallado en la sección siguiente.

## Resultados

El estado de limpieza de tubos se refleja, en los gráficos de RPA, principalmente en dos características medibles: (i) el número de tubos bloqueados por arriba de un nivel determinado y (ii) el ancho de la banda de ruido, medido por las pautas de bloqueo superpuestas al gráfico RPA y tangentes a las curvas que delimitan esa banda.

En el ejemplo de la Fig. 5 se puede ver que la banda de ruido, calculada en base de un muestreo de tubos sin bloqueos sobresalientes, tiene un ancho delimitado por pautas de bloqueo de alrededor de 15%. Así mismo se pueden ver tubos con bloqueos de 65% y 60%.

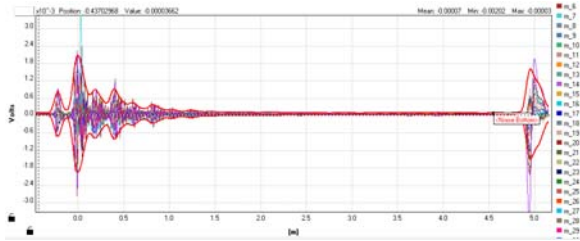
La Tabla I muestra distintos grupos de tubos, con sus pertinentes historias de limpieza y los resultados obtenidos tras la inspección por RPA.

Se nota que tubos con historias indicativas de mejor estado de limpieza (particularmente tubos nuevos y tubos que fueron limpiados a más alta presión o tiempo) muestran los mejores niveles de limpieza (Fig. 6 y Fig. 7). Por ejemplo: la banda de ruido de tubos nuevos representa un porcentaje de bloqueo menor que 1%, sin bloqueos mayores que la banda de ruido (Fig. 6); y tubos sometidos a chorro de agua de 10 KSI por 5 segundos tienen una banda de ruido de 12%, con solamente 1.4% de los tubos bloqueados más que el 50% y ninguno con más de 75% de bloqueo (Fig. 7).

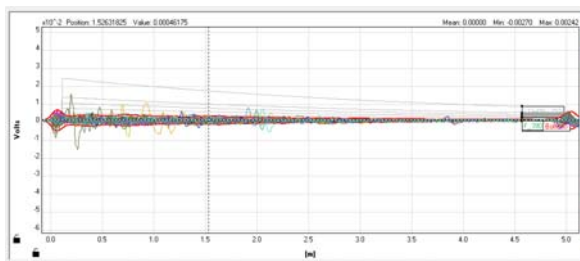
Por otra parte, tubos en los que no se aplicó del todo la fase de limpieza principal muestran bandas de ruido de 20% de bloqueo con 11.3% de los tubos bloqueados por arriba de 75% y 26% de los tubos con bloqueos mayores al 50% (Fig. 8).

Es interesante notar que tubos que habían sido limpiados según el procedimiento vigente, pero sin control de tiempo (Tabla I, tercera hilera), demuestran un estado de limpieza peor que los tubos limpiados

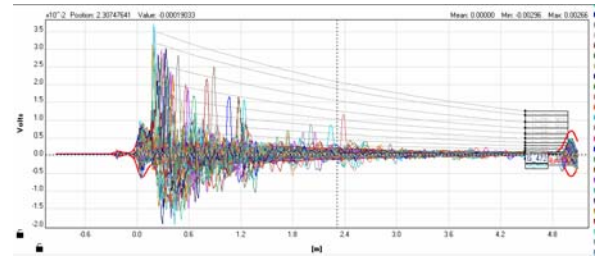
durante la mitad del tiempo, pero controladamente.



**Fig. 6:** Gráfico RPA obtenido en tubos nuevos – banda de ruido equivalente a bloqueo menor del 1%.



**Fig. 7:** Gráfico RPA obtenido en tubos limpiados por chorro de agua a 10 KSI de presión y 5 segundos por tubo – banda de ruido equivalente a bloqueo de 12%; 1.4% de tubos con bloqueos mayores al 50% y sin tubos con bloqueos mayores al 75%.



**Fig. 8:** Gráfico RPA obtenido en tubos limpiados por chorro de agua sin fase principal – banda de ruido equivalente a bloqueo de 20%; 26% y 11.3 % de tubos con bloqueos mayores al 50% y al 75% correspondientemente.

### Conclusiones

En este trabajo se ha demostrado que la tecnología de RPA puede ser aplicada exitosamente al control de calidad de limpieza de tubos de intercambiadores de calor.

Se nota así mismo, que al aplicar el RPA para el propósito inmediato de control de calidad de limpieza de tubos se obtiene, sin ningún esfuerzo añadido, información adicional al respecto de la integridad de los tubos – existencia de tubos perforados o con pérdida de espesor de pared.

Es evidente también de este experimento, que procesos de limpieza no controlados, pueden sufrir de una gran variabilidad en los niveles de limpieza alcanzados.



**Tabla I:** Resultados de evaluación de condición de limpieza de tubos tras inspección por RPA

Intercambiador	Proceso de limpieza aplicado	Presión <sup>(1)</sup> [KSI]	Tiempo <sup>(1)</sup> [seg/tubo]	Muestra de tubos	Banda de ruido (% bloqueo)	Tubos bloqueados más de 50% (%)	Tubos bloqueados más de 75% (%)
602B	Intercambiador nuevo	--	--	32	< 1	0	0
602A	Sin fase de limpieza principal	--	--	115	20	26	11.3
602A	No controlado	7.5	10	94	25	13.8	3.2
602A	Controlado	7.5	5	53	20	3.8	3.8
602A	Controlado	7.5	20	61	15	3.3	0
602A	Controlado	7.5	30	67	10	3	0
602A	Controlado	10	5	71	12	1.4	0

**NOTA:**

(1) Presión de agua y tiempo aplicados durante la fase principal de limpieza.

Referencias

[1] 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

[2] N. Amir, O. Barzelay, A. Yefet, T. Pechter, “Inspecting U-tube Bundles Using Acoustic Pulse Reflectometry”, Proceedings of ASME Power 2009, Albuquerque, New Mexico

[3] 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.

## **Daniel Bobrow**

El Dr. Daniel Bobrow tiene títulos académicos en Ingeniería Aeronáutica, B.Sc. (1971) del Tejnión – Instituto Tecnológico de Israel, y en Ciencia de Materiales, M.Sc. (1977) del Tejnión y Ph.D (1988) de la Universidad Ben Gurión en el Neguev.

Su carrera profesional se enfocó en los campos de metalurgia, control de calidad e investigación de fallas, en: la Fuerza Aérea Israelí (Laboratorio Central de Materiales), Israel Aerospace Industry (refacción de Motores de Turbina de Aviación), Elbit Systems (Aviones sin Piloto), Ormat Technologies (fabricación de Intercambiadores de Calor y Turbinas Eléctricas y Erección y Operación de Plantas de Energía Eléctrica Geotérmica).

Profesó como docente externo en el área de Control de Calidad, en el Jerusalem College of Engineering y Afeka Tel Aviv Academic College of Engineering.

Desde el año 2009 en AcousticEye – Sistemas de Reflectometría de Pulso Acústico (RPA).

## **Datos de contacto**

Teléfonos:

Residencia: +972-97464548  
Oficina: +972-37586506  
Celular: +972-50-6618718

Dirección:

Residencia: 2 Itamar Ben-Avi St., Kfar Saba 44406, Israel  
Oficina: 4 Harechev, P.O. Box 52489, Tel Aviv 67771, Israel  
E-mail: [daniel.bobrow@acousticeye.com](mailto:daniel.bobrow@acousticeye.com)

## **Noam Amir**

El Dr. Noam Amir recibió el título de Doctor en Ciencias del Technion, Israel Institute of Technology, en 1993, donde estudio la aplicación de la Reflectometría de Pulso Acústico para la reconstrucción del diámetro interno de tubos con sección variable.

Tras un postdoctorado en el Laboratoire d'Acoustique in Le Mans, Francia, sirvió como miembro del profesorado del Holon Institute of Technology por 6 años y ahora en la Universidad de Tel Aviv.

## **Datos de contacto**

Teléfonos:

Residencia: +972- 8940 2616

Oficina: +972-37586511

Celular: +972- 50 400 3992

Dirección:

Residencia: 18 Zahal St.. Nes Tziona, Israel

Oficina: 4 Harechev, P.O. Box 52489, Tel Aviv 67771, Israel

E-mail: noam@acousticeye.com