

RESUMEN

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es estudiar la fiabilidad del uso de las Emisiones Acústicas (EA) en la detección de fugas en los tubos de amortiguadores tras su soldadura, para reemplazar la actual técnica de burbujas utilizada en producción.

Estos tubos fueron presurizados y posteriormente analizados con el sistema de EA Vallen Visual AMSY4. Los ensayos que fueron llevados a cabo en aire con EA mostraron una baja fiabilidad debido al elevado ruido ambiental, que ocultaba el sonido de la fuga tratada. Para evitar esta situación, fue utilizado un nivel umbral variable de frecuencias y diversas técnicas de filtrado. Gracias a la energía, la amplitud, los golpes, el RMS y la información de las gráficas de frecuencia, los ensayos realizados en agua en un ambiente de laboratorio, proporcionaron unos porcentajes de fiabilidad superiores a los obtenidos anteriormente en aire. Sin embargo, los ensayos llevados a cabo en agua en un ambiente de producción no fueron lo suficientemente fiables, debido a la imposibilidad de distinguir entre las fugas y el ruido ambiental.

Introducción general

La detección, localización y discriminación de los defectos y su crecimiento es de gran importancia en la actualidad, no solo para evitar fallos inesperados durante el servicio, sino también por razones económicas. El concepto de defecto no está estandarizado, y depende de la calidad y funcionalidad, la cual puede ser diferente para cada situación. Los métodos de los ensayos no destructivos (END) no necesitan inhabilitar o sacrificar el sistema a analizar, y por tanto son técnicas altamente valoradas, que permiten tanto ahorrar dinero como tiempo en la evaluación del producto, resolución de problemas e investigación. Las Emisiones Acústicas es uno de estos métodos.

En este Proyecto Fin de Carrera, la fiabilidad del uso de EA para la detección de fugas en tubos de amortiguadores será investigada. La aplicación industrial de esta técnica ofrece numerosas ventajas: Permite testear grandes áreas, realizar ensayos en servicio virtuales, advierte de forma temprana y localiza el defecto. Estas características hacen de las EA una técnica útil para un entorno de producción.

Esta investigación será realizada para Tenneco Europe, compañía del sector de la automoción que se encarga de la producción de estos amortiguadores. Durante el proceso de producción, en la fase de soldadura de los tubos, se pueden producir ciertas grietas que den paso a indeseadas fugas. Actualmente, para detectar fugas en los tubos se utiliza la técnica de las burbujas. Esta técnica consiste en presurizar y a continuación sumergir la pieza estudiada en agua, para detectar visualmente la formación de burbujas por parte de un operario, lo cual es señal inequívoca de un tubo dañado. La necesidad y la búsqueda de Tenneco Europe por una técnica mejor a la actual, radica en la baja fiabilidad de la misma y al elevado coste que supone la presencia de un operario para el chequeo visual de cada tubo. Además, sería una buena forma de reducir el tiempo de ciclo, ya que la prueba de fuga tiene una gran importancia en el tiempo de producción total de cada tubo. Por ello, Tenneco Europe solicitó comprobar la fiabilidad de las EA, ya que podría resultar ser una técnica mejor.

Perspectiva general sobre la detección de fugas

Los ensayos no destructivos [END] se refieren a aquellos métodos usados para examinar o inspeccionar una pieza, un material o un sistema sin dañar su futura utilidad. Como el sistema físico no resulta dañado, estos métodos son especialmente valorados debido al tiempo y dinero que ahorran. Los END son usados para la inspección en servicio y para monitorizar operaciones de planta. Pueden ser aplicados sobre pequeños o grandes componentes y para la medición de propiedades físicas tales como la dureza, el módulo de elasticidad y la tensión interna. El sujeto de los END no tiene fronteras claramente definidas, y varía entre diferentes técnicas, como la inspección visual de superficies, la radiografía, los test de ultrasonido, etc. Por otra parte, los END pueden ser adaptados a procesos de producción automatizados así como la inspección de áreas problemáticas localizadas.

Los ensayos de fugas son considerados END. Éstos se utilizan para la detección y localización de fugas, y también para medir la cantidad fugada de un sistema a otro (presurizada o evaporada). Sin embargo, estas técnicas no pueden detectar todas las anomalías de un material, y por ello, se apoyan en otros métodos no destructivos para completar la evaluación.

Cuando se utiliza la palabra “fuga”, se refiere a un agujero, una grieta, una hendidura, o una fisura o un conducto que admite agua, aire u otros fluidos, o permite que el fluido escape al exterior. De todos modos, la palabra “fuga” no se refiere a la cantidad de fluido pasante a través del agujero. La “fuga” depende de la naturaleza del fluido que fluye a través de la grieta, geometría de la misma y condiciones del fluido: presión y temperatura.

- Técnica de las burbujas

Este es el método utilizado actualmente por Tenneco Europe, en el cual primero se presuriza el elemento en el que se desea estudiar la existencia de fugas, para crear una diferencia de presiones entre la pieza y el medio líquido. A continuación se escoge la parte a examinar de la pieza, y se sumerge en el medio líquido sin crear turbulencias en el recipiente. En el caso de existir una fuga, se produciría una corriente de burbujas procedentes del punto exacto de fuga, que se detectarían de forma fácil y segura. Un mayor tiempo se requiere para detectar la existencia de grietas de pequeño tamaño, cuyas burbujas se forman lentamente. Para favorecer la creación de burbujas, hay que escoger una presión alta, aproximada al valor límite que soporta el material, para que no dañe la pieza o agrande la grieta del mismo y a la vez permita la formación de burbujas de mayor tamaño. En algunas ocasiones, una vez sumergida la pieza, es necesario mover o rotar la misma lentamente, para evitar puntos de colapso que se producen en las grietas, que no permiten el flujo de burbujas. Especial cuidado requiere la elección del medio líquido en el cual se sumerge la pieza. Tensiones superficiales del líquido altas pueden restringir la formación de burbujas. Cuanto más estable se desarrollen las burbujas, más fácilmente son observadas. Es posible cambiar la sensibilidad del test

cambiando o el gas que deja el rastro de las burbujas o el líquido de inmersión. Es deseable utilizar un líquido con una baja tensión superficial y una baja viscosidad. La presión diferencial actuando a través de la fuga debe ser más elevada para la detección de fugas de capilaridad de pequeño diámetro. Existen tres opciones comunes: inmersión en baños de agua, inmersión en baños de aceite e inmersión en alcohol. Además, el uso de una baja viscosidad y un bajo peso molecular del gas que produce las burbujas incrementa el índice de fluidez del gas.

Ésta es conocida como la técnica de inmersión líquida, donde las burbujas se forman y se elevan hacia la superficie tras la inmersión. Sin embargo, existen más tipos de técnicas de burbujas, como la aplicación de una película líquida o la aplicación de jabón sobre el objeto de estudio.

- Técnica de las Emisiones Acústicas

La Emisión Acústica es la técnica utilizada, y se define como la energía emitida en forma de vibraciones mecánicas a alta frecuencia como resultado de un cambio repentino en el campo de tensión/deformación en la mayoría de las estructuras. Esto se debe normalmente a un fenómeno producido por un defecto relacionado, como puede ser un agrietamiento o una deformación plástica. Este método que se estudia en el siguiente PFC, puede ser aplicado en la detección y localización de fugas en sistemas presurizados. Se basa en la captación y conversión de ondas elásticas de alta frecuencia, emanadas de una fuente (foco de fuga), en señales eléctricas. Las medidas son llevadas a cabo a través de sensores piezoeléctricos adheridos a la superficie de la estructura bajo test. La estructura tiene que ser cargada (de forma mecánica o térmica) para crear una emisión acústica. El sensor piezoeléctrico de salida es amplificado a través de un preamplificador, filtrado para eliminar cualquier ruido del entorno, y finalmente procesado por la Unidad Central de Procesamiento del equipo de Emisiones Acústicas. Esta técnica puede predecir de forma preventiva fallos en la estructura como lo hace un método no destructivo. Además, toda la estructura puede ser monitorizada desde unas pocas ubicaciones mientras está trabajando, lo cual supone una gran ventaja.

Fase experimental

A la hora de realizar el estudio se utilizaron conceptos importantes que conviene definir para poder interpretar los datos del test.

Existen dos tipos de emisiones: *señales continuas* o *señales pico*. La amplitud de las mismas depende de la carga aplicada. Las señales pico son pequeños pulsos que están relacionados con la liberación de energía puntual. En metales como los tubos de acero del estudio, estas señales están asociadas al desarrollo de grietas.

La *amplitud*, medida en dB, determina la fuerza de la señal. El *tiempo de subida*, tiempo que tarda la señal en cruzar el umbral de frecuencia marcado y el pico máximo de la señal. El *recuento*, número de pulsos que superan el umbral, un *golpe* puede producir uno o varios recuentos. La *frecuencia umbral*, que sirve para filtrar la señal capturada. El análisis de la actividad de EA puede contar el número de golpes registrados por unidad de tiempo. Estos golpes son acumulados y relacionados con el grado de daño de la muestra. Por ello, es importante medir el total de tiempo mientras que la señal está sobre el umbral de frecuencia. Durante este tiempo, se puede medir las veces en las que la onda de la señal cruza el umbral. Las amplitudes más altas o los picos de una señal también dan información del daño. El tiempo desde el inicio de la señal hasta este pico es llamado *tiempo de crecimiento*.

El *análisis de la energía* es de gran utilidad, ya que se puede determinar la energía de la emisión. La medición de la energía en una señal por medios de procesamiento electrónico como el utilizado en estos ensayos es sencilla. La señal de la tensión primero es cuadrada, y luego el área bajo la curva de la tensión cuadrada en función del tiempo es medida. Esta área es proporcional a la energía de la señal, siendo la ganancia del amplificador y la impedancia de entrada las constantes de proporcionalidad. La ventaja del análisis mediante la energía es la posibilidad de relacionarlo directamente con importantes parámetros físicos, como la energía mecánica en el momento de emisión o el índice de deformación. Además mejoran la medición de emisiones acústicas cuando la amplitud de la señal de estas emisiones es baja, como en el caso de emisiones continuas. La energía es sensible a las diferencias en la forma de la onda, como en los casos del estudio en los que la frecuencia variaba.

Otra aproximación para la determinación de la energía de la señal capturada, es mediante el valor de la raíz cuadrática media (*RMS*) de la amplitud. Para una señal continua, como la de una fuga, con amplitud constante, el índice de energía es proporcional al RMS. El ruido ambiental posee un valor RMS constante y cualquier variación por encima de ese valor indicará emisiones producidas en la muestra.

El *análisis de la frecuencia* normalmente es llevado a cabo para identificar fuentes de picos de emisiones acústicas o cuando las señales son de tipo continua como esas que se producen en la detección de fugas, que se producen por el sonido causado al transcurrir el fluido por la grieta o por la liberación continua de burbujas.

Ensayos realizados en aire.

Lo primero que se hizo fue analizar los tubos de acero con una máquina de inspección de rayos-X con tomografía computarizada, con el fin de comprobar los fallos que poseían las muestras que Tenneco entregó para realizar el estudio. Sin embargo, este sistema no permitió detectar fallo alguno debido a la elevada cantidad de hierro existente en el área de soldadura, área en la cual centramos el estudio.

Tras esto se llevaron a cabo diversas mediciones presurizando los tubos a altas presiones. En primer lugar se tomaron medidas con los tubos conectados a la fuente de bombeo, pero debido a la gran cantidad de eventos registrados, se desconectaron los tubos del sistema y se midieron de forma independiente. No se consiguieron mejor resultados, y resultó complicado diferenciar entre los tubos dañados y los correctos, atendiendo a valores como RMS, energía, eventos producidos en frecuencias determinadas, etc. Por consiguiente, se tomó especial cuidado en la selección de los sensores, y se fijaron recipientes y elementos de sujeción adecuados para obtener una medición fiable exenta de ruidos y registros indeseados no relacionados con el flujo de aire a través de las grietas. Estos primeros ensayos fueron realizados en un laboratorio que no estaba insonorizado. La fijación de la frecuencia umbral requería una atención especial, debido a la importancia que tenía para filtrar el ruido ambiental. Para ello se realizó el estudio de Hsu-Nielsen que consiste en simular una emisión acústica fracturando una mina de grafito sobre la muestra. Esto genera una señal acústica intensa, bastante similar al de una fuente natural de EA que el sensor detecta como un fuerte pico. El propósito de este test era doble. Primero, asegurar que los sensores estaban bien acoplados y funcionaban de forma coherente con la señal monitorizada. Segundo, comprobar la exactitud del montaje con respecto a la localización de la fuente. Esta última propuesta abarcaba indirectamente la determinación del valor actual de la velocidad de onda acústica del objeto monitorizado.

Finalmente, se obtuvo la conclusión de que el uso de EA para medir los valores de RMS para detectar fugas fue inútil, debido a la falta de diferencia entre los tubos dañados y los buenos. El análisis hecho con respecto a liberación de energía carecía de sentido. Se pudo apreciar que las ondas del ruido y las ondas de los escapes eran ambas señales continuas. Se situó el ruido en un rango de frecuencia inferior al rango de frecuencias del sonido a través de la fuga, que era distinto. Sin embargo, estas magnitudes no eran estables, y la amplitud de ambas señales era similar.

Ensayos realizados en agua en un entorno de laboratorio.

Los resultados obtenidos en aire no fueron prometedores, por lo que se tomó la decisión de realizar ensayos presurizando los tubos y sumergiéndolos en agua. Este método era similar al ya utilizado por la empresa en su chequeo rutinario. La diferencia procedía en la forma de detección, ya que se pasaría de una detección visual de las burbujas a una detección a través del sonido que generan. El objetivo de esto era evitar tener a una persona física pendiente del chequeo de los tubos, y conseguir de forma fiable un patrón de datos que significara que el tubo estaba dañado, lo cual permitiría retirar estos tubos

de producción de forma automática, ahorrando costes y tiempo. Por tanto, en los ensayos realizados posteriormente, se pretendió definir una serie de datos característicos en relación con la energía liberada, la frecuencia del sonido captado, su amplitud, el RMS, etc. de un tubo que estuviera dañado.

Se estudió el comportamiento de una sola burbuja aislada en relación con los parámetros recién nombrados, y se realizaron test para seleccionar el sensor más adecuado. Además, se diseñó un recipiente especial para introducir los tubos en él y asegurar un acoplamiento idóneo entre sensor y tubo.

Los ensayos centrados en la frecuencia del sonido capturado resultaron poco fiables. Debido a la dificultad de fijar un umbral de frecuencias que filtrara el sonido del ruido, se consideró el estudio de la frecuencia, por el momento, de escasa utilidad en la detección de fugas en un ambiente de producción. Por lo que los ensayos se centraron en la liberación de energía de los tubos, y se llegó a la conclusión de que la energía era un parámetro fiable y sencillo de analizar.

Ensayos realizados en agua en un entorno de producción.

Después de estos test, se decidió probar en el ambiente de la fábrica de St. Truiden donde trabaja Tenneco, para poder comparar con los resultados obtenidos en el laboratorio.

En primer lugar se tomaron medidas utilizando el prototipo de recipiente que se había diseñado para introducir los tubos. Y a continuación, se realizaron las mismas medidas acoplando los sensores a los equipos de detección utilizados por Tenneco para la detección de fugas.

Se obtuvieron multitud de datos relacionados con los golpes detectados (emisión de burbujas), las amplitudes y frecuencias registradas, y la energía liberada. La mayor parte de las veces el sonido de las burbujas se situaba a altas frecuencias mientras que el ruido de la fábrica se situaba a bajas. Sorprendentemente, el parámetro de la energía que hasta el momento resultó ser el más eficiente, mostró poca claridad, y no permitía distinguir los distintos casos.

Todos estos datos necesitaron un tiempo muy superior a los 6-12 segundos que requiere el método visual de las burbujas. Esto se debe a que los datos tardan en estabilizarse, y en muchas ocasiones necesitan ser analizados e interpretados, lo cual dificulta una posible aplicación a nivel industrial.

Modificaciones y alternativas

Gracias a la opinión de un ingeniero de Vallen Systeme Company con larga experiencia en EA, ha sido posible trazar una nueva línea de investigación futura. Una alternativa y posiblemente mejor camino podrá ser presurizar los tubos con agua en lugar de aire. Esto producirá turbulencias más fuertes. Usando este sistema, el sonido de la fuga se incrementaría, y por tanto, sería más fácil detectarla y distinguirla del ruido de fondo. Con el mismo objetivo de incrementar la turbulencia por todo el escape, la presión debería ser la máxima posible sin causar más daños al tubo.

Sumergir los tubos en agua ya no sería necesario y los test se realizarían en aire. El medio de propagación en sí mismo no cambiaría, porque el sensor continuaría adherido al tubo, de modo que la onda sería transmitida a través del sólido. La única cosa que cambiaría sería la forma en que el sonido es generado. También es posible incrementar el rango de frecuencias del sensor, por lo que la mayoría del ruido de fondo sería evitado, porque el sensor VS30-V es muy sensible y recoge todos los sonidos por debajo de 100 kHz, sin embargo, la frecuencia exacta del sonido de las fugas debe ser investigada en el futuro.

Otro método alternativo ha sido propuesto para solucionar el problema de la detección de fugas en un ambiente de producción, después de contactar con otro experto en la materia. Éste se basa en un método de caída de presión. Tres posibilidades son numeradas:

1. Variación de la presión de la cámara: El tubo es llenado hasta la presión del test después de ser soldado, y a continuación es situado dentro de una cámara que le rodea completamente. Si hay un incremento de la presión en el interior de la cámara significaría que existe una fuga en el tubo.
2. Caída de la presión absoluta: El tubo es llenado con aire hasta una cierta presión. Esta fase de llenado es seguida por una fase de estabilización de la presión del interior de la pieza. Durante la medida de la fuga, la caída de presión es medida con relación al final de la fase de estabilización. Una fuga reduce la presión interior de una pieza de forma inversamente proporcional al volumen; como consecuencia, cuanto mayor es el volumen, más tiempo será requerido para medir una caída de presión relevante.
3. Caída de presión diferencial: El test es llevado a cabo por comparación entre un tubo en buen estado usado como referencia y el tubo a ser probado. Ambas piezas se llenan a la misma presión, y se espera hasta que se estabilicen las presiones. La medición de la fuga será la diferencia entre ambos tubos. Es preferible usar como tubo maestro uno del mismo volumen y con las mismas características que el tubo a ser probado. También el uso de un sensor de presión diferencial permite incrementar

la resolución de las medidas de presión entre los dos tubos. El resultado es que, si la pieza del test tiene una fuga, será posible medirla mejor y en menor tiempo.

Estos métodos en producción podrían ser fiables y baratos, aunque la mayor desventaja sería el tiempo de ejecución, que llevaría mucho tiempo. Éste se incrementaría hasta los 15-20 segundos por tubo aproximadamente, mientras que el método de las burbujas lo hace entre 6 y 12 segundos.

Conclusiones

Tras todos los test realizados, algunas conclusiones generales pueden ser formuladas sobre la técnica de EA.

Los test llevados a cabo con EA en aire muestran una baja fiabilidad. El sonido producido por el aire a través de la grieta es tapado tras el ruido de fondo existente. Aunque es prácticamente imposible fijar un umbral en el cual solamente quede registrado el sonido de la fuga, un montaje adecuado es fundamental para tomar las medidas: un umbral demasiado alto evita captar el ruido ambiental pero a la vez evita medir el sonido de la fuga. Por el contrario, un umbral demasiado bajo recogería todos los sonidos existentes. El conocimiento de la oscilación típica de las frecuencias existentes ayuda a filtrar la señal, usando el paquete software de Vallen.

El ruido de fondo generalmente oscila a bajas frecuencias entre 5 y 25 kHz, aunque depende del tipo de ruido que sea producido en las cercanías del sensor podría alcanzar los 50 kHz. La frecuencia del aire fluyendo a través de la grieta se sitúa en torno a los 50 kHz, por lo que no hay garantía de una completa filtración del ruido ya que el sonido de la fuga y el ruido de fondo se pueden superponer. Un sensor de bajas frecuencias es el más idóneo para detectar ambos, ruido y sonido deseado (30 – 100 kHz).

A pesar del ruido, los test realizados en agua en el laboratorio usando el sonido de las burbujas, proporcionan resultados más prometedores que los realizados en aire, con una fiabilidad del 87,5%. Sin embargo, no es así para aquellos test realizados en un entorno de producción, donde no siempre se distingue entre un tubo dañado y un tubo bueno.

Como otro inconveniente, el método de las EA requiere también un tiempo mayor para la realización del test que el actual método visual, debido a que es necesario esperar hasta que los datos son estabilizados, analizados e interpretados (como pasa cuando se mide centrándose en la Energía, el RMS o los golpes).

Por lo tanto, debido a esto y al no aportar datos más fiables que el método visual actual, la fiabilidad y la aplicación industrial del uso de las Emisiones Acústicas para la detección de fugas en tubos para amortiguadores es aún cuestionable. Los cambios y alternativas propuestas podrían ayudar a conseguir un mejor resultado en el desarrollo de esta técnica y abrir un nuevo camino de estudio para una futura investigación en el ámbito de la detección de fugas en entornos de producción.

La fiabilidad y utilidad de tal método en otros componentes está ya absolutamente reconocida, y multinacionales, tales como Bosch, realizan miles de pruebas para chequear la existencia de fugas en los airbags que producen en sus fábricas.