

Desafíos para el mantenimiento en la modernización de sistemas de instrumentación y control

V. Rojas

La modernización de los sistemas de instrumentación y control de las centrales nucleares trae consigo una serie de desafíos para el personal de mantenimiento de las mismas. Es importante contar con un plan de modernización a largo plazo, que se derive de estudios específicos para cada sistema. La formación, los repuestos, el control de configuración y la ciberseguridad son alguno de los puntos críticos a tener en cuenta desde el principio de estos proyectos. El mantenimiento de los nuevos sistemas puede requerir un nuevo enfoque que se adecúe al tipo de tecnología. Las FPGA (Field Programmable Gate Array) se vislumbran como la alternativa de futuro, sobre todo en sistemas de seguridad.

Instrumentation and control system upgrades in nuclear power plants come with some challenges for their maintenance staff. It is important to have a long term modernization plan that derives from specific studies for each system. Training, spares, configuration control and cybersecurity are critical topics to take into account from the beginning of these projects. New system maintenance plans can require a new approach in accordance with the technology. FPGAs (Field Programmable Gate Array) appear as the alternative for the future, mainly in safety systems.

Las centrales nucleares, tanto a nivel internacional, como en el caso de las centrales nucleares españolas en particular, están actualizando en los últimos tiempos muchos de sus sistemas de instrumentación y control. Este cambio viene inducido, en parte por la conveniencia de su actualización tecnológica, y en parte de forma obligada por el envejecimiento y la obsolescencia de los sistemas originales. Sea por uno u otro motivo, lo cierto es que el escenario actual plantea una serie de desafíos para los equipos de mantenimiento de dichas centrales, que básicamente se ven abocados a mantener una enorme variedad de tecnologías, desde sistemas de control neumáticos, pasando por sistemas analógicos, lógicas cableadas con relés o de estado sólido, hasta las últimas tecnologías basadas en sistemas digitales, como DCS o PLC/PAC.

Todo lo anterior debe tener su reflejo en el plan de formación, en el que deben tener cabida tanto los necesarios reentrenamientos para mantener las cualificaciones y conocimientos, y más aún tras la edición de la IS-12, como la formación inicial en los nuevos sistemas que se implantan, que en muchos casos requieren unos conocimientos de base previos que tampoco se tienen.

El establecimiento de unos adecuados niveles de stock para los repuestos de los diferentes sistemas es también un punto crítico; en los sistemas originales por la obsolescencia de los mismos que, junto al envejecimiento, que incrementa la tasa de fallos, puede conducir a la incapacidad de mantener los sistemas, mientras que en los modernos sistemas digitales, a pesar de suponer en un principio una reducción de los niveles de stocks necesarios, por ser plataformas tecnológicas a las que se van incorporando los sistemas que se modernizan, por otro lado, y debido al empleo masivo de productos comerciales (Commercial Off The Shelf, o COTS), fundamentalmente del mercado de las tecnologías de la información o IT (Information Technologies), se hace necesario un acopio masivo de repuestos de este tipo de equipos desde el primer momento. Obviamente, el coste de inmovilizado se reduce de forma proporcional a medida que la plataforma digital va creciendo, incorporándose a la misma más y más sistemas.

Otro de los retos derivados del empleo de tecnologías digitales es la documentación de los sistemas. El sector nuclear está acostumbrado a los antiguos manuales de sistemas que incorporaban toda la información,



VÍCTOR ROJAS MORENO

es ingeniero industrial por la Universidad de Extremadura. Máster en tecnologías de generación de energía eléctrica. Desde 2006 jefe de Instrumentación y Control de CN Almaraz.

desde descripciones funcionales, de componentes, diagnóstico de averías, recomendaciones de mantenimiento, planos y diagramas, listados de piezas y componentes, etc. Sin embargo, los nuevos sistemas, siendo en muchos casos sistemas comerciales de propósito general, carecen de muchos de estos elementos. Sólo en el caso de sistemas cualificados se cubren de forma adecuada los estándares anteriores. Ni siquiera los sistemas de seguridad basados en equipos o plataformas dedicadas cubren las expectativas típicas de la industria nuclear.

El control de configuración es otro de los puntos de debate. ¿Cómo recoger, y de qué forma, cuando estamos sumamente acostumbrados a la documentación en papel, y no a bases de datos, archivos de configuración, etc., todos los detalles de configuración del sistema? ¿Hasta qué punto debe un determinado cambio ser tratado a través de un proceso de modificación sujeto a la IS-21? Y para complicar aún más la situación, es necesario añadir los adecuados criterios de confidencialidad derivados de una apropiada implantación de un programa de ciberseguridad, sobre todo en lo referente a los equipos y herramientas especialmente dedicados a proteger el sistema de ciberataques.

La ciberseguridad es, obviamente, otro de los grandes caballos de batalla de estos nuevos sistemas, sobre todo para aquellos importantes para la seguridad, pero también para los importantes para la producción. Cualquier programa de ciberseguri-

dad es reactivo, nunca proactivo. Sólo el completo aislamiento (con empleo de conexiones unidireccionales realmente fiables, si fuese necesario, lo cual sólo el posible a través de diodos de datos), junto con una adecuada política interna de ciberseguridad, incluyendo el bastionado de estaciones, tanto físico como lógico, que evite el ataque desde dentro (*insiders*), ya sea de forma intencionada o no, puede considerarse la mejor estrategia. Ni siquiera el empleo de tecnologías de listas blancas (*whitelisting*) es completamente efectivo, como se ha demostrado en más de una ocasión. No obstante lo anterior, la implementación de *software* y *appliances anti-malware*, ya sean *firewalls*, IPS/IDS (*Intrusion Protection/Detection System*), antivirus, etc., ayuda en la monitorización y hasta cierto punto en la protección (reactiva) *on line* del sistema.

El desarrollo de los planes de mantenimiento de los sistemas digitales requiere de un nuevo enfoque, en ocasiones bastante diferente de los sistemas tradicionales. A pesar de que hay estudios que demuestran que la mayoría de los fallos son de tipo *hardware*, y que los enfoques tradicionales son medianamente válidos precisamente debido a este hecho, un buen plan de mantenimiento requiere otro tipo de consideraciones, como tareas periódicas de actualización, tanto de sistemas operativos como de *software* de aplicación, así como de *hotfixes* para dispositivos de red o actualizaciones de los sistemas de prevención de *malware*, *backups* periódicos y procedimientos de recuperación ante desastres, etc. Nuevamente, los cortos ciclos de vida juegan en contra. Incluso el sistema operativo más longevo, Windows XP, dejará en abril de este año de ser soportado, tras 13 años desde su lanzamiento. EPRI (*Electric Power Research Institute*) tiene buenas referencias en este sentido (TR-3002000502, TR-1022713 o TR-1008124).

La virtualización es una alternativa interesante de cara a mejorar las dependencias de los ciclos de vida tan cortos del equipamiento comercial, principalmente empleado en estaciones de operación e ingeniería. No obstante, a día de hoy, pocos suministradores de sistemas de control de procesos soportan este tipo de tecnología, y en cualquier caso, los *hypervisors* no dejan de correr sobre sistemas operativos que deben ser actualizados y protegidos.

Una alternativa que está cobrando bastantes adeptos es el empleo de tecnologías basadas en FPGA (*Field Pro-*



grammable Gate Array). Las FPGA, y su predecesores, como las CPLD (*Complex Programmable Logic Devices*) o las PAL (*Programmable Array Logic*), se utilizan desde hace tiempo, pero para realización de tareas muy concretas y simples como subcomponentes. El giro actual supone el empleo de esta tecnología como el núcleo del sistema. No obstante, para sacar verdadero provecho de las ventajas que ofrece, la implementación debe ser del tipo *pure hardware logic*, es decir, sin ningún tipo de sistema operativo ni *software* embebido corriendo en tiempo real. En este sentido, es importante recordar que un buen diseño pasa por un sistema cuya capacidad sea acorde con la complejidad del proceso a controlar o proteger. Precisamente éste es el problema del empleo de tecnologías digitales de propósito general en sistemas de seguridad. Aunque las FPGA se programan a través de entornos de desarrollo *software*, el tipo de implementación antes mencionado es puramente *hardware*, por lo que sus ventajas son claras en cuanto al control de configuración, la ciberseguridad y el proceso de licenciamiento, no requiriendo, en principio, sistemas de actuación diversa, ya que presentan un adecuado nivel de diversidad y defensa en profundidad (D&DiD), y pueden ser probadas prácticamente al 100 %. Sólo para sistemas de no seguridad, o funciones auxiliares totalmente aisladas en el caso de sistemas de seguridad, sería permisible el desarrollo de funciones más complejas mediante el empleo o desarrollo de IP (*Intellectual Property*) *cores*. El empleo de lenguajes estándares facilita la portabilidad del diseño a futuras tecnologías del mismo tipo, de forma sencilla, y la existencia de empresas con contratos de suministro a largo plazo con los sectores aeroespaciales

y de defensa de muchos países asegura el suministro a largo plazo.

Los planes de renovación de sistemas de instrumentación deben derivarse de exhaustivos estudios de mantenibilidad de los sistemas, que incluyan estudios de obsolescencias, repuestos existentes y su estado, envejecimientos, tasas de fallos, fiabilidad y puntos simples de vulnerabilidad, impacto en la seguridad y la producción, experiencia operativa y recomendaciones del suministrador y la industria, costes de mantenimiento, opciones de modernización y mejoras tecnológicas que introducirían, la mayor integración de sistemas, etc., así como sus inconvenientes, de manera que sea consistente y que tenga en cuenta que la modernización no es la única opción existente, así como las capacidades de la organización, no sólo económicas, sino de asunción del personal de explotación de dichos sistemas, tanto en la operación como en el mantenimiento, y el impacto en las paradas de recarga, por lo que una implementación por fases parece en principio la mejor alternativa, y la experiencia de proyectos como TWICE, en Ringhals, así lo ha demostrado.

En conclusión, cualquier planta debe contar con un plan de instrumentación y control a largo plazo que permita la programación de los recursos necesarios para llevarlo a cabo, valorando las mejoras en la seguridad y el medioambiente, así como el coste-beneficio. El acopio de repuestos, la formación y entrenamiento y la calidad de la documentación, tanto de ingeniería como de operación y mantenimiento, así como los aspectos de ciberseguridad, incluyendo el soporte a largo plazo, son puntos clave que deben tenerse en cuenta desde el primer momento del lanzamiento de un nuevo proyecto de modernización. ■

Método de diagnóstico basado en el análisis de vibraciones y emisión acústica. Monitorización de los diesel de emergencia de CN Garoña

L. Paniagua, M. Muñoz, F. Moreno, J. Arroyo y C. Monné

El técnico de Mantenimiento necesita, cada día más, disponer de herramientas de predictivo para diagnosticar el estado de los equipos, máxime si tienen la "responsabilidad" de los diesel de emergencia en una central nuclear. El uso de estas "herramientas" se debe entender como un complemento a las actividades clásicas de mantenimiento preventivo de estos equipos, consiguiendo así aumentar la disponibilidad de los mismos ya que todos los parámetros necesarios para evaluar el comportamiento del motor, se toman con el motor en funcionamiento.

Asimismo, se facilita la toma de decisiones sobre la conveniencia de realizar determinados trabajos de carácter preventivo

Los fundamentos de la herramienta de diagnóstico que se presenta en este artículo se basan en la lectura, registro y análisis de la presión, vibraciones y emisión acústica en cada cilindro del motor a lo largo de su ciclo operativo.

Un buen complemento a la diagnosis anterior, es realizar una endoscopia de cada cilindro, la cual permitirá ver fugas de agua, fugas de los inyectores, pulverización de cada inyector, fugas de válvulas, etc.

El presente artículo, describe los fundamentos de una herramienta no intrusiva, de fácil uso y bajo coste, utilizada para comprobar el comportamiento de los motores diesel de emergencia, así como la experiencia de su uso en CN St.^a María de Garoña. Al final del artículo se presenta un caso práctico de detección de una avería ocurrido en CN St.^a María de Garoña y que difícilmente hubiera sido posible detectarlo por otros medios.

Esta herramienta se ha desarrollado conjuntamente por el Laboratorio de Motores del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza en colaboración con CN St.^a María de Garoña, ha sido mejorada, ampliada y optimizada durante los más de 10 años que llevamos utilizándola.

Maintenance Technicians, more and more, must dispose of predictive tools to diagnose the state of the equipment, especially if they are responsible for the "emergency diesel" in a Nuclear Power Plant. The use of these "tools" should be understood as a complement to more classic Preventive Maintenance of the equipment, thus increasing their availability because the parameters necessary for evaluating motor behaviour are taken while the engine is in operation.

In this way, it facilitates the decision-making on whether to carry out certain preventive tasks.

The basic information about this diagnostic tool presented in this article is based on the reading, recording and analysis of pressure, vibrations and acoustic emission in each engine cylinder during its operating cycle.

A nice addition to the above diagnosis is carrying out an endoscopy of each cylinder, which enables the observation of: water leaks, injector leaks, the spraying of each injector, valve leaks, ... etc.

This article describes the fundamentals of a non-intrusive, easy to use and low cost tool, used to check the function of Emergency Diesel engines, as well as the experience of its use in the St.^a María de Garoña Nuclear Plant. The article also describes the case of a fault which occurred in the Nuclear Power plant in Garoña that would hardly have been possible to detect by other means.

This tool was developed jointly by the Engines Laboratory of the Department of Mechanical Engineering at the University of Zaragoza and the St.^a María de Garoña Nuclear Plant. It has been further improved, extended and optimized over the more than 10 years of its use.

INTRODUCCIÓN

Los diesel de emergencia son elementos clave para asegurar la estabilidad del núcleo durante una parada imprevista en plantas nucleares [1]. La parada segura de la planta requiere un suministro importante de energía eléctrica. Si en una situación de emergencia la red no

puede suministrar electricidad, los diesel de emergencia deben estar listos para hacerlo [2], disminuyendo así la probabilidad de que se produzcan daños en el núcleo. Es en este contexto donde la diagnosis periódica de los diesel de emergencia junto con un plan de mantenimiento adecuado ase-



LUIS PANIAGUA PLAZA

es ingeniero técnico industrial, especialidad Construcción de Máquinas, por la Universidad de Zaragoza. Ingeniero Internacional de Soldadura, concedido por el Instituto Internacional de Soldadura (IIW). Trabaja en Nuclenor S.A. desde 1985, y actualmente ocupa el puesto de jefe de Mantenimiento Mecánico y Servicios.



MARIANO MUÑOZ RODRÍGUEZ

es ingeniero industrial por la Universidad Politécnica de Cataluña, recibiendo el grado de doctor ingeniero industrial por la Universidad de Zaragoza. Profesor titular en la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza. Departamento de Ingeniería Mecánica (1990). Director del laboratorio de Motores (LAM). <http://www.lam.unizar.es>

F. MORENO

Laboratorio de Motores, Dpto. Ingeniería Mecánica. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de Zaragoza.

J ARROYO

Laboratorio de Motores, Dpto. Ingeniería Mecánica. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de Zaragoza.

C- MONNÉ

Laboratorio de Motores, Dpto. Ingeniería Mecánica. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de Zaragoza.

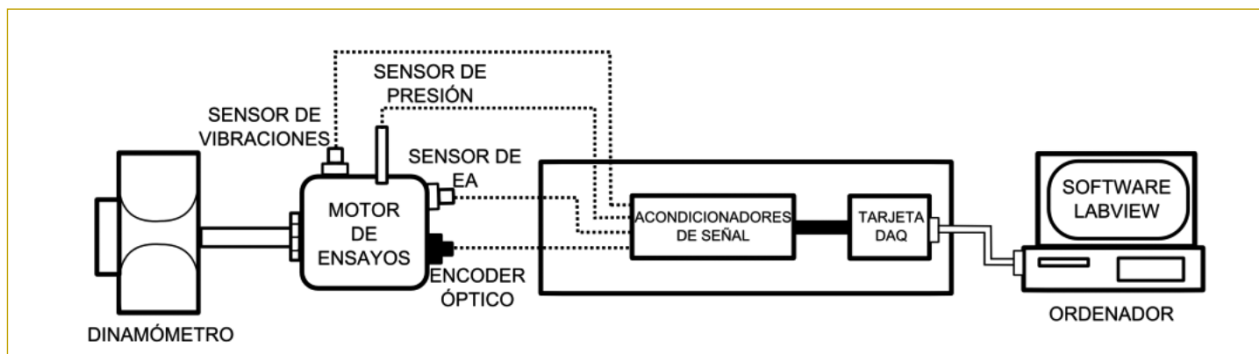


Figura 1. Sistema experimental.

gura su disponibilidad y alto grado de fiabilidad.

Una técnica de diagnóstico de indisputable valor en motores se basa en la correcta medida e interpretación de la presión en cada cilindro a lo largo del ciclo operativo [3-6]. A pesar de las ventajas que reporta conocer la presión en el interior del motor, su medida requiere tener acceso al interior del cilindro en el que se produce la combustión. Es por ello que se están desarrollando nuevas técnicas de diagnóstico menos intrusivas y que también proporcionan información de interés. Dichas técnicas se basan en el análisis de las señales de vibraciones y emisión acústica del motor. Este análisis está basado en el principio de que en un motor existen diferentes fuentes de vibraciones: elementos rotativos, impactos mecánicos, flujos de gases a altas velocidades, etc. Los cambios que se producen en las fuerzas vibratorias o en el estado de los componentes del motor afectarán a los patrones característicos de vibraciones [7]. Por otra parte, el estudio de la emisión acústica es un método fiable para la identificación de cualquier fallo que cause una vibración de alta frecuencia (por encima de 20 kHz). Los métodos basados en el análisis de las vibraciones y emisión acústica (EA) en el dominio temporal ofrecen un gran potencial como técnica de diagnóstico de motores, facilitando la detección de fugas en válvulas [8], cabeceo de pistón [9], fallos de inyección [10], problemas de combustión y detonación [11], defectos mecánicos [12], etc.

El diagnóstico de los diesel de emergencia de una central nuclear requiere un método efectivo, rápido y de bajo coste. Seguidamente se muestra como todo esto se puede conseguir mediante el análisis de la energía las señales de vibración y emisión acústica del motor. El método se basa en comparar la energía de las referidas señales con valores de referencia, lo que facilita determinar si el motor trabaja con fallo [13, 14]. La energía

se obtiene realizando la integral de la Raíz Cuadrática Media (RMS) de la señal en el dominio del tiempo. Esta metodología se ha puesto a punto mediante investigaciones realizadas con motores en banco de pruebas, y finalmente se ha aplicado con éxito en los diesel de emergencia de C N Garoña.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Antes de aplicar el nuevo método de diagnóstico a los diesel de emergencia de plantas nucleares, se han realizado numerosos ensayos en el banco de pruebas del Laboratorio de Motores del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza. De esta manera se han podido determinar las variaciones que se producen en la energía de las señales de vibraciones y EA cuando se modifican diferentes parámetros de trabajo del motor. La Figura 1 muestra a nivel esquemático la instalación experimental. Detalles sobre los sensores utilizados, cadena de medida, proceso de toma de datos, tratamiento de las señales, etc. se pueden encontrar en las referencias [15, 16].

Se ha escogido un motor monocilíndrico para llevar a cabo los ensayos. La utilización de este tipo de motores evita las interferencias de los fenómenos vibratorios de unos cilindros en otros, asegurando que las señales capturadas corresponden únicamente a las del cilindro objeto de estudio.

Una vez que se han adquirido las señales originales de vibraciones y EA en el dominio del tiempo, es necesario tener presente que estas señales tienen cierto carácter de simetría por lo que si se tratan de promediar a lo largo de todos los ciclos adquiridos se perderá parte de la información en ellas contenida. Para evitar esto es necesario calcular la RMS. La RMS incluye los valores absolutos de las componentes positivas y negativas de la señal, por lo que toda la información contenida en la señal original permanece inalterada. Finalmente, es necesario aplicar la integral a la RMS en todo el intervalo

donde ocurre el fenómeno que se quiere analizar. La integral proporciona la energía del suceso.

Cuanto mayor sea la desviación de la energía en el intervalo temporal (o angular) en el que tiene lugar el suceso en estudio (respecto a un valor de referencia), más indica que el motor trabaja en condiciones anómalas debido a la existencia de un fallo. Para profundizar en esta idea se han estudiado numerosos casos en el banco de pruebas de motores, bajo la idea de reproducir algunos de los fallos más característicos que se producen en motores de combustión interna.

- **Motor arrastrado.** El objetivo principal de los tests con motor arrastrado es identificar el comportamiento vibratorio y acústico del motor sin combustión. Esto permite diferenciar la energía asociada al proceso de combustión de la energía relacionada con los procesos mecánicos. Además, arrastrar un motor facilita simular la situación de un motor policilíndrico cuando un cilindro no funciona y es arrastrado por el resto de cilindros.
- **Reglaje de encendido (o inyección).** La modificación del ángulo de ignición (o inyección en un diesel) acarrea modificaciones en la combustión. El análisis de las vibraciones y EA en la zona de combustión permite determinar inadecuados ángulos de ignición (inyección).
- **Segmentos.** Cuando fallan los segmentos se produce un aumento en el *blow-by* y en el guiado del pistón. El método de la energía de las señales de vibraciones y EA también es sensible a este tipo de problemas.
- **Reglaje de apertura/cierre de válvulas.** Para que un motor de combustión interna funcione correctamente es necesario que las válvulas abran y cierren en los instantes adecuados. Cuando se modifican las tolerancias en los mecanismos de apertura y cierre de las válvulas (árbol de levas, empujadores, taqués, etc.), se modifica

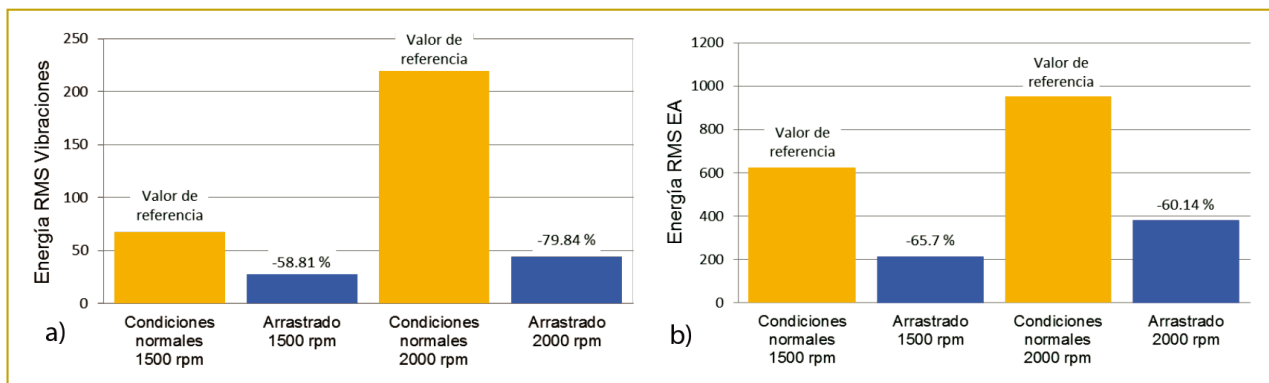


Figura 2. Valores de la energía de las señales de vibraciones a) y emisión acústica b) para el motor ensayado en condiciones normales y sin combustión.

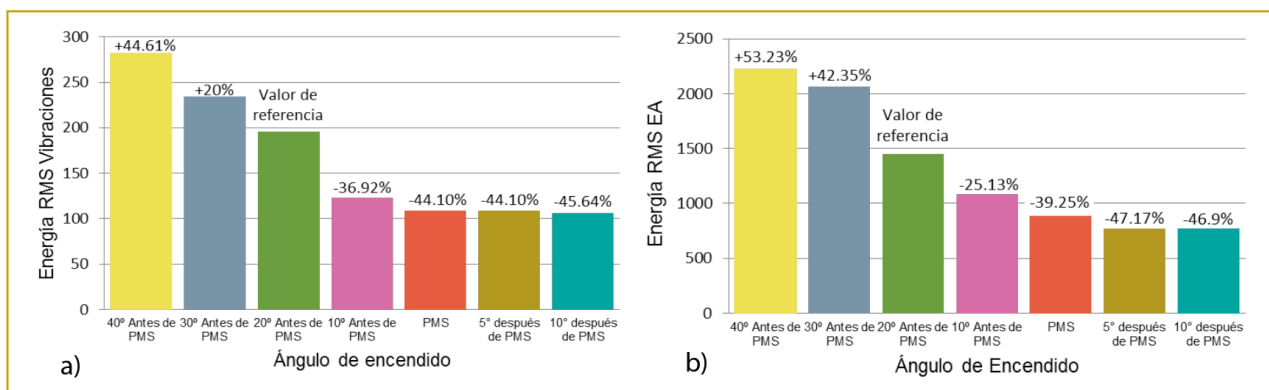


Figura 3. Comparación de la energía de la señal de vibraciones a) y EA b) durante el proceso de combustión con diferentes ángulos de encendido.

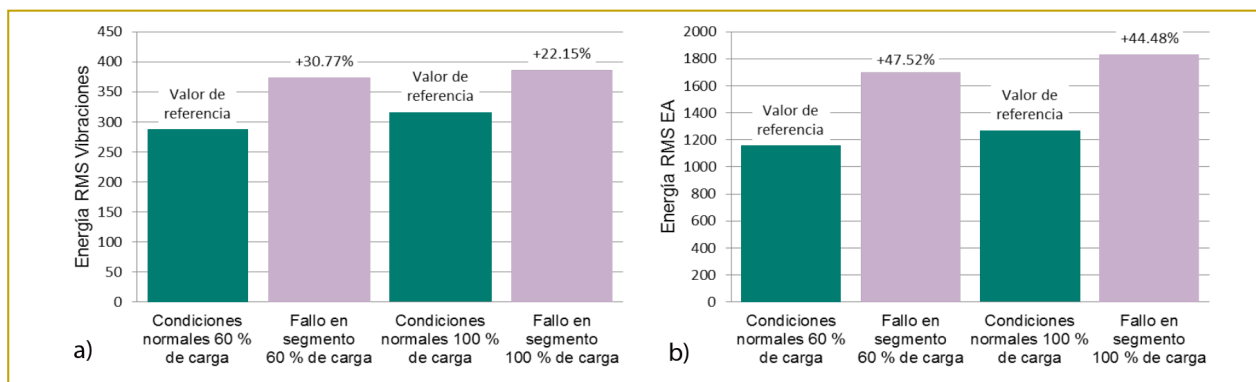


Figura 4. Comparación de la energía de la señal de vibraciones a) y EA b) en la zona de combustión con fallos en los segmentos.

la energía de las señales en estas zonas del ciclo, lo que facilita determinar problemas en los sistemas asociados.

Seguidamente se describen tres casos en los que el motor ha sido forzado a trabajar en condiciones de fallo provocado con el fin de comparar la energía de las señales con la correspondiente a la condición de motor en buen estado. Lógicamente, la energía se ha estudiado en las zonas del ciclo donde se esperan los cambios de interés.

Motor arrastrado

La Figura 2 muestra las diferencias en la energía de las señales de vibra-

ciones y EA en la zona de combustión con motor arrastrado y en condiciones normales. Se han comparado dos velocidades de giro del motor, y la energía de las señales se ha calculado en la zona de combustión en todos los casos. Los resultados muestran una disminución en la energía de la vibración de 58.8 % a 1.500 rpm y de 79.8 % a 2.000 rpm cuando se compara la condición de arrastrado con la de motor normal. La energía de la EA disminuye un 65.7 % y 60.1 %, respectivamente.

En los dos casos considerados, la energía calculada en la zona angular correspondiente a combustión dis-

minuye significativamente cuando el motor ha sido arrastrado respecto al motor con combustión. Por ello, se puede concluir que la energía de las señales vibratorias y de emisión acústica constituye una herramienta efectiva para la detección de fallos de combustión en el motor testado.

Reglaje de ignición

Se ha calculado la energía de las señales en la zona de combustión considerando diferentes ángulos de salto de la chispa y se ha comparado con la energía obtenida para el ángulo de ignición en condiciones de diseño (20° antes del punto muerto superior,

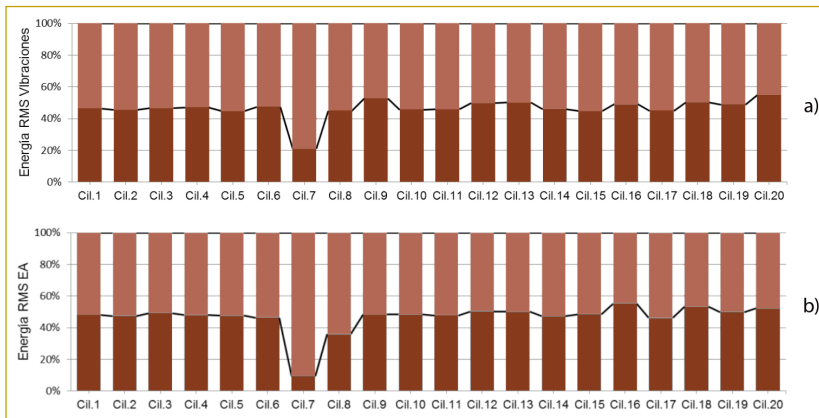


Figura 5. Comparación de la energía de las vibraciones a) y emisión acústica b) para un diesel de emergencia en la zona de combustión.

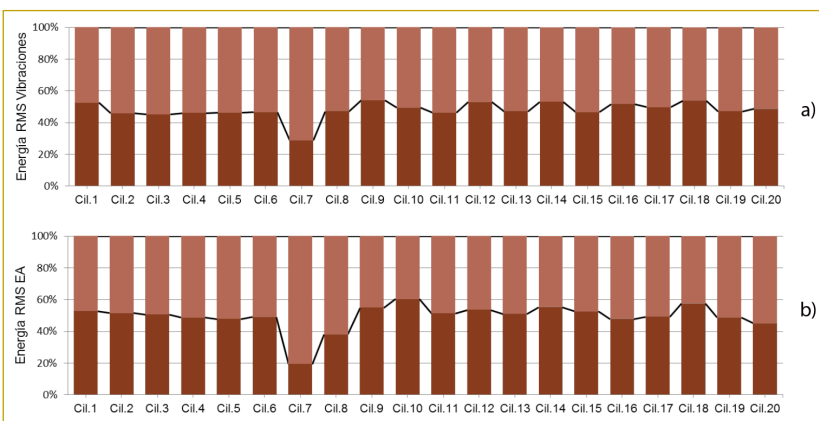


Figura 6. Comparación de la energía de las vibraciones a) y emisión acústica b) para un diesel de emergencia en la zona de inyección.

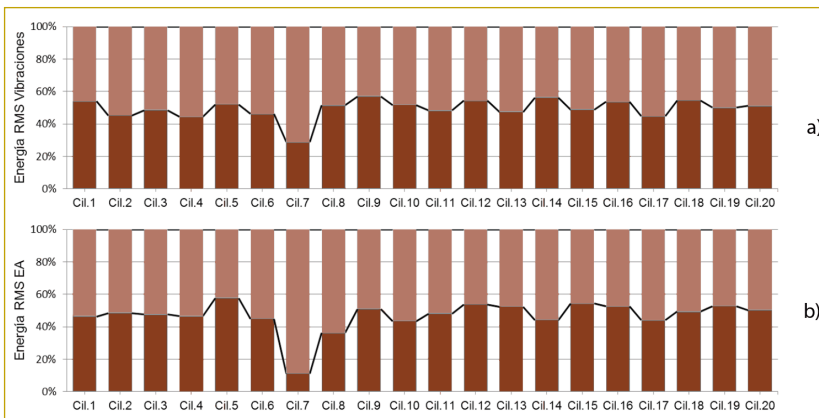


Figura 7. Comparación de la energía de las vibraciones a) y emisión acústica b) para un diesel de emergencia en la zona de apertura de la válvula de escape.

PMS). Como se aprecia en la Figura 3, cuando se retrasa el ángulo de ignición disminuye la energía de la vibración entre 36.9 % y 45.6 % con un retraso máximo del ángulo de ignición de 10° después del PMS. La energía de la EA tiene un comportamiento similar, disminuyendo un 46.9 % cuando la chispa se fija en 10° después de PMS.

Si se adelanta el ángulo de ignición, la energía de la señal vibratoria au-

menta un 20 % (encendido 30° antes del PMS) y un 44.6 % (encendido 40° antes del PMS). La energía de la emisión acústica muestra un incremento de 42.3 % con el encendido 30° antes del PMS y de 53.2 % avanzando el ángulo de ignición a 40° antes del PMS.

Por tanto, la energía de las señales vibratorias y de emisión acústica es sensible a los cambios del reglaje de encendido (o de inyección en los diesel).

Fallos en segmentos

Otro ensayo que se llevó a cabo fue la extracción del segundo segmento de compresión del pistón y el análisis de la energía de las señales en la zona de combustión. Como se aprecia en los resultados de la Figura 4, la energía de la señal de vibraciones aumenta un 30.7 % al 60 % de carga y un 22.1 % a plena carga. La energía de la EA muestra un incremento de 47.5 % y 44.5 %, respectivamente. El incremento en la energía de las señales en la zona de combustión se debe a que al faltar un segmento aumenta el cabeceo del pistón y el fenómeno de *blow-by*.

En todos los casos ensayados en el banco de pruebas, los cambios forzados en el motor han originado desviaciones apreciables en la energía de las señales de vibraciones y EA. Estas desviaciones no han desaparecido hasta que el fallo se ha corregido. Los cálculos de la energía utilizando la RMS de un elevado número de ciclos elimina las componentes de la energía asociadas a la variabilidad cíclica, por lo que la energía calculada corresponde exactamente a los sucesos que se repiten en todos los ciclos. Puede concluirse, por tanto, que muchos fallos del motor pueden detectarse analizando la energía de las señales de vibraciones y emisión acústica.

MONITORIZACIÓN DE LOS GENERADORES DIESEL DE CN GAROÑA

Como se ha puesto de manifiesto, las pruebas realizadas en el banco de ensayos revelaron que el cálculo de la energía de las señales de vibraciones y emisión acústica en áreas específicas del ciclo del motor constituye una herramienta adecuada para detectar problemas importantes en el motor de pruebas. Por ello, el método fue utilizado para realizar la diagnosis periódica de los diesel de emergencia de la central nuclear de Garoña. Esta planta siempre ha mostrado gran interés por las técnicas avanzadas de diagnóstico de motores, lo que ha sido de gran ayuda en el desarrollo de herramientas de diagnóstico efectivas, como la que se expone en este trabajo. Esta sección muestra cómo fue detectado un fallo en un inyector de un generador diesel de emergencia utilizando el método de la energía desarrollado en banco de ensayos.

Los motores diesel de esta planta son de la firma EMD, modelo 645. Los sensores utilizados fueron los

mismos que los empleados en el banco de ensayos. Inicialmente se realizaron pruebas preliminares para identificar la mejor localización de los sensores. Ésta se eligió para lograr que las señales tengan buena amplitud y mínima interferencia entre las señales de los distintos cilindros. En una primera fase se midieron las vibraciones y la emisión acústica en todos los cilindros del motor. Seguidamente, se obtuvo la RMS en cada cilindro, para posteriormente calcular la energía de cada señal correspondiente a los diferentes procesos del motor operando correctamente. Este proceso se repite periódicamente, y se compara la energía de las señales con la correspondiente a inspecciones previas en las que existía constancia de que el motor funcionaba sin fallos. Uno de estos análisis periódicos mostró desviación en la energía de las señales en la zona de combustión del cilindro 7. Como se aprecia en la figura 5, los niveles de la energía de las vibraciones y emisión acústica durante la combustión en este cilindro están por debajo de los correspondientes a condiciones normales de trabajo, lo que significa que no existe combustión en este cilindro. En esta figura la combustión normal representa un 40-60% de la energía considerada en el diagrama. Cualquier desviación de esta energía, especialmente entre 0-20% y 80-100% implica problemas de combustión. Dado que no existía combustión en el cilindro 7, los procesos a ella asociados (inyección y escape) también mostraron desviaciones en los niveles de energía (Figuras 6 y 7).

El bajísimo nivel de energía en la zona de inyección del cilindro 7 (figura 6) indicaba ausencia total de inyección de combustible, de ahí que no existiese combustión y que el flujo de gases de escape apenas tuviese energía asociada (Figura 7).

La energía de la RMS de las señales de vibraciones y emisión acústica facilitó una detección rápida del fallo mencionado, lo que previno que el motor estuviese trabajando anómalamente. Después de la rápida detección del fallo en el motor se aconsejó la inmediata inspección del sistema de inyección. La revisión confirmó un problema mecánico en el sistema de inyección que implicaba ausencia de inyección de combustible en el cilindro 7: la cremallera del governor del motor no estaba actuando sobre el inyector del

cilindro 7. Este problema hubiese sido muy difícil de detectar por otros medios. Después de la reparación se volvió a calcular la energía de la vibración y emisión acústica en la zona de inyección, combustión y apertura de las válvulas de escape y se comprobó que los niveles de las señales correspondían al motor trabajando sin fallo.

CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un método de diagnóstico de motores rápido, eficaz y de bajo coste, y capaz de contribuir a mejorar la disponibilidad y fiabilidad de los diesel de emergencia en plantas nucleares. El método se basa en el análisis de la energía de las señales de vibraciones y emisión acústica del motor en el dominio del tiempo. La energía se obtiene realizando la integral de la RMS de cada señal durante los diferentes procesos que constituyen el ciclo del motor. La energía así obtenida se compara con valores de referencia.

El sistema de registro de datos y el procesamiento de las señales se ha optimizado en banco de ensayos. Una vez que el método se validó experimentalmente, se aplicó a las actividades de diagnóstico periódica que se realizan en los diésel de emergencia de la central nuclear de Garoña, detectando que un inyector no actuaba correctamente. El motor se reparó rápidamente, y posteriormente se volvió a realizar la diagnosis del mismo, comprobando que todos los sistemas funcionaban correctamente y el motor operaba en condiciones seguras.

REFERENCIAS

- [1] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Application and testing of safety-related diesel generators in nuclear power plants. Regulatory Guide 1.9; 2007.
- [2] Diesel engine maintenance and inspection. Nuclear Regulatory Commission. Technical Training Center. 7320-01123 - 00 Rev 0.0.
- [3] Lilly L. R. Diesel engine reference book, Butterworths, 1986.
- [4] Kouremenos D. A., Hountalas D. T. Diagnosis and Condition Monitoring of Medium-Speed Marine Diesel Engines. Tribotest Journal 4-1, pp. 63-91, 1997.
- [5] HSU, B. D. Practical Diesel-Engine Combustion Analysis. SAE International, 2002.

- [6] ZHAO, H.; Ladommatos N. Engine Combustion Instrumentation and Diagnostics. Society of Automotive Engineers, 2001.
- [7] EPRI. Diesel Engine Analysis Guide. TR-107135 Final Report. Electric Power Research Institute (NMAC). September 1997.
- [8] Shiyuan L., Fengshou G., Ball A. Detection of engine valve faults by vibration signals measured on the cylinder head. Proceedings of the I MECH E Part D Journal of Automobile Engineering, Volume 220, Number 3, pp. 379-386(8), 2006.
- [9] Geng Z.M., Gu F., Ball A. Investigation into Vibration from Piston Slap for Engine Condition Monitoring. Maintenance and Reliability Conference (MARCON 2000); pp 40.01-40.08. Knoxville, Tennessee, USA, 8-10 May, 2000.
- [10] Gu F., Ball A.D. Vibration Based Fault Diagnosis in Diesel Fuel Injection System. I Mech E Seminar on Diesel Fuel Injection Systems, pp 89-97. London, Sept. 1995.
- [11] Ben-Ari J., De Botton G., Itzhaki R., Sher E. Fault detection in internal combustion engines by the vibrations analysis method. SAE technical paper series, ISSN 0148-7191; 01-1223, 1999.
- [12] Ohta K., Irie Y., Fukuzawa Y., Shimokouchi H. Analysis of main bearing impact induced by crankshaft vibration. Proceedings of INTER NOISE 93, pp 1885-1888, 1993.
- [13] Douglas RM, Steel JA, Reuben RL. A study of the tribological behavior of the piston ring/cylinder liner interaction in diesel engines using acoustic emission. Tribol. Int. 2006; 39: 1634-42.
- [14] Albarbar A, Gu F, Bal AD. Diesel engine fuel injection monitoring using acoustic measurements and independent component analysis. Measurement. 2010; 43: 1376-86.
- [15] Muñoz M., Moreno F., Bernal N., Arroyo J., Paniagua L. Engine diagnosis method based on vibration and acoustic emission energy. Insight. Vol 54. N° 3. March 2012.
- [16] Arroyo J., Muñoz M., Moreno F., Bernal N., Monné C. Diagnostic method based on the analysis of the vibration and acoustic emission energy for emergency diesel generators in nuclear plants. Applied Acoustics. 2013. 74: 502-508.