

MAITE AGUADO - CARLOS CUETO-FELGUEROSO

SEGUIMIENTO DE LA DEGRADACIÓN Y EVALUACIÓN DE VIDA REMANENTE DE COMPONENTES DE CC.NN.

El sector eléctrico ha dedicado en los últimos años numerosos recursos para desarrollar e implantar estrategias dirigidas a optimizar la vida remanente de las instalaciones. No obstante, es necesario seguir trabajando en este campo, con objeto de realizar un seguimiento más fiable y global del estado de envejecimiento de los componentes. En este sentido, Tecnatom tiene entre sus principales objetivos optimizar, validar y desarrollar nuevas técnicas de detección y diagnóstico de la degradación, mejorar los métodos de evaluación de vida remanente y diseñar herramientas integradas de seguimiento, cuyos últimos logros y avances conseguidos se describen en este artículo.

INTRODUCCIÓN

El sector eléctrico, tanto en nuestro país como a nivel internacional, ha dedicado grandes esfuerzos en la investigación e implantación de estrategias dirigidas a la gestión de vida remanente, conscientes de su necesidad y utilidad, no solo para alargar la vida de las instalaciones, sino para mejorar los índices de fiabilidad y disponibilidad de las mismas.

Durante este tiempo, en que se ha hablado sucesivamente de alargamiento de vida, gestión de vida remanente, y últimamente de gestión del envejecimiento o incluso gestión de activos, se han estudiado mecanismos de degradación, que no se conocían en profundidad, desarrollado diferentes metodologías, tanto para seleccionar los componentes críticos como para evaluarlos, diseñado equipos para inspección o monitorización de componentes, etc.

En cualquier caso, la filosofía principal de la gestión de vida, se ha mantenido, estando centrada en disponer de herramientas que permitan conocer o evaluar el estado de los componentes, así como en estrategias dirigidas a mitigar dicho envejecimiento, o incluso a reparar o sustituir el componente, posibilidad también a considerar, como las sustituciones de generadores de vapor, rotores de turbina, etc. lo demuestran.

No obstante, aunque muchos son los avances conseguidos en este área, es necesario seguir trabajando en varios aspectos:

- Investigación de mecanismos de degradación, cuya incidencia es aún poco conocida.
- Desarrollo de técnicas, equipos o métodos para detectar, evaluar y realizar un seguimiento fiable de los mecanismos de degradación, que se consideren más significativos o limitativos de la vida útil de la planta.
- Desarrollo e implantación de herramientas de ayuda a la interpretación y evaluación glo-

bal de la vida remanente de los componentes principales.

- Integración en los criterios de explotación de las instalaciones, de los aspectos de gestión del envejecimiento y evaluación de vida.
- Desarrollo de criterios de ayuda a la toma de decisiones sobre las estrategias óptimas de reparación, re-diseño, sustitución, etc.

Tecnatom como empresa del sector, cuya misión es contribuir a mejorar la explotación de las centrales nucleares, ha estado comprometida desde el principio en los temas relativos a la gestión de vida de las instalaciones, contribuyendo, desde sus campos principales de actividad, al desarrollo de técnicas, métodos o herramientas en general, para seguimiento de la degradación y evaluación de vida remanente.

En los siguientes apartados, se describen brevemente los principales desarrollos, realizados recientemente o en curso, en los que Tecnatom está inmersa, bien en solitario o junto con otras empresas del sector. El objetivo de dichos desarrollos va claramente dirigido a optimizar la gestión de vida de las centrales nucleares mediante técnicas y métodos de detección, diagnóstico y evaluación de la degradación, así como herramientas de seguimiento, cuya aplicación permitirá vigilar el estado de envejecimiento de los materiales y componentes de una forma continuada, fiable e integrada.

TÉCNICAS DE DETECCIÓN Y DIAGNOSTICO DE LA DEGRADACIÓN

Una vez que un componente ha sido considerado como crítico, de cara a su gestión de vida, y se han determinado los mecanismos de degradación que potencialmente pueden actuar en el mismo, el paso siguiente es seleccionar la técnica más adecuada para detectar la presencia, y posible incidencia, de dichos mecanismos de degradación.

Muchos son los factores que hay que considerar en la selección de una técnica, tanto de inspección como de monitorización:

- Ámbito y condiciones de aplicación
- Sensibilidad al mecanismo de degradación
- Fiabilidad (umbrales de detección, grado de incertidumbre, etc.)
- Periodicidad
- Interpretación y evaluación de resultados
- Coste

Es extremadamente importante seleccionar una técnica que sea sensible al mecanismo de degradación que interesa evaluar, con objeto de que sea posible la detección, desde los primeros momentos de su aparición, así como un seguimiento fiable de su incidencia.

Actualmente, la gran mayoría de los componentes de las CC.NN. se vigilan, desde el punto de vista de su envejecimiento, en base a inspecciones en servicio, aunque cada vez se están

Fig. 1. Sistema MIDAS. Adquisición de datos multitécnica (corrientes inducidas y ultrasonidos).

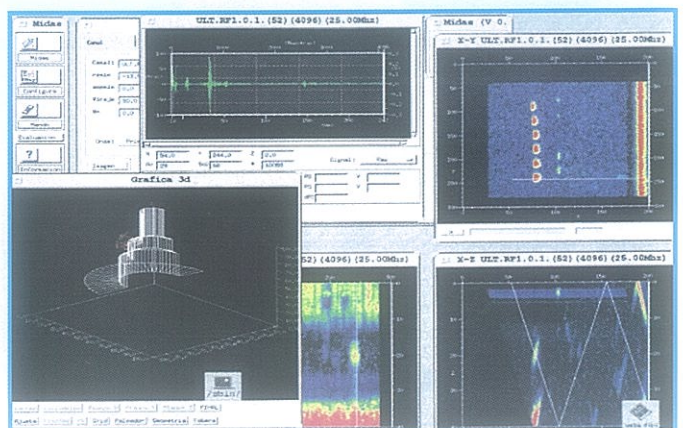
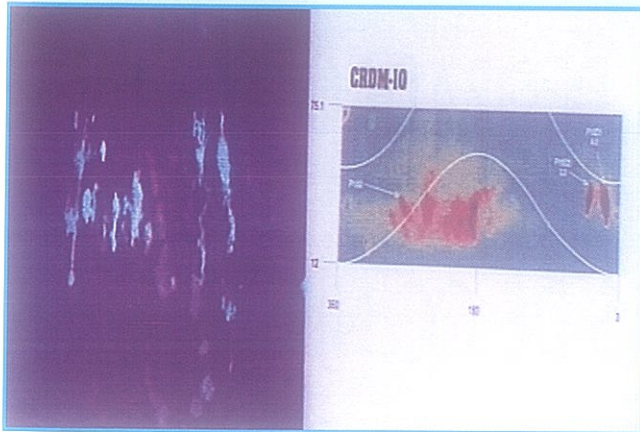


Fig. II. Resultados obtenidos en la inspección de un CRDM mediante visuales y corrientes inducidas.



introduciendo más los sistemas de monitorización y diagnóstico.

Ambas técnicas: inspección y monitorización tienen ventajas e inconvenientes. Entre las ventajas de la inspección, se encuentra la mayor fiabilidad en la detección, así como el no requerir instrumentación adicional permanentemente. Por el contrario, entre las ventajas de la monitorización se encontraría la posibilidad de realizar un seguimiento más continuado, sin necesidad de parar la instalación.

Es evidente que ambas técnicas no son excluyentes, sino complementarias. La estrategia más idónea es buscar un equilibrio entre ambas, teniendo en cuenta los factores anteriormente comentados, así como otras consideraciones tales como normativa, requisitos de las Autoridades Reguladoras, problemática específica de cada instalación, etc, de forma que se pueda realizar un seguimiento adecuado, tanto en base a ins-

pecciones como a monitorización.

Tecnatom, aunque ha sido históricamente una empresa líder en la inspección en servicio, no ha dejado de lado los temas de monitorización, que como se mencionaba anteriormente, jugarán en el futuro un papel importante y complementario a la inspección.

Centrándose en cada una de estas técnicas, empezando por la inspección, se puede apuntar que se está haciendo

un gran esfuerzo por parte del sector, en los siguientes ámbitos:

- **Optimización** de técnicas y equipos de inspección.

De forma continuada se avanza en la optimización de técnicas y equipos en términos como:

- Mejorar la fiabilidad y repetitividad de los ensayos usando equipos automatizados, que adicionalmente contribuyen a la reducción de dosis del personal y de tiempos de inspección.
- Disminuir el umbral de detección, con objeto de evaluar la presencia e incidencia del mecanismo de degradación en los primeros estadios de aparición.
- Facilitar la interpretación de resultados, con programas adicionales de tratamiento, almacenamiento y evaluación de resultados, lo que redundará en un mejor seguimiento histórico de indicaciones de defecto y del estado del componente en general.

Como ejemplos se pueden mencionar la utilización de:

- Sistemas Ultrasónicos "arrays", para la monitorización de la defectología asociada a los CRD's de centrales BWR.

- Sistemas avanzados de adquisición de datos y multitécnica (MIDAS) con almacenamiento de señal completa para optimizar el seguimiento de la degradación del material. (Fig. I)

- **Desarrollo** de nuevas técnicas y equipos de inspección

La aparición de mecanismos de degradación en zonas no previstas inicialmente, así como la necesidad de tener un mayor control sobre el envejecimiento de los componentes, está dando lugar al desarrollo de nuevas técnicas y equipos de inspección, aplicables a zonas o componentes de difícil acceso o que requieren un desmontaje complicado.

Entre estos nuevos desarrollos estarían incluidos los siguientes temas:

- Nuevo dispositivo para inspección por ultrasonidos (UT-GAP) de los CRDM's sin necesidad de cortar el manguito térmico, desarrollado dentro del proyecto del sector eléctrico PETA-VA (Penetraciones Tapa Vasija). (Fig. II)
- Sistema de Inspección de Encastres de Turbinas (SIRENA), usando técnicas de focalización "arrays", cuya principal ventaja es evitar la destrucción de álabes, que hasta ahora había sido necesaria para inspeccionar los encastres, según recomendaciones de algunos suministradores. (Fig. III)
- Técnicas de visión por láser, a utilizar como complemento a las corrientes inducidas en la inspección de tubos de los generadores de vapor, con objeto de optimizar la caracterización de las grietas superficiales. (Fig. IV)
- Sistema para la inspección de las barras de control por corrientes inducidas. (Fig. V)

- **Validación** de técnicas de inspección

Es especialmente importante prestar atención, no solo a las técnicas y equipos como tal, sino a su validación, como elemento que garantiza la fiabilidad en la aplicación de las técnicas de inspección.

En este sentido, se dedican numerosos recursos al entrenamiento del personal en maquetas, la preparación de justificaciones técnicas, etc. (Fig. VI)

Fig. III. Sistema SIRENA para la Inspección de Encastres de Turbinas. Módulo de Inspección y Bloque de Calibración.

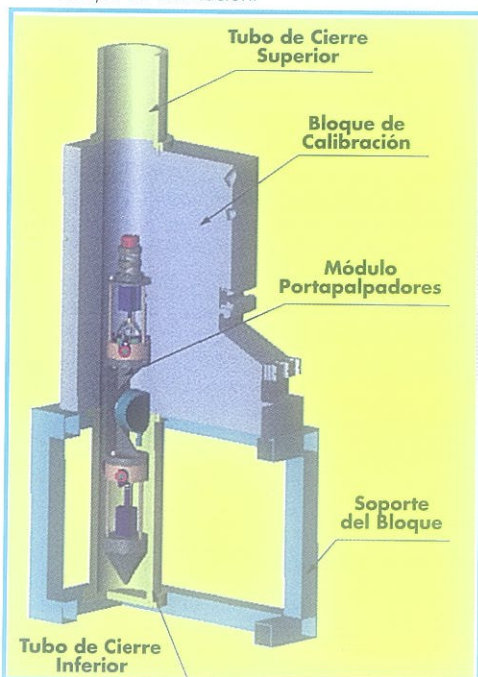
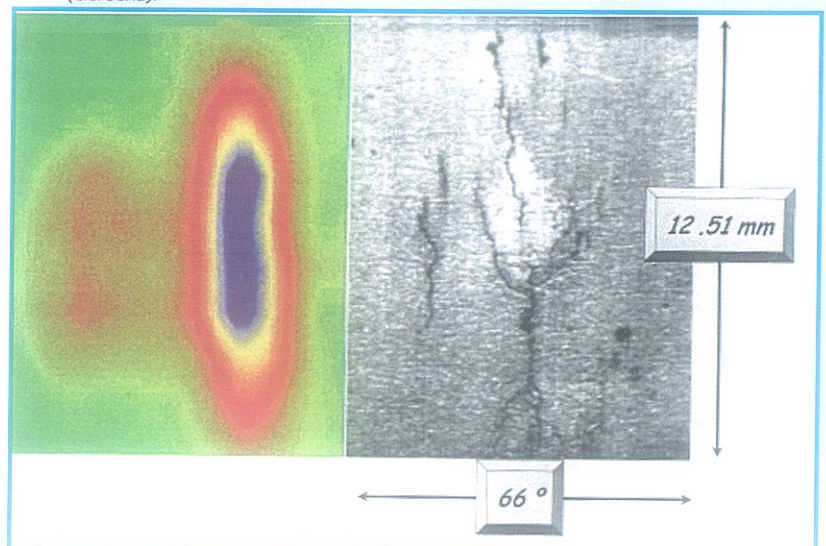


Fig. IV. Comparación de resultados obtenidos en la inspección de un tubo de generador de vapor utilizando corrientes inducidas (izquierda) y técnicas de visión por láser (derecha).



En cuanto a la monitorización, que adquiere más relevancia cada día, se están haciendo avances tanto por parte de los suministradores como de empresas de servicios, y muchas centrales disponen ya de este tipo de sistemas. Uno de los más habituales es la monitorización de vibraciones o de los principales parámetros de operación, cuyo objetivo es determinar si estos están dentro del comportamiento normal aceptable para el componente o sistema.

La complejidad de estos sistemas es variada, encontrándose desde equipos que únicamente vigilan que los parámetros se muevan dentro de los límites aceptables, tal como se mencionaba anteriormente, a sistemas que realizan un diagnóstico más completo, determinando las posibles causas de la desviación del comportamiento normal o adelantando incluso recomendaciones al operador.

Tecnatom, y en general las empresas del sector, están avanzando también en el desarrollo de este tipo de sistemas, apoyados en otras herramientas, tales como los Sistemas de Supervisión de Procesos (SAMO, SPDS, SATA, GAMA-I, etc.), o en aplicaciones específicas, como el Sistema de Optimización de Rondas (SOR). (Fig. VII) Por tanto, una adecuada combinación de técnicas de inspección y sistemas de monitorización y diagnóstico es clave en la gestión de vida, permitiendo detectar, diagnosticar y vigilar la degradación de materiales y defectos en componentes. La monitorización es clave para vigilar los componentes en el intervalo entre inspecciones y la inspección a su vez, y entre otras funciones, para validar de forma más realista el diagnóstico aportado por el sistema de monitorización.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN Y VIDA REMANENTE

Las técnicas de inspección y monitorización aportan información necesaria para conocer el estado del componente en estudio; no obstante, se requiere en la mayoría de los casos del apoyo de métodos de evaluación específicos, para llegar a determinar la vida remanente del componente.

Es decir, el haber detectado en una inspección en servicio una indicación de defecto por ejemplo, no sería suficiente, desde el punto de vista de vida remanente, si posteriormente no se realizara una evaluación adecuada del tamaño de defecto admisible por el componente, la velocidad de crecimiento previsible, etc. Hemos de recordar que puede haber grietas que una vez que se generan se propagan muy rápidamente, como sucedía en los anillos de retención de rotores de alternador con material 18Mn-5Cr, o por el contrario grietas que detienen su crecimiento, al llegar a una zona de tensiones más favorable. Por todo lo anterior, las técnicas de inspección y monitorización deben estar complementadas con métodos de evaluación basados en mecánica de fractura, ensayos experimentales, etc. con objeto de obtener una evaluación fiable de la vida remanente del componente.

En los campos anteriores también se han hecho progresos importantes y claves, para optimizar la

gestión de vida remanente.

En cuanto a los métodos de mecánica de fractura, se han ido desarrollando en paralelo con las técnicas de inspección en muchos casos, según aparecía la necesidad de detectar y evaluar la incidencia de determinados mecanismos de degradación. Los últimos desarrollos realizados en Tecnatom, con colaboración de las empresas del sector en algunos casos, se pueden resumir en:

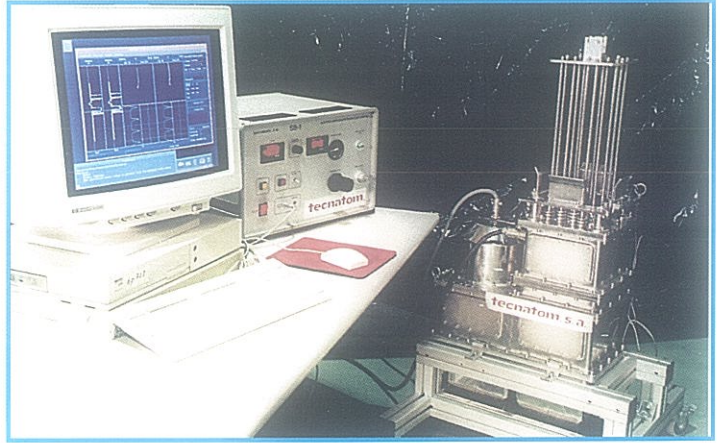
- Desarrollo de criterios de aceptación

Uno de los ejemplos más representativos lo constituyen los desarrollados para las penetraciones de las tapas y el fondo de las vasijas. En función de las propiedades de los materiales, las tensiones en servicio, el mecanismo predominante (SCC), geometría y dimensiones del componente y la localización de las indicaciones, se puede determinar por mecánica de fractura los tamaños admisibles de grieta, y a su vez la vida remanente. (Fig. VIII)

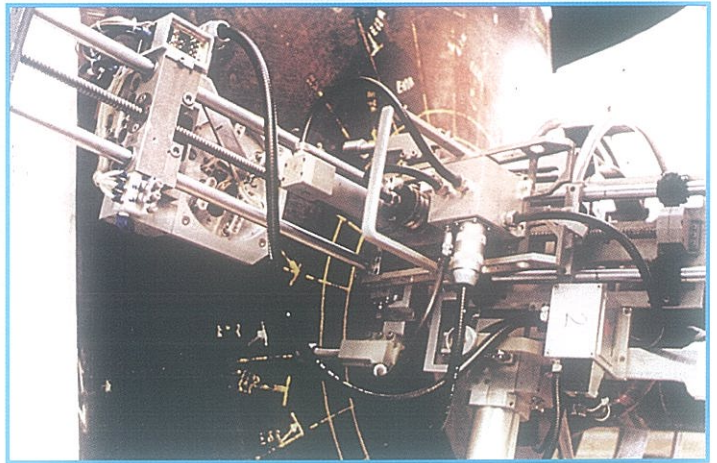
- Determinación de las zonas más críticas de un componente y evaluación de indicaciones

Tanto los análisis de tensiones como de mecánica de fractura, permiten determinar las zonas más solicitadas y críticas de un componente. La utilidad de esta información es amplia, teniendo en cuenta que puede servir para ajustar el alcance de una inspección, seleccionar las zonas

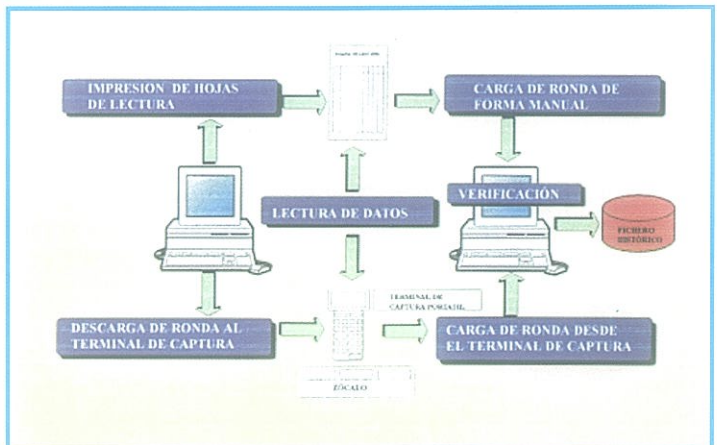
IV. Sistema de inspección de barras de control por corrientes inducidas.



V. Equipo de inspección de toberas sobre maqueta real.



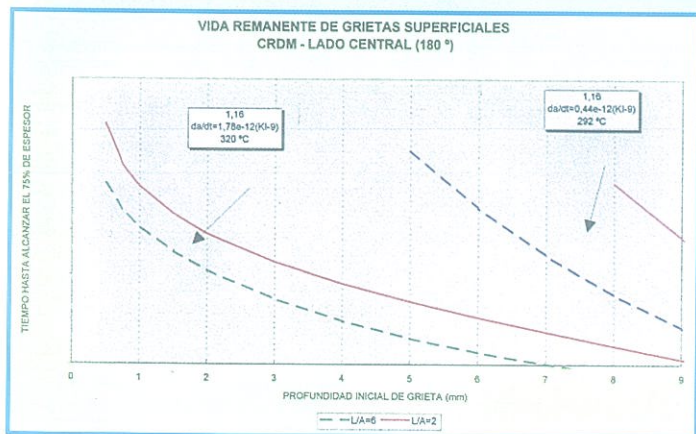
VII. Sistema de Optimización de Rondas (SOR). Esquema de funcionamiento.



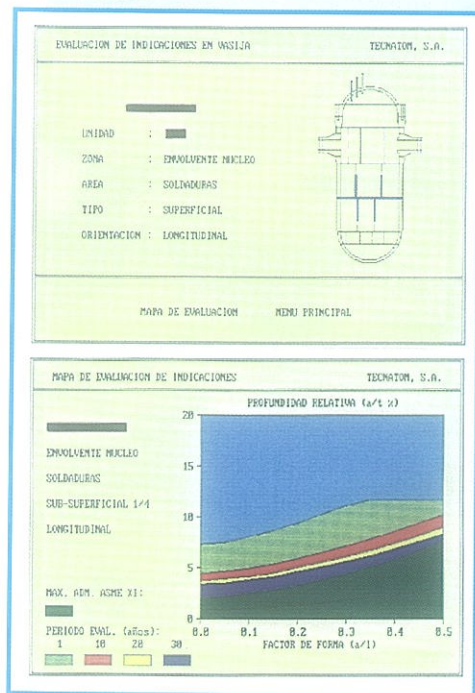
donde instalar un sistema de monitorización, e incluso evaluar las indicaciones de defecto, detectadas en la inspección.

Los Manuales de Evaluación de Indicaciones (MEI's) que Tecnatom ha venido desarrollando para las vasijas y turbinas de las CC.NN.EE. siguen la filosofía anterior, y se optimizan continuamente, con objeto de que aporten evaluaciones más fiables y menos conservativas. (Fig. IX)

FVIII. Vida remanente de un CRDM en función de la profundidad inicial de la grieta.



FIX. Manual de Evaluación de Indicaciones de Vasija.



- Desarrollo de criterios de fuga antes de rotura (leak before break)

Otra aplicación de la mecánica de la fractura es determinar si un componente fugará antes de romper, mediante la comparación entre el tamaño crítico de grieta y el ligamento remanente en el componente, es decir, consiste en demostrar que la grieta puede alcanzar la pared exterior antes de llegar a ser crítica.

Este criterio es importantísimo para garantizar la integridad estructural de un componente, ya que si este cumple el criterio de fuga antes de rotura, se puede realizar su vigilancia únicamente monitorizando la existencia o no de fuga.

Una de las aplicaciones más importantes de esta metodología se ha realizado en el proyecto del sector eléctrico PISGV (Proyecto de Investigación sobre Generadores de Vapor), y ha permitido la ope-

ración segura de los generadores de vapor, hasta que han podido ser sustituidos.

- Evaluación de la integridad estructural de un componente envejecido.

Adicionalmente, la mecánica de fractura puede ayudar a evaluar la integridad de un componente envejecido, con el objeto de demostrar que dicho com-

ponente puede seguir operando de forma segura, aún con un determinado nivel de degradación. Si se demuestra lo anterior, se puede reducir e incluso eliminar la necesidad de realizar inspecciones en dicho componente.

Se puede mencionar como ejemplo la aplicación de esta metodología a la carcasa de una bomba de refrigeración de acero inoxidable fundido de una central nuclear. Se demostró que aún en el caso de que dicha carcasa estuviera fragilizada por temperatura, podría resistir la grieta postulada en el código ASME.

- Estudio de las condiciones de operación óptimas

Otra de las posibles aplicaciones, es la evaluación de las condiciones de operación óptimas. Es evidente que en la mayoría de los casos, tanto la degradación del material como el crecimiento de defectos, están directamente afectados por las condiciones de operación, al ser unas mucho más severas que otras.

En aquellos componentes en que las condiciones de operación pueden ser variadas ligeramente, sin afectar otros criterios como rendimiento, producción, etc., se pueden

determinar las condiciones óptimas mediante mecánica de fractura, de forma que se consiga una menor evolución de la degradación o se incremente la tolerancia al daño del componente. Se puede encontrar un ejemplo en las grietas de fatiga de las turbinas de vapor. Hay que tener en cuenta que uno de los momentos más críticos, desde el punto de vista del fallo de una turbina con defectos, se produce en el arranque, ya que la tenacidad del material es baja, y por tanto una grieta no crítica en operación normal, si lo podría ser en el arranque. Por tanto, se puede determinar la forma de arrancar más conveniente, usando pre-calentamiento por ejemplo, con objeto de aumentar el tamaño crítico de defecto admisible, y garantizar así la integridad estructural del componente.

Por tanto, para determinar la vida remanente de un componente, tan importante es evaluar la criticidad de los defectos, mediante mecánica de fractura, según se comenta en los apartados an-

teriores, como conocer la incidencia de la degradación en la evolución de las propiedades del material.

En las centrales nucleares, la fragilización, tanto por irradiación como por temperatura, es uno de los efectos más importantes a tener en cuenta en la degradación de las propiedades de los materiales. Los dos siguientes desarrollos pueden servir de ejemplo para ilustrar las actividades que se están realizando en este área:

- Determinación de la tenacidad de un material fragilizado por temperatura

En función del contenido de ferrita del material, que se obtiene utilizando un ferritómetro, se determina la tenacidad del material, mediante correlaciones con la composición química. Estos análisis son fundamentales en la evaluación de un componente envejecido, como puede ser el caso que se mencionaba en un apartado anterior, relativo a la carcasa de una bomba de refrigeración fragilizada por temperatura.

- Evaluación de la fragilización por irradiación en vasija

De todos es sabido la fragilización que experimenta el material de la vasija como consecuencia de la radiación neutrónica. Dicha evolución en las propiedades del material, se puede cuantificar por medio de modelos empíricos desarrollados en base a datos procedentes de ensayos de materiales irradiados en reactores experimentales, o a partir de datos procedentes de irradiaciones de cápsulas de vigilancia en reactores comerciales.

Tecnatom, como responsable de los programas de vigilancia de la gran mayoría de las CC.NN.EE., ha obtenido una correlación propia para el cálculo del incremento de la temperatura de referencia RTNDT que experimentará el material de la vasija para una fluencia neutrónica dada. Se han utilizado para este desarrollo los datos de vigilancia procedentes del análisis de las cápsulas extraídas en los reactores españoles PWR.

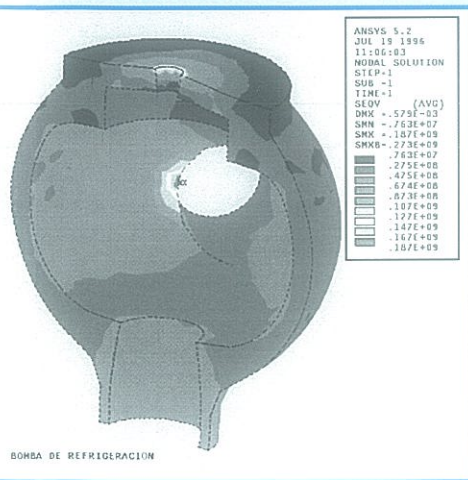
En el estudio se concluye que los datos de vigilancia de las centrales nucleares españolas PWR, tratados en su conjunto, presentan una gran coherencia con las predicciones de fragilización por irradiación utilizadas en otros países, principalmente en Estados Unidos. Asimismo, la utilización de una fórmula o curva de tendencia de fragilización específica de los reactores españoles permitiría optimizar la explotación de la central, aumentar los márgenes de seguridad e incrementar su vida útil. (Fig. XI)

HERRAMIENTAS INTEGRADAS DE EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO

Lo anteriormente expuesto indica que hay un elevado grado de desarrollo en cuanto a técnicas y métodos de gestión de vida.

No obstante, tal como se apunta al principio, dichas técnicas y métodos proporcionan mucha información, pero en cualquier caso, una visión parcial del estado de los componentes. Es evidente que la optimización de la gestión del envejecimiento o la vida de un planta,

FX. Distribución de tensiones en una bomba de refrigeración susceptible a presentar fragilización por temperatura.



necesita de una visión más integrada, y que contemple en profundidad los componentes más críticos y sus mecanismos de degradación más limitativos. Se puede decir, a modo de símil, que aunque se dispone de muchas piezas del "puzzle", se necesita, además de alguna que otra pieza específica, encajar e integrar las disponibles, con objeto de obtener la mencionada visión global.

En el camino de la integración queda aún mucho por hacer, tanto por parte de las centrales nucleares, que tendrán que optimizar o diseñar nuevas estrategias en cuanto a sus sistemas de gestión de la información, como de suministradores o empresas de servicios, que son los principales proveedores de información sobre el estado de componentes, en base a inspecciones y pruebas, principalmente.

Tecnatom, como diseñador y gestor de la mayoría de las bases de datos de inspecciones y pruebas ha estado trabajando en los últimos años para optimizar estas bases de datos, en aspectos como:

- Facilidad de uso, con entornos más amigables e introducción de croquis y planos, y manteniendo una estructura similar y homogénea en todas ellas.

- Introducción de utilidades adicionales, para estudiar tendencias de los datos históricos o evaluar vida remanente. (Fig. XII)

Otras mejoras, como los criterios de inspección y pruebas basadas en riesgo, serán introducidas en breve. Asimismo, esta previsto optimizar dichas bases de datos, integrando más información, que puede ser clave para la gestión del envejecimiento y la vida de los componentes.

Lo anteriormente comentado, ayudará y hará posible sin duda la futura integración de la información dispersa en cuanto a gestión de vida, constituyendo un primer punto de partida. No obstante, habrá que dedicar aún más recursos para llegar a una plataforma o sistema integrador que ayude en la ardua tarea de realizar un seguimiento más adecuado de la vida remanente de la instalación y sus componentes principales.

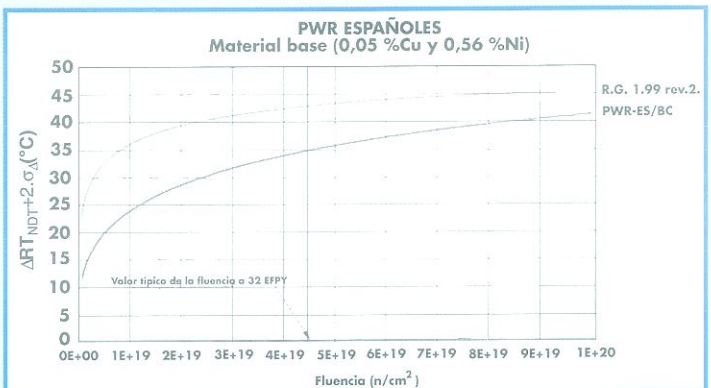
CONCLUSIONES

La gestión de vida de una central nuclear requiere de un trabajo continuado, en cuanto al desarrollo y la mejora de técnicas de inspección y monitorización, así como de métodos de evaluación, de forma que sea posible determinar el estado de envejecimiento de los componentes de forma más fiable, continuada e integrada. Solo en este caso, los responsables de la instalación podrán tomar las decisiones más adecuadas y en los momentos oportunos, con objeto de optimizar la explotación de la instalación. Muchos son los esfuerzos que el sector eléctrico y las empresas afines han realizado hasta el momento, tal como se ha descrito en este artículo, pero aún hay que seguir profundizando en la incidencia de algunos mecanismos de degradación, las técnicas y métodos para evaluarlos, y sobretodo en la integración de la información, que permita realizar una evaluación global de la planta.

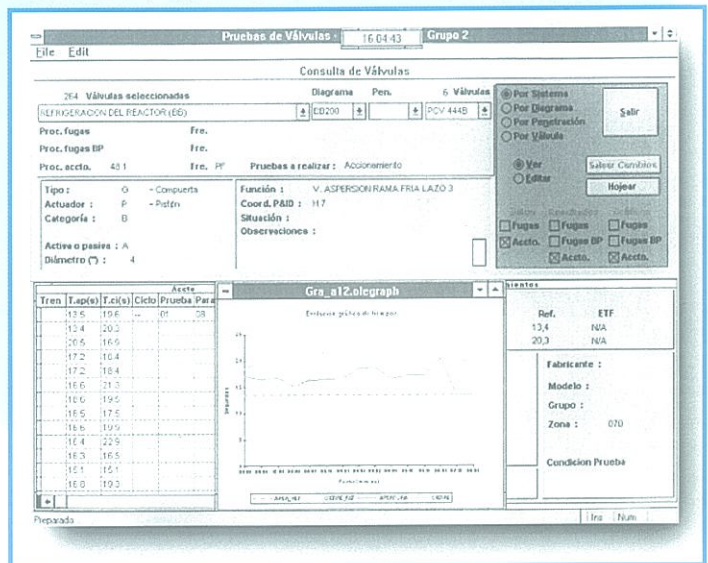


Maite AGUADO es Ingeniero Aeronáutico por la Universidad Politécnica de Madrid y Master en Dirección de Empresas por el Instituto de Empresa de Madrid. Se incorpora a la Unidad de Análisis de Integridad de Tecnatom en 1988, ocupándose de la realización de análisis de tensiones y de mecánica de fractura de turbinas de vapor. En 1990 se responsabiliza de las actividades de Gestión y Alargamiento de Vida de Centrales Nucleares y Térmicas Convencionales, participando en el desarrollo de metodologías y herramientas para evaluar el estado de envejecimiento de componentes y materiales. En la actualidad es Jefe de la Unidad de Nuevas Tecnologías.

FXI. Curvas de evolución de la temperatura de referencia RTNDT según la R.G. 1.99 rev.2 y la correlación propia PWR-ES/BC obtenida por Tecnatom, a partir de los datos de las cápsulas extraídas en los reactores españoles PWR.



FXII. Aplicación informática para el seguimiento de las pruebas de accionamiento y fugas de válvulas.



Carlos CUETO-FELGUEROSO es Ingeniero Naval por la Universidad Politécnica de Madrid. Se incorpora a la Unidad de Análisis de Integridad de Tecnatom en 1985, ocupándose de los estudios de mecánica de fractura y vida remanente de grandes componentes de Centrales Nucleares y Térmicas Convencionales: vasijas, generadores de vapor, turbogrupos, etc. Ha participado en numerosos proyectos de investigación, PISGV y PETAVA entre otros, donde se responsabilizó del desarrollo de criterios de aceptación, metodologías de evaluación de vida remanente, criterios de fuga antes de rotura, etc. En la actualidad es Jefe de la Unidad de Integridad de Componentes.