

INSPECCION EN SERVICIO DE LOS TUBOS DE LOS GENERADORES DE VAPOR DE LAS CENTRALES PWR

José HERVAS GARCIA

GENERALIDADES Y EXPERIENCIAS SOBRE LOS GENERADORES DE VAPOR EN LAS CENTRALES PWR

En las centrales nucleares de agua a presión (PWR), los tubos de los Generadores de Vapor (G. V.) constituyen el punto de conexión de los circuitos primario y secundario y es, por tanto, a través de ellos, donde se verifica el intercambio calorífico entre el sistema refrigerante del reactor (primario) y el sistema de vapor principal (secundario). (Ver esquema, figura 1.)

A título orientativo, una central de 930 MWe (semejante a las centrales PWR de la segunda generación instaladas en España) dispone de tres generadores de vapor, con 4.674 tubos en U cada uno de ellos, con una superficie total de transmisión de calor de 13.377 m², lo que supone más del 50 % de la superficie total de la barrera de presión del sistema refrigerante del reactor. El material de los tubos es Inconel 600 y su espesor nominal de pared 1,09 mm.

Una fuga en alguno de los tubos de los generadores de vapor supone el paso del fluido refrigerante del reactor al sistema de vapor principal con la consiguiente transferencia de radiactividad del circuito primario al secundario. Dicho fenómeno, supone para el explotador de la central, el tener que tomar una serie de medidas (definidas en las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento de la central) en orden a, inicialmente, aislar el generador de vapor donde se produce la fuga y, finalmente, a la parada del reactor para proceder a la localización y taponado (dejándolo fuera de servicio) del tubo que fuga.

Si analizamos algunos de los datos de que se dispone sobre el número de centrales en operación que presentan problemas de degradación de la pared de los tubos de sus G. V. (ver tabla 1), se deduce, con claridad, la importancia que presenta el fenómeno señalado, llegándose a la conclusión de que los haces tubulares de los G. V. constituyen uno de los puntos más vulnerables de las centrales PWR, desde el punto de vista de su operatividad.

EXPERIENCIAS SOBRE PROBLEMAS EN LOS GENERADORES DE VAPOR

Analizando el problema desde el punto de vista de la seguridad de las centrales, cabría preguntarse, cuáles son las bases sobre las que se garantiza que se mantiene la integridad de los tubos de los generadores de vapor, bajo todas las condiciones de operación o accidente postulado.

Estas bases giran alrededor de los siguientes conceptos:

- La fuga máxima permitida.
- Los requerimientos preventivos de taponado de los tubos de los G. V.
- Las inspecciones en servicio.

Aunque el objetivo del presente trabajo es analizar la Inspección en Servicio, por su correlación, realizaremos también unos breves comentarios de los otros dos conceptos:

Fuga máxima permitida

Las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento limitan las fugas del primario al secundario a través de todos y cada uno de los generadores de vapor no aislados del sistema refrigerante del reactor.

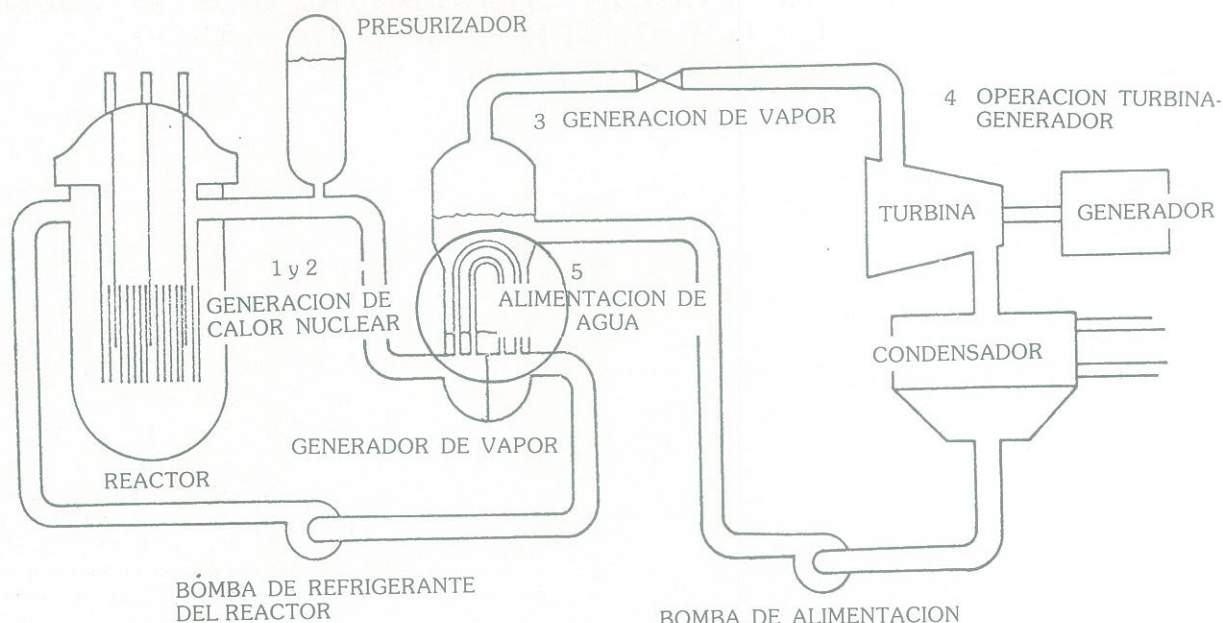
Estos límites se basan en dos consideraciones:

- La fuga permitida para todos los generadores de vapor será tal, que se asegure que la contribución de dosis proveniente de la fuga estará limitada a una pequeña fracción de los límites establecidos en el 10CFR parte 100 en el caso de rotura de un tubo o rotura de la línea de vapor. Este límite es consistente con las hipótesis utilizadas en el análisis de estos accidentes.
- El límite de fuga por generador de vapor asegura que la integridad de los tubos de los G. V. se mantendrá en el caso de rotura de la línea de vapor principal (MSLB) o bajo condiciones de accidente por pérdida de refrigerante (LOCA).

La experiencia ha puesto de manifiesto que algunas formas de degradación pueden desarrollarse en un período de



José HERVAS GARCIA, Ingeniero Naval, ingresó en TECNATOM en junio de 1976, actuando desde esta fecha como responsable del Grupo de Corrientes Inducidas de la Sección de Explotación, cuyo objetivo principal es la puesta a punto de las técnicas, métodos y programas de trabajo, relativos a las inspecciones en servicio de los tubos de los Generadores de Vapor, Condensadores y Cambiadores de Calor. En la actualidad es, asimismo, el representante de las empresas eléctricas españolas en el subcomité de ensayos no destructivos del Steam Generator Owners Group II (EPRI).



F I Esquema básico PWR

T I

Centrales PWR al 3/82

Con problemas	99
Sin problemas	32
Sin problemas ≥ 5 años operación	3
Centrales que han reemplazado sus generadores con menos de 10 años de operación	4
	(en total 12 G. V.)

tiempo inferior a los intervalos de inspección o pueden ser difíciles de detectar por las técnicas no destructivas empleadas en las Inspecciones en Servicio de los tubos de los G. V. En el caso de que tal degradación ocurra, el límite de fuga actúa indicando cuando la central debe pararse para realizar Inspección en Servicio y adoptar medidas correctas.

Requerimientos de taponado de los tubos de los G. V.

La Regulatory Guide 1.121 establece las bases para el taponado, (aprovechando las paradas de la central) de los tubos degradados de los G. V. fundamentándose en:

- Los resultados (teniendo en cuenta los errores posibles en los datos) de las Inspecciones en Servicio.
- El incremento de degradación calculado que se prevé en el siguiente ciclo de operación.
- Del espesor mínimo de pared de los tubos degradados requerido para resistir a la rotura en las condiciones de operación o de accidente.

De esta forma, durante las paradas, se eliminan del servicio (taponándolos o reparándolos), todos aquellos tubos que en base a los datos anteriores sean

susceptibles de perforarse durante el siguiente ciclo de operación de la planta.

INSPECCION EN SERVICIO (ISI) DE LOS TUBOS DE LOS GENERADORES DE VAPOR

Objetivos

Las Inspecciones en Servicio de los tubos de los generadores de vapor tienen como objetivo:

- Mantener una vigilancia periódica del estado del haz tubular.
- Definir la naturaleza y causa de la degradación de los tubos.
- Cuantificar los defectos de los tubos, fundamentalmente en cuanto a la pérdida de espesor de pared que suponen.

Todo lo anterior nos permitirá:

- Tomar, a su debido tiempo, las medidas correctoras necesarias para intentar detener la degradación de los tubos.
- De acuerdo con la Regulatory Guide 1.121, antes mencionada, eliminar del servicio o reparar aquellos tubos que, por tener defectos superiores a la máxima pérdida de espesor permitida,

puedan ser susceptibles de perforarse durante el siguiente ciclo de operación.

Normativa

La normativa que regula las ISI de los tubos de los generadores de vapor está recogida en las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento, la cual está desarrollada a partir de la Regulatory Guide 1.83. «Inservice Inspection of Pressurized Water Reactor Steam Generator Tubes.» Revisión 1 de julio de 1975.

Actualmente, y basándose en la experiencia acumulada desde 1975, la NRC ha propuesto (todavía como borrador) una serie de recomendaciones sobre la problemática de los tubos de los generadores de vapor.

Esta serie de recomendaciones hacen referencia a:

- Prevención y detección de partes sueltas y objetos extraños en los generadores de vapor.
- Control de la química del circuito secundario.
- Integridad del condensador.
- Inspección en Servicio de los tubos de los generadores de vapor.

En lo concerniente a las Inspecciones en Servicio de los tubos de los generadores de vapor, las recomendaciones se refieren a:

- Alcance de los programas de inspección.
- Frecuencia de las inspecciones.
- Clasificación de los resultados de la inspección.
- Técnicas de inspección.

Modificando lo que sobre estos aspectos recogen las actuales Especificaciones y, de hecho, ajustándose algo más a lo que son prácticas habituales de los explotadores, en las Inspecciones en Servicio de los tubos de los generadores de vapor.

Alcance de los programas ISI

De acuerdo con las actuales especificaciones, el alcance de los programas se concreta en:

- Inspección preoperacional (base-line) /100 % de los tubos de los generadores de vapor.
- Inspecciones en servicio.

Como primera muestra se selecciona un número de tubos S tal que:

$$S = 3 N/n \%$$

donde:

N – es el número de G. V. en la planta.
n – es el número de G. V. a inspeccionar.

Los tubos de esta primera muestra deben ser seleccionados al azar, excepto si la experiencia en centrales con idénticas características (similares G. V., tratamientos químicos semejantes, etc.) indica que existen áreas críticas, en cuyo caso como mínimo S/2 deben ser seleccionados de estas áreas. Asimismo, deben también incluirse, en esta primera muestra, todos aquellos tubos que en inspecciones anteriores hayan presentado degradaciones de pared superiores al 20 %.

C-1 Menos del 5 % del total de los tubos inspeccionados están degradados y ninguno defectuoso.

C-2 Uno o más, pero menos del 1 % son defectuosos y entre el 5 % y el 10 % están degradados.

C-3 Más del 1 % defectuoso o más del 10 % degradados

A los efectos de clasificación de los resultados, se entiende por tubo defectuoso aquél que presenta una pérdida de espesor de pared superior al límite de taponado y por tubo degradado, cuando presenta una pérdida de espesor, no detectada anteriormente, del 20 % o el incremento de pérdida de espesor respecto a la anterior inspección en servicio supera el valor del 10 %.

Según indicábamos en el punto anterior, de acuerdo con la clasificación de los resultados, se puede requerir ampliar el alcance de la inspección a una segunda muestra y a su vez a una tercera, pudiéndose llegar desde el 3 % inicial al 100 % en cada generador.

A continuación, y a título de ejemplo, se presenta la secuencia lógica en el caso de una central con un solo generador de vapor (a efectos de simplificar).

examen adicional del 100 % en cada generador de vapor o el examen se basará en análisis específicos para cada planta, que definan el límite tolerable de tubos con fuga.

Esta nueva clasificación de resultados, resulta lógica si se tiene en cuenta también, otra de las recomendaciones que hace referencia a la posibilidad de tratar las áreas ya degradadas de los generadores de vapor como conjuntos independientes del resto del haz tubular. Con este planteamiento, se parte de la base de que las zonas con degradación se inspeccionan al 100 % y sobre el resto del haz tubular se aplica la teoría del muestreo y clasificación de resultados, cuyo objeto principal es poner en evidencia, aquellas posibles áreas con degradaciones en estado incipiente.

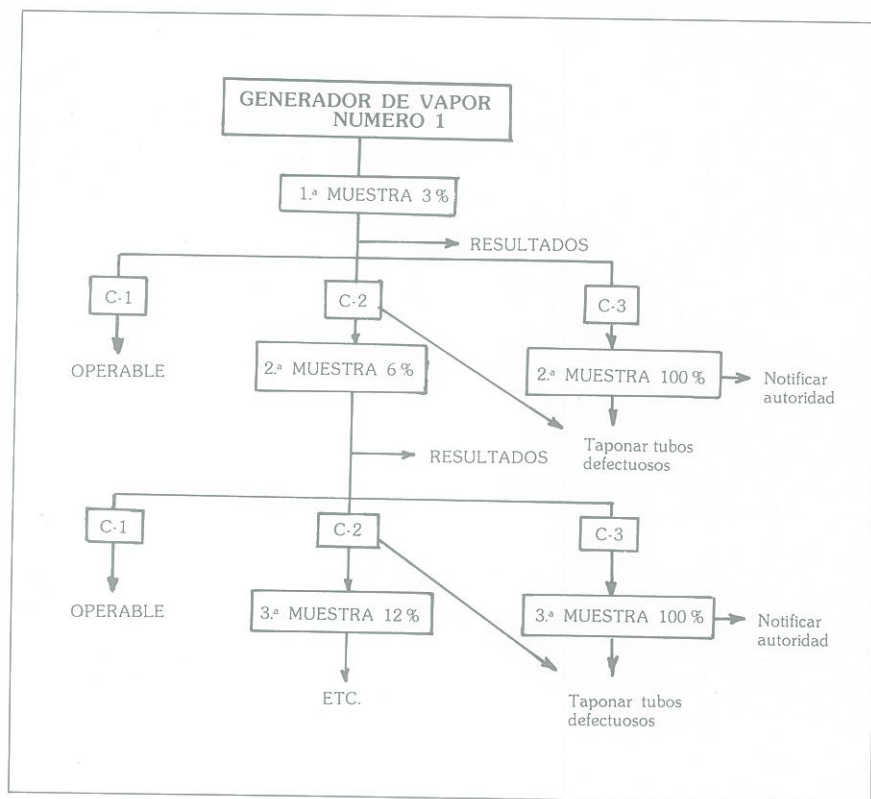
Frecuencia de la inspección

La primera inspección en servicio debe realizarse después de haber estado la central seis meses a plena potencia, pero antes del plazo de los veinticuatro meses naturales a partir de la criticidad inicial. Las siguientes inspecciones deben realizarse en plazos no inferiores a doce ni superiores a los veinticuatro meses. Dichos plazos pueden ampliarse hasta un máximo de una cada cuarenta meses, si en dos inspecciones en servicio consecutivas se demostrara que no existe ningún tipo de degradación, o sea que los resultados de ambas inspecciones caen en la categoría de C-1. Si estando en el anterior supuesto los resultados de alguna inspección fuesen de categoría C-3, debería volverse a efectuar inspecciones en servicio a intervalos máximos de veinte meses.

De acuerdo con los anteriores supuestos, y teniendo también en cuenta, que si en los resultados de las inspecciones en servicio anteriores, se demuestra que todos los generadores de vapor se comportan de modo similar, las siguientes inspecciones en servicio, se pueden realizar en un solo generador de vapor (en un sentido rotativo), podría suceder (en centrales de tres generadores de vapor) que cada generador no sufriera inspecciones en servicio en períodos hasta de ciento veinte meses, por ello una de las recomendaciones actuales de la NRC indica que cada generador debe ser inspeccionado por lo menos una vez cada cuarenta y ocho meses.

Asimismo, deben realizarse inspecciones en servicio no programadas siempre que:

- Se produzca una fuga máxima permitida por las Especificaciones. A este respecto, las recomendaciones de la NRC señalan que la inspección se realizará siempre que se pare la central para reparar, por causa de una fuga, independientemente de que se haya superado o no, la fuga máxima permitida por las Especificaciones. En estas fugas no se incluyen aquellas que sean debidas a tapones defectuosos.



En función de los resultados que se obtengan en esta primera muestra, puede que se requiera una segunda muestra y, a su vez, una tercera según analizaremos posteriormente.

Clasificación de los resultados de las inspecciones

Los resultados de la inspección de cada muestra se clasifican en alguna de las tres categorías siguientes:

Las nuevas recomendaciones, van dirigidas a simplificar esta lógica, reduciendo las tres categorías anteriores a las dos siguientes:

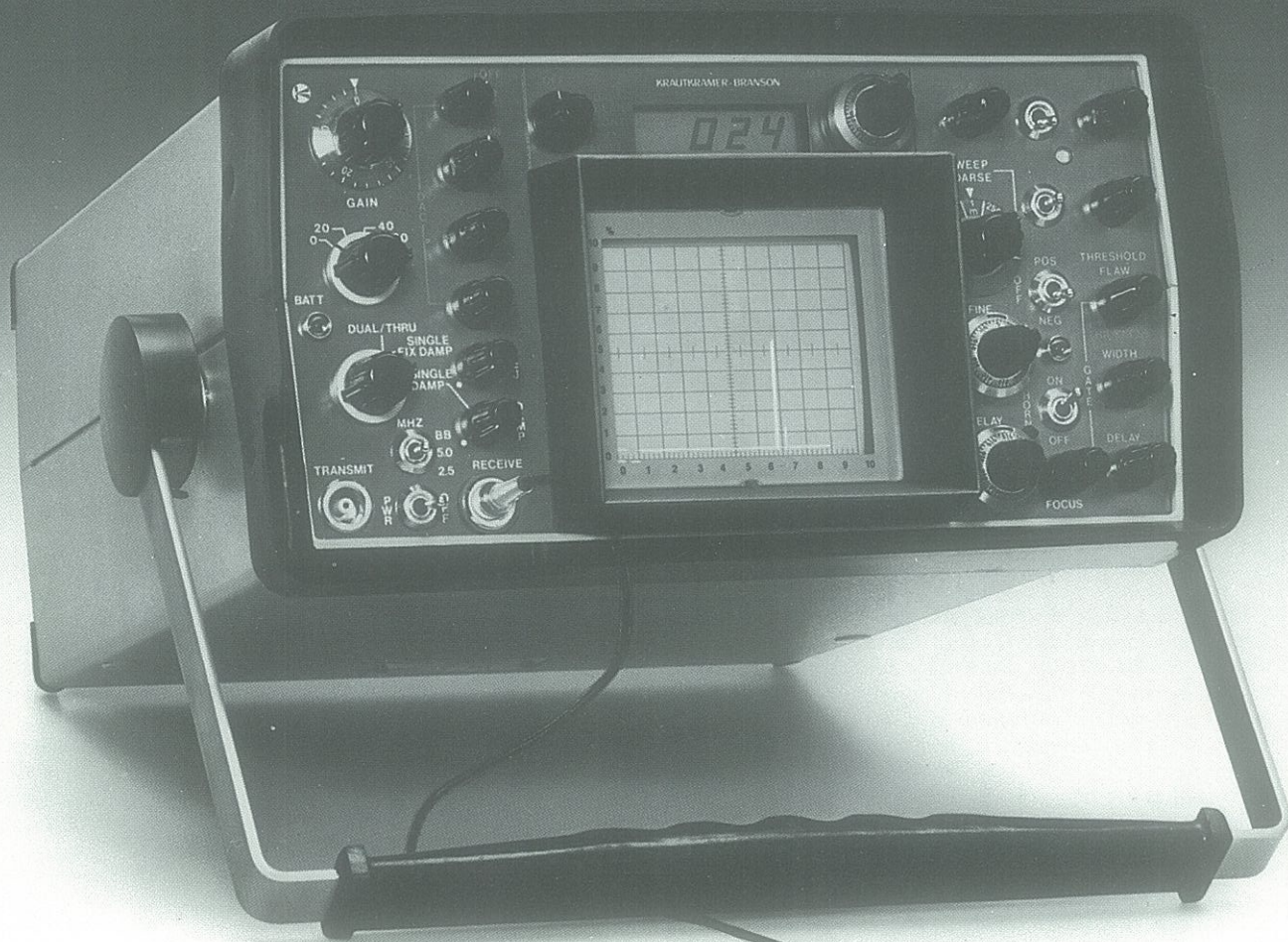
C-1 Ningún tubo defectuoso y menos del 5 % degradados.

C-2 Uno o más defectuosos o más del 5 % degradados.

De esta forma, si los resultados son C-1, los generadores de vapor estarán operables y si son C-2 se requerirá un

024

Este es uno de los aspectos buenos del USL-38 M



La representación digital simplifica enormemente la localización precisa, sobre todo al trabajar con palpador angular, y por tanto merece ser mencionada en primer lugar:

Mediante una simple conmutación se pide sucesivamente la distancia en recorridos del sonido, la distancia de proyección y la profundidad de la discontinuidad.

También vale la pena mencionar el sistema perfecto de ganancia variable (función DAC): La curva visible de compensación (cuya representación puede desconectarse durante el control normal) convierte el ajuste en un placer.

En unión del monitor incorporado, el sistema de ganancia variable permite incluso una evaluación en sí/no automática ya corregida en cuanto a distancia.

Logicamente, el USL-38 M dispone de una serie de otras funciones que se esperan de un equipo de ultrasonidos de alta calidad. ¡No dejen de conocer, por tanto, este equipo sorprendente — que no les defraudará!

Complementan nuestro programa de ventas:

- Equipos de rayos X Philips
- Equipos de Corrientes Inducidas Dr. Förster
- Equipos de Partículas Magnéticas Tiede
- Analizadores Leybold
- Espectrómetros Cladon

Para una mayor información o solicitar una demostración, diríjense a:

Krautkramer-Förster Española, S.A.
Calle Saturnino Calleja, 6 Madrid 2

- En caso de un suceso sísmico superior al sismo base de operación.
- Un accidente de pérdida de refrigerante que requiera la actuación de las salvaguardias tecnológicas, o
- Una rotura de la línea de vapor principal o la de agua de alimentación.

Técnicas de inspección

Lo que requieren las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento es que la inspección en servicio de los tubos de los generadores de vapor se realice aplicando el ensayo no destructivo de corrientes inducidas. Desde un punto de vista técnico, se exige cumplir con lo especificado en el código ASME, Sección V, artículo 8, apéndice 1. «Eddy Current examination method for installed non ferromagnetic steam generator heat exchanger tubing.»

Ahora bien, dada la complejidad de los fenómenos de degradación que se vienen produciendo en los haces tubulares (principalmente por el lado del secundario), en los últimos diez años, se ha producido un acelerado desarrollo de las técnicas no destructivas para su adaptación a la problemática de las inspecciones en servicio de los tubos de los generadores de vapor.

La técnica de corrientes inducidas monofrecuencia, de uso habitual hasta hace un par de años, ha dado paso (por sus limitaciones ante algunos fenómenos de degradación de los tubos, como por ejemplo, los defectos producidos en los tubos por rozamiento de estos con los baffles) al uso generalizado de la técnica de corrientes inducidas multifrecuencia, complementada en algunos casos con otras técnicas no destructivas como pueden ser la perfilometría (especialmente para los defectos de denting), radiografía, ultrasonidos, visuales con fibras ópticas o minicámaras y otras.

La diferencia fundamental entre la técnica monofrecuencia y multifrecuencia estriba en que mientras en la primera sólo es posible excitar el bobinado con una sola frecuencia (la que se considera óptima en cada caso, en función de lo que se intenta evaluar), con la segunda es posible excitar el bobinado (multiplexando o simultáneamente) hasta con cuatro frecuencias diferentes, seleccionar el modo de operar cada frecuencia (diferencial o absoluto) y obtener mezclas de los diferentes canales de información.

Desde un punto de vista práctico, lo anteriormente expuesto supone las siguientes ventajas de la técnica multifrecuencia sobre la monofrecuencia:

- Disminuir los tiempos de inspección, ya que con una sola introducción de la bobina se obtiene mayor cantidad de información (por ejemplo, información sobre los defectos en los tubos, las placas soporte y/o la altura de los lodos).
- Como consecuencia del punto anterior y para conseguir la misma cantidad de información, se reducen considerablemente las dosis recibidas a causa de la inspección.
- Mediante las mezclas, se hace posible eliminar las indicaciones indeseadas (como por ejemplo, las producidas por las placas soporte) mejorando la caracterización de los defectos que se superponen con las mismas.
- Al disponer de información con diferentes frecuencias y con diferentes métodos (diferencial y absoluto) se facilita la interpretación de aquellas indicaciones cuya relación causa-tipo de indicación no es biunívoca (por ejemplo, a una determinada frecuencia, una abolladura y un defecto exterior de pequeña profundidad producen el mismo tipo de indicación, pero, sin embargo, sus leyes de evolución con diferentes frecuencias es diferente).
- Se disminuye el error en la evolución al poder disponer de calibraciones en absoluto y diferencial paralelamente.

Entre las otras técnicas no destructivas aplicables, requiere mención especial la de perfilometría, especialmente aplicable cuando existe deformación de la pared del tubo, como es el caso que se produce cuando existe «denting».

Hasta hace unos pocos años, y ante una situación de «denting», se adopta la solución de taponar todos aquellos tubos, que no pasaba la bobina de inspección (de un tamaño definido), ello llevaba a tener que taponar un número determinado de tubos cuya gravedad se intuía, pero no era realmente conocida. Con el desarrollo de la perfilometría, actualmente es posible definir el perfil interior del tubo y realizar un estudio de tensiones de la pared del mismo, lo que

facilita el adoptar criterios de taponado más realistas, sin disminuir el margen de seguridad.

CONCLUSIONES

- Los haces tubulares de los generadores constituyen, sin duda, uno de los más vulnerables de las centrales PWR.
- Las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento de la central garantizan que se mantiene la integridad de los haces tubulares bajo todas las condiciones de operación o accidente postulado.
- La información que facilitan las inspecciones en servicio de los tubos de los generadores de vapor, sirve de base de partida para conocer si existe degradación o no del estado de los tubos, y en el supuesto de que dicha degradación existe, para conocer su incremento. En base a lo anterior, se podrán tomar medidas orientadas a contrarrestar la degradación y a evitar (taponando o reparando todos los tubos que se encuentren defectuosos) que se produzcan fugas en el siguiente período de operación, aumentando así la disponibilidad de la central.
- La técnica multifrecuencia de corrientes inducidas ha sustituido, por sus mayores posibilidades, a la técnica monofrecuencia para las inspecciones en servicio de los tubos de los generadores de vapor y, ante algunos fenómenos degradatorios, se hace necesario el uso complementario de otras técnicas no destructivas entre las que requieren mención especial la de perfilometría cuando existe deformación de la pared del tubo (denting).

Bibliografía

- Especificaciones Técnicas de Funcionamiento.
- Regulatory Guide 1.121, agosto 1976 «Bases for plugging degraded PWR Steam Generator Tubes».
- Regulatory Guide 1.83, julio 1975 «In-service Inspection of Pressurized Water Reactor Steam Generator Tubes».
- Draft NRC report «NRC Requirements Concerning Steam Generator Tube Degradation and Rupture Events».