



Joaquín LOZANO FIOL es Ingeniero Industrial por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona y Diplomado en Ingeniería Nuclear por el Instituto de Estudios Nucleares de la JEN. Es Jefe de Servicios Técnicos de Asociación Nuclear Ascó. En la actualidad es coordinador del Comité de Generadores de Vapor del Grupo de Propietarios PWR, preside el Comité de Dirección del Proyecto de Investigación sobre Generadores de Vapor y es el representante español en el "Steam Generator Reliability Project" de EPRI.

LA EXTENSION DE VIDA DE LOS GENERADORES DE VAPOR

J. LOZANO - J. M. ZAMARRON - G. BOLLINI



José María ZAMARRON CASINELLO es Ingeniero Electromecánico del ICAI. Diplomado en Ingeniería Nuclear por el Instituto de Estudios Nucleares de la Junta de Energía Nuclear y Master en Business Administration por el Instituto de Empresa. En la actualidad ocupa el puesto de Director Adjunto y Subdirector Técnico de Central Nuclear de Almaraz.

Gustavo-Julio BOLLINI MARAGGI es Ingeniero Electromecánico por la Universidad de Buenos Aires y Master of Technology of NDT por la Brunel University (Londres). Tiene el certificado CSWIP del Welding Institute, del Reino Unido, y el de Nivel III en ultrasonidos por la AEND. Miembro del British Institute of NDT y de la Sociedad Nuclear Española. Desde 1986 es el Jefe del Proyecto de Investigación sobre Generadores de Vapor y actualmente desempeña el puesto de Jefe de la División de Proyectos Especiales de TECNATOM, S. A.

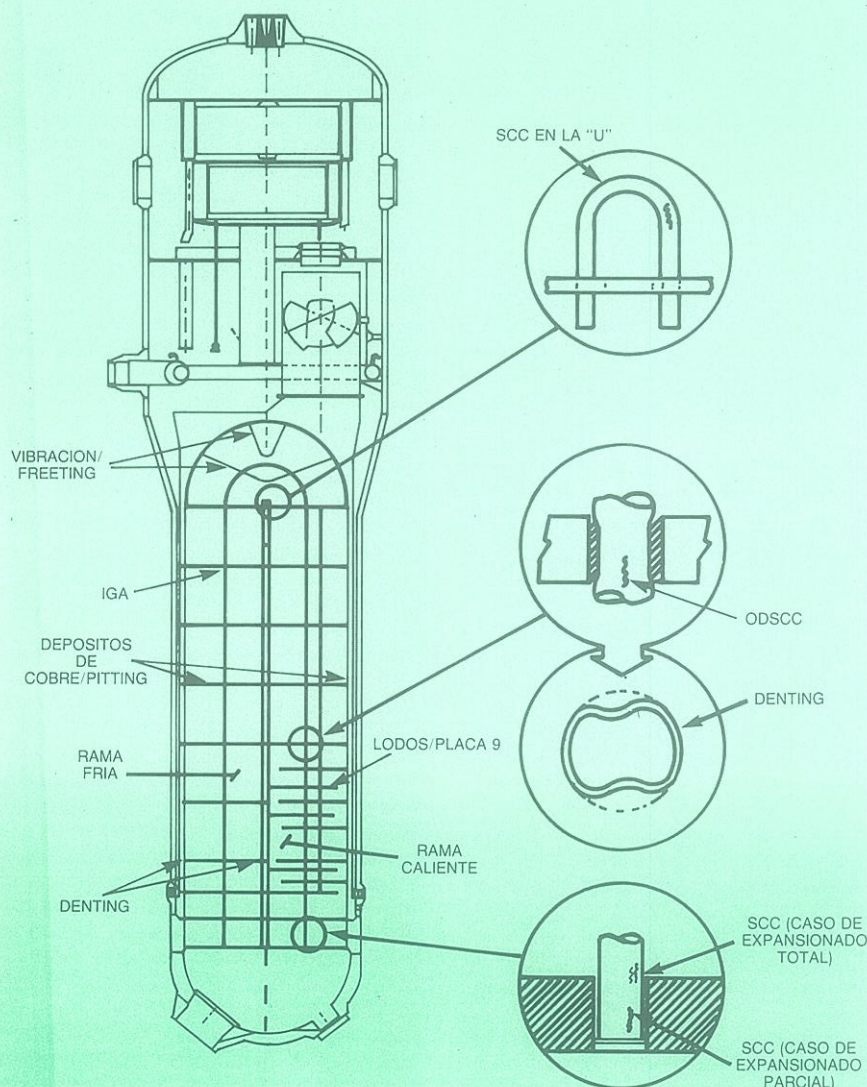
La experiencia de operación de algunos de los generadores de vapor de las centrales nucleares españolas muestra que los tubos de los mismos, que constituyen la segunda barrera a los productos de fisión, son susceptibles de daños mecánicos y de corrosión de una gran variedad de orígenes, siendo algunos de ellos los siguientes: desgaste químico (wastage), picaduras (pitting), ataque intergranular (IGA); agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC), agrietamiento por fatiga, desgaste mecánico (fretting), erosión/corrosión, deformación del tubo en placas soporte (dentting), etc., según se indica en la figura 1.

Estos problemas, que son comunes en muchas centrales en todo el mundo, han requerido la realización por parte de las centrales de numerosas inversiones (plantas de tratamiento de agua, sustitución de materiales del ciclo secundario como condensador y calentadores, etc.) y gastos (operación, inspección y mantenimiento) y han venido siendo causa de

indisponibilidad de las centrales afectadas.

Para identificar y desarrollar todas estas medidas preventivas y correctivas que se vienen aplicando, las centrales españolas han pasado durante este período por tres etapas sucesivas:

- En una primera etapa, la fuente fundamental de información y de propuesta de soluciones era el suministrador de la central que se basaba en sus propios programas de Investigación y Desarrollo.
- Posteriormente las centrales españolas participaron en grupo en el Programa de Investigación y Desarrollo del EPRI colaborando a su financiación.
- Finalmente las centrales españolas pusieron en marcha su propio programa de Investigación y Desarrollo en Generadores de Vapor, manteniendo su relación con los programas del EPRI y otros países basada en el intercambio de información.



F I Daños mecánicos y de corrosión en los generadores de vapor.

EL PROYECTO DE INVESTIGACION SOBRE GENERADORES DE VAPOR

Si bien las centrales españolas ya venían colaborando con anterioridad en proyectos puntuales de investigación, a partir de 1987 se puso en funcionamiento un proyecto multidisciplina que contempla en forma integrada los aspectos de mayor relevancia y cuyos objetivos principales son: mejorar la disponibilidad de las centrales, reducir los costes de ope-

ración y mantenimiento e incrementar la capacidad tecnológica de las empresas participantes.

La consecución de estos objetivos conlleva además a la extensión de vida de estos componentes, manteniendo los niveles de seguridad requeridos para su operación.

Las organizaciones participantes en el proyecto, además de las Centrales Nucleares y de las Empresas Eléctricas, han sido CIEMAT, ENSA y Tecnatom. El presupuesto total de la primera fase del proyecto ha sido de 1.650,53 Mptas., de

los cuales 780,41 Mptas., han sido financiados por OCIDE dentro del PIE, habiendo sido el resto del presupuesto aportado por las organizaciones participantes y por las Centrales Nucleares. En el desarrollo de alguna de las actividades del proyecto ha participado además, el Instituto Químico de Sarriá.

Las actividades realizadas dentro de este proyecto, cuya primera fase quedó completada en junio de 1991 han sido:

- Desarrollo de una base de datos con toda la información que afecta a cada generador de vapor y que se ha instalado en todas las Centrales Nucleares Españolas.
- Optimización y Adecuación de las técnicas de inspección en servicio de los tubos.
- Examen de los tubos extraídos en laboratorios preparados para este fin.
- Estudio del comportamiento de los materiales de los tubos frente a la corrosión en medio químico primario y secundario.
- Criterio de Taponado específico aplicable a cada tipo de defecto, que actualmente se está aplicando en las Centrales como alternativa a los requisitos de las especificaciones técnicas de operación.
- Evaluación de técnicas de mitigación y reparación como: limpieza química, taponado y encamisado de tubos.

RESULTADOS DE LA PRIMERA FASE DEL PROYECTO

La realización de estas actividades ha contribuido a extender la vida de los generadores de vapor afectados, manteniendo altos niveles de seguridad y disponibilidad en las plantas españolas, como lo demuestran las estadísticas de operación de los últimos años.

TECNICAS DE INSPECCION EN SERVICIO

Los desarrollos, llevados a cabo por Tecnatom, en relación con las técnicas de inspección en servicio, ha permitido establecer los niveles de detección de los distintos tipos de defectos presentes, así como determinar los errores de dimensionamiento de las técnicas de corrientes inducidas empleadas.

La aplicación de técnicas de inspección optimizada y validada con: tubos de calibración con defectos prototípicos, desarrollos de nuevos sensores, mezclas de frecuencias, etc., ha conllevado una mayor confiabilidad en los resultados de las inspecciones en servicio y a un conocimiento del estado de los tubos

más próximo a la realidad y en consecuencia también de la evolución de los distintos tipos de defectos, permitiendo evaluar entre otros, los resultados de las técnicas de mitigación aplicadas.

ANÁLISIS DE TUBOS EXTRAIDOS

Asimismo, el estudio de los tubos extraídos de los generadores de vapor en operación en laboratorios del CIEMAT que cuenta con equipamiento de alto contenido tecnológico y mediante la aplicación de las técnicas de análisis más avanzadas, ha permitido establecer los orígenes y morfologías de los defectos presentes y el comportamiento de estos materiales tanto en medios primario como secundario. Esta actividad tiene una relación importante con los estudios de corrosión llevados a cabo en el proyecto, como con las técnicas de mitigación empleadas porque permite constatar en los tubos reales los resultados de su utilización.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES FRENTE A LA CORROSIÓN

Dentro del proyecto se han diseñado, montado y puesto a punto dos circuitos dinámicos con recirculación, que permiten analizar por un lado, el comportamiento de los materiales en medio primario y por otro, en el medio secundario. Estos circuitos, que trabajan reproduciendo condiciones de presión y temperatura de las Centrales Nucleares, permiten analizar de forma paramétrica el comportamiento de los materiales de los tubos en distintos medios, variando la concentración de los distintos componentes. Así, en el caso del primario, se ha analizado la influencia de la concentración de hidrógeno, litio, boro y del pH del agua. En el caso del secundario se analiza la influencia de la química AVT en presencia de sulfatos, carbonatos, etc., y con adiciones de productos que presuponen una mitigación del avance de la corrosión, como es el caso del ácido bórico, así como química del secundario con fosfatos.

Las instalaciones existentes en el CIEMAT para estos estudios consisten, para el caso del estudio de la química del lado primario, de seis autoclaves con recirculación que admiten distintas composiciones de la química para su estudio comparativo. Para el caso del lado secundario existen seis maquetas que tienen las principales características de construcción de los modelos de generadores de vapor existentes en España, reproduciendo las condiciones químicas del lado primario (constante para las seis maquetas) y las del lado secundario (que cambian según el modelo de gene-

rador de vapor, condiciones químicas, contaminantes, etc.).

Los estudios permiten conocer las condiciones químicas más idóneas para hacer que la degradación por corrosión bajo tensión, si bien no pueda evitarse, pueda demorar su aparición y propagación.

CRITERIOS DE TAPONADO

Cuando se observa que el daño presente en los tubos del generador de vapor progresa en sus dimensiones, basado en resultados de inspección en servicio y supera determinados límites, el tubo o segmento de tubo es retirado de servicio, lo que ocurre también cuando la fuga del lado primario al lado secundario durante la operación de la Central excede un valor preestablecido. Los tubos o segmentos de tubos son retirados de servicio por taponado o por instalación de camisas en el área degradada, respectivamente.

Finalmente cuando el daño se extiende a un gran número de tubos que tienen que ser taponados, las condiciones de enfriamiento del núcleo del reactor requieren adoptar medidas tales como que se reduzca la potencia de generación de energía o que se reemplacen los generadores de vapor.

El criterio de taponado de tubos de generadores de vapor aplicado en las Centrales Nucleares Españolas, de acuerdo con las especificaciones técnicas de operación, se basa en una reducción máxima del espesor de la pared del tubo a un 40% de dicho espesor.

Este criterio ha sido establecido en la década de los 70, cuando los defectos observados en los tubos de los generadores de vapor eran principalmente debidos al desgaste químico (wastage) producido por acumulación de impurezas (lodos) en zonas con flujos de circulación muy bajos. Estos defectos se caracterizan por producir un desgaste de una manera más o menos uniforme en una amplia sección del tubo. El criterio no sólo tenía en cuenta el máximo espesor de pared que permitía soportar las condiciones de accidente más severas, sino que además incluía la velocidad de crecimiento de los mismos en un ciclo de operación y también el error de medida de las técnicas de corrientes inducidas empleadas para la inspección de los mismos, obteniéndose de esta manera el valor del 40% del espesor de pared máximo como límite para el taponado de los tubos.

Sin embargo, durante todos estos años se ha venido aplicando el mismo criterio de taponado para cualquier tipo de defectos, independientemente de sus características específicas, lo que ha

llevado a un taponado de tubos innecesarios en muchos casos.

Teniendo en cuenta la necesidad de establecer criterios de taponados específicos para, cada tipo de defectos, las Centrales Nucleares de Almaraz y Ascó, han obtenido el licenciamiento del criterio de taponado P*, para grietas por corrosión bajo tensión del lado primario localizadas justo por debajo de la zona de transición del expansionado de los tubos, que ha sido desarrollado por Westinghouse a comienzo de la década de los 80. Este criterio está basado en consideraciones geométricas y analiza el caso de rotura del tubo en esta zona y los posibles efectos sobre los tubos adyacentes.

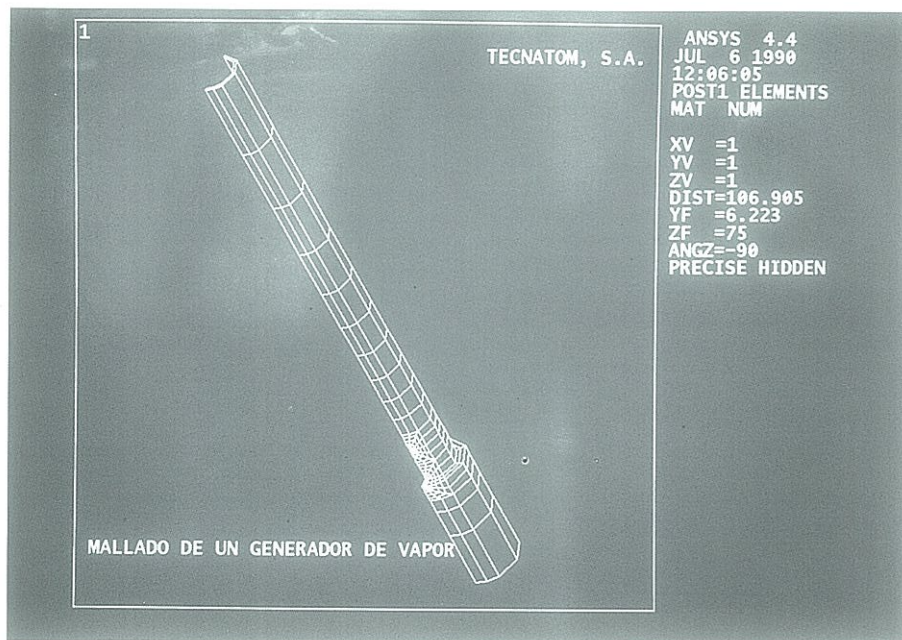
El criterio de taponado que se ha desarrollado en la primera fase del proyecto, por parte de Tecnatom y ENSA, siguiendo la misma línea de tener criterios de taponado específicos para determinados defectos y zonas del generador de vapor, es el denominado "fuga antes de rotura" para grietas por corrosión bajo tensión del lado primario en la zona de transición del expansionado.

Este criterio está basado por un lado, en permitir la presencia de grietas pasantes hasta una determinada longitud de grieta máxima admisible, teniendo en cuenta para su determinación el tamaño crítico de grieta calculado para las condiciones más severas de accidente, las características geométricas y mecánicas de los tubos, la velocidad de crecimiento de los mismos en un ciclo de operación y el error de medida de las técnicas de corrientes inducidas empleadas para la inspección de tubos. Por otro lado, el criterio está basado en el seguimiento de una fuga máxima admisible del lado primario al secundario en operación normal, que en caso de superarse lleva a la parada preventiva de la Central. En la figura II se muestra la modelización por elementos finitos de la zona del tubo bajo estudio y la figura III muestra el resultado de un ensayo de reventado de la misma zona.

La aplicación de estos criterios de taponado específicos ha permitido no taponar un gran número de tubos que, de aplicarse el criterio original sí deberían haberse retirado de servicio innecesariamente, y extender la vida no sólo de los generadores de vapor, sino de aquellos componentes del circuito secundario en que la calidad del vapor generado sea un parámetro de operación importantes y el cual está condicionado por el número de tubos taponados en el generador de vapor.

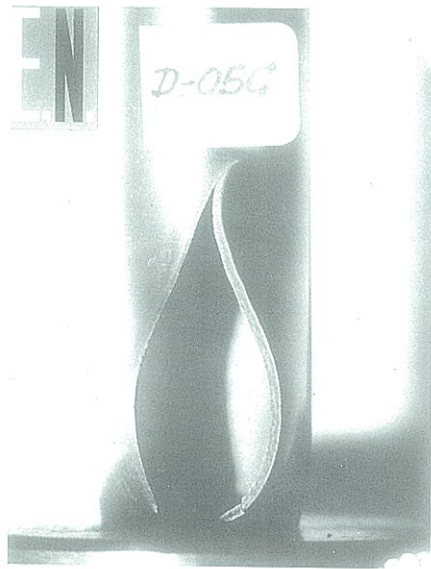
TECNICAS DE REPARACION Y MITIGACION

Unas de las actividades más significativas desde el punto de vista de la extensión



F II Modelización por elementos finitos de la zona del tubo bajo estudio.

F III Resultado de un ensayo de reventado.



cional: Westinghouse, Framatome, Combustion Engineering, ABB y KWU.

Los ensayos realizados por ENSA incluyeron: fugas, removilidad, perfilometría, fatiga, etc., que permitiría establecer el comportamiento de los distintos modelos de tapones en los distintos tipos de tubos (geometría y materiales) incluidos en la valoración.

Esta información técnica del comportamiento de los tapones ha contribuido para que el Grupo de Propietarios de Centrales tipo PWR haya podido seleccionar un suministrador principal para las campañas de taponado en las paradas de las centrales.

Desde el punto de vista de la evaluación de las técnicas de encamisado se ha establecido un programa conjunto con las organizaciones Laborelec, de Bélgica, y Swedish State Power Board, de Suecia, que tenían programas similares al establecido en el proyecto, lo que permitió una ampliación significativa tanto de los suministradores a cualificar como de los tipos de ensayos realizados.

Los suministradores que han participado con sus distintos modelos de camisas en esta evaluación conjunta han sido: Westinghouse (soldadura láser), ABB-CE, KWU, Framatome y Mitsubishi (soldadura láser). Los ensayos realizados por ENSA han sido de corrosión, estanqueidad, medida de tensiones residuales por difracción de rayos-x, perfilometría, etc.

Los resultados de esta evaluación ha permitido a las Centrales Nucleares Españolas aplicar esta técnica de reparación, que evita la retirada del servicio de los tubos con daños en las paradas para

recarga, conociendo el comportamiento de la unión camisa-tubo frente a la corrosión y en consecuencia su expectativa de vida. La aplicación de técnicas de encamisado es un ejemplo de las actividades desarrolladas para permitir un alargamiento de la vida de los generadores de vapor sin menoscabo de las condiciones de seguridad y operación de la planta.

Desde el punto de vista de las técnicas de mitigación se ha evaluado el proceso de limpieza química del lado secundario de los generadores de vapor, que permite la disolución y extracción de lodos y depósitos en las zonas de los tubos más sensibles a fenómenos de corrosión. Después de evaluar técnicamente los procesos de limpieza química existentes en ese momento entre los desarrollados por el EPRI, Edf, KWU, etc., se seleccionó el procedimiento de KWU como el más adecuado para someterlo a una evaluación en profundidad dadas sus características técnicas y de aplicación en la parada de la central.

Con la colaboración del Instituto Químico de Sarriá se han realizado una serie de ensayos con los reactivos para la limpieza de depósitos de hierro y de cobre para analizar su poder de disolución y extracción de lodos, limpieza de crevices, niveles de corrosión del material de los tubos y de los aceros presentes en el lado secundario de los generadores de vapor.

Esta técnica de mitigación ha sido aplicada en varias ocasiones en las Unidades I y II de las Centrales Nucleares de Almaraz y de Ascó, permitiendo la extracción en el lado secundario de kilogramos de lodos presentes en el lado secundario de los generadores de vapor, sales y productos contaminantes, lo que ha conllevado a la reducción de la progresión de defectos iniciados del lado secundario permitiendo un alargamiento de la vida útil de los tubos.

LA SEGUNDA FASE DEL PROYECTO DE INVESTIGACION SOBRE GENERADORES DE VAPOR

NECESIDAD DE LA SEGUNDA FASE

Conforme fue progresando el Proyecto de Investigación sobre Generadores de Vapor, con los resultados señalados, se fue haciendo patente la conveniencia de prolongarlo en una segunda fase por las siguientes razones:

- Finalizar actividades que no había sido posible completar durante la primera fase.
- Aparición de nuevos problemas no contemplados en la primera fase.

- Posibilidad de, en base a las capacidades adquiridas en la primera fase, iniciar desarrollos más innovadores.
- Necesidad de sustitución de alguno de los Generadores de Vapor de las Centrales Españolas.

ACTIVIDADES

Esta segunda fase comparte los objetivos y cuenta con los mismos participantes y organización interna que la primera fase y el período de realización previsto es de enero de 1991 a diciembre de 1995.

La segunda fase del Proyecto de Investigación sobre Generadores de Vapor, cuenta con 11 actividades cuyas Memorias se han ido presentando según se definieron:

- Criterios de taponado de tubos de generadores de vapor para grietas de corrosión bajo tensión del lado secundario en zona de placas soporte, grietas circunferenciales en zona de transición y defectos de desgaste mecánico en zona de barras anti-vibratorias.
- Generación por métodos aceleradores de defectos similares a los existentes en los tubos de los generadores de vapor con el fin de contar con procedimientos de fabricación y probetas para ensayos de reventado, fugas, etc., y para la validación y optimización de técnicas de inspección.
- Sistema de inspección por técnicas de ultrasonidos de los tubos de los generadores de vapor como complemento de la técnica de inspección, para configuraciones complejas de grietas y también para la inspección de camisas instaladas en tubos.
- Optimización y validación de las técnicas de inspección en servicio de los generadores de vapor, aplicadas a defectos de configuración compleja (axial-circunferencial).
- Participación en el programa internacional PISC-III, Acción 5: ensayos de integridad de generadores de vapor.
- Investigación sobre nuevos materiales para tubos de generadores de vapor.
- Creación de un modelo avanzado de predicción de la degradación de los tubos de los generadores de vapor.
- Sistema basado en técnicas láser para la inspección de tubos de generadores de vapor por su cara interna.
- Desarrollo de un procedimiento para la limpieza química del lado secundario de los generadores de vapor.
- Ensayos de corrosión de materiales típicos de tubos de generadores de vapor, que continuará con los trabajos sobre el comportamiento de los materiales de los tubos iniciados en la primera fase.
- Evaluación y optimización de métodos de expansionado de tubos de generadores de vapor.

- Evaluación de la técnica de reparación directa de tubos por soldadura láser aplicada a las zonas degradadas.

En la elaboración de todas estas memorias han colaborado todas las centrales nucleares afectadas, empresas eléctricas y entidades colaboradoras que tienen una relación directa con los Generadores de Vapor, por lo que supone en estos momentos, una relación completa de las actividades que la industria española considera que se debe trabajar en este campo.

El presupuesto de esta segunda fase asciende a un total de 1.733,87 Mptas., de los cuales se ha solicitado a OCIDE la financiación de 1.186,54 Mptas., dentro del PIE.

APLICACIONES PREVISTAS

En cuanto a las aplicaciones previstas para las actividades propuestas para la segunda fase del Proyecto de Investigación sobre Generadores de Vapor podemos distinguir entre los Generadores de Vapor actualmente en operación y los Generadores de Vapor de sustitución.

Generadores de vapor actuales

Según lo señalado, los generadores de vapor de las centrales de agua a presión: Zorita, Almaraz I y II, Ascó I y II, Vandellós II y Trillo, ya se están beneficiando en mayor o menor medida de los resultados del Proyecto de Investigación sobre Generadores de Vapor inicial.

Dado el interés que para todas las centrales tiene el estudio del impacto de los diferentes modos de operación sobre la corrosión de los tubos, se ha previsto su continuación en la ampliación del Proyecto con lo que se espera poder optimizar los procedimientos de operación de las Centrales.

También se han programado actividades similares a las del proyecto inicial que respondía a nuevos problemas planteados. Dentro de este capítulo se incluyen: la optimización de técnicas de inspección por ultrasonidos, el PISC-III, nuevos criterios de taponado y la generación de defectos específicos.

Por último se han propuesto actividades que en base a las capacidades adquiridas en el proyecto original, permiten el desarrollo de productos innovadores en las áreas del modelo de degradación, inspección y reparación por láser y limpieza química.

Todos estos proyectos responden a necesidades planteadas por los generadores de vapor de las centrales tipo PWR en operación en España.

Generadores de vapor de sustitución

A pesar de todos los esfuerzos realizados

en los trabajos de investigación y desarrollo y a las significativas medidas implantadas en las centrales nucleares, los generadores de vapor de las centrales nucleares de la segunda generación (Almaraz I y II, y Ascó I y II) deberán ser sustituidos a medio plazo. En la actualidad, el período en que los cambios están previstos es entre 1995 y 1998. Las centrales de la misma época en todo el mundo han tomado o tendrán que tomar una decisión similar.

Se puede considerar, sin embargo, que estos esfuerzos realizados han contribuido a que la vida de estos equipos, si bien no alcance los 40 años inicialmente previsto, ronde los 15 años a pesar de los muchos e importantes problemas que se han planteado, manteniendo los niveles de seguridad requeridos en la operación. Además, los generadores de vapor que van a ser sustituidos requieren una atención continuada, incluida investigación y desarrollo, hasta que se materialice su sustitución.

Por lo que se refiere a los nuevos generadores de vapor de sustitución, muchas de las actividades del Proyecto de Investigación sobre Generadores de Vapor dirigidas a los generadores de vapor actuales, les son también aplicables y están sirviendo de gran ayuda en la especificación y evaluación de los nuevos equipos y serán de aplicación en el futuro en el control de su fabricación y, finalmente, en su operación. Las más destacables en este sentido son los ensayos de corrosión de los nuevos materiales, la limpieza química, la evaluación de las tensiones residuales en las zonas expansionadas de los tubos, etc.

Adicionalmente se han propuesto actividades enfocadas exclusivamente a la selección, fabricación y explotación de los nuevos generadores de vapor.

CONCLUSIONES

El Proyecto de Investigación sobre Generadores de Vapor, en su primera fase, cumplió satisfactoriamente con los objetivos de facilitar la operación de los generadores de vapor actuales, aumentar la capacidad técnica de la empresa española en este campo y permitir el alargamiento de vida de los generadores de vapor más seriamente afectados, manteniendo los niveles de seguridad y disponibilidad requeridos.

Las actividades adicionales propuestas están encaminadas a continuar esta labor de protección de los generadores de vapor actuales y a colaborar en la selección, fabricación y explotación de los que deben ser sustituidos. Todo ello en un grado de innovación superior.