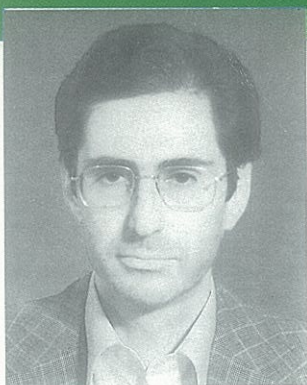




Adolfo MARTINEZ FLOREZ es doctor Ingeniero del ICAI, promoción 1963. Contratado por Unión Eléctrica Madrileña en 1965, fue asignado al seguimiento del proyecto de la CN José Cabrera en las oficinas y fábricas de Westinghouse en USA hasta 1967 en que se incorporó al equipo de puesta en marcha de la central, en cuya plantilla de explotación permaneció hasta enero de 1971 como Ingeniero de Resultados. En 1972 fue contratado por Westinghouse Nuclear Española y asignado al proyecto de Lemóniz, que dirigió en Bilbao y posteriormente en Madrid, hasta su congelación en 1982. Se hizo cargo posteriormente de la dirección del proyecto de Sayago, la gestión de compras de la empresa y la dirección del proyecto de modificaciones de la CN José Cabrera, siempre dentro de Westinghouse. En 1986 fue contratado por ENHESA Servicios, S. A., como director técnico, cuyas funciones desempeña en la actualidad.

# REDUCCION DE TENSIONES RESIDUALES EN TUBOS DE GENERADORES DE VAPOR MEDIANTE TRATAMIENTOS TERMICOS LOCALES

A. MARTINEZ FLOREZ

## INTRODUCCION

Un factor que influye significativamente en la disponibilidad de los generadores de vapor de las centrales PWR es la fisuración de los tubos causada por la corrosión bajo tensiones (CBT) iniciada desde el lado primario. En gran número de centrales en operación se ha hecho necesario poner fuera de servicio aquellos tubos en los que se habían detectado fisuras o incluso fugas del primario al secundario, por esta causa.

Se describe en este artículo el origen de estos problemas, las técnicas desarrolladas por la Industria para corregir o aminorar sus efectos, y la experiencia de su aplicación en las Centrales españolas.

## ORIGEN Y LOCALIZACION DEL PROBLEMA

En los casos en que se produce, la corrosión se manifiesta en forma de microgrietas muy cerradas, iniciadas desde la superficie interior de los tu-

bos, orientadas axialmente. Cuando no se aíslan los tubos afectados mediante taponado, estas grietas se propagan a través del espesor de pared dando lugar a fugas de pequeña magnitud.

La investigación metalúrgica llevada a cabo sobre muestras de tubos extraídos de generadores de vapor en operación, indicó que el mecanismo de iniciación y propagación de las grietas es la corrosión intergranular bajo tensiones.

Se han realizado multitud de experimentos y simulaciones del proceso en laboratorio, que indican, como factores que contribuyen a la CBT por el lado primario los siguientes:

- La microestructura del material en cuestión.
- Las altas temperaturas de operación.
- La presencia de altas tensiones/esfuerzos en el material.

No se ha podido correlacionar, sin embargo, el fenómeno de CBT con la presencia de ningún producto químico específico presente en el refrigerante pri-

mario, que pudiera actuar como agente corrosivo, por lo que se supone que el propio refrigerante actúa como agente corrosivo, de forma similar a como se comporta el agua pura.

Las condiciones enumeradas más arriba se dan, en los generadores de vapor, con distinta incidencia relativa, por lo que se presenta una variedad de situaciones en cuanto a la localización de las indicaciones en los tubos y en cuanto al ritmo al que progresan una vez iniciadas, que puede variar entre unos pocos meses y ocho o diez años. Por lo que respecta a la estructura del material, el problema se da específicamente en tubos de Inconel-600 recocidos en origen.

Este material ha sido utilizado extensamente en generadores de vapor de distintos fabricantes en todo el mundo, incluidos los de las centrales españolas de Almaraz, Lemóniz y Ascó.

La temperatura es un factor esencial en el proceso, que determina el que la gran mayoría de las indicaciones se dan sólo en la rama caliente de los tubos, por lo que una reducción en las temperaturas de operación de la unidad podría, en principio, por sí sola corregir el problema de CBT. Este método correctivo, no obstante, no es el más deseable, por cuanto se traduce en una reducción de la potencia térmica de la unidad.

La presencia de tensiones en el material es también un condicionante del proceso. Los ensayos de corrosión acelerados indican que reduciendo las tensiones residuales, que proceden de los procesos de fabricación, se aumenta de forma muy efectiva la resistencia del material a CBT, alargando la vida útil de los tubos.

Las zonas en que se da esta concentración de tensiones residuales, por orden de importancia, son:

- Las zonas sometidas a expansión contra la placa tubular para hacer una unión estructural entre ésta y los tubos. Este efecto es especialmente acusado en las zonas de transición entre secciones expansionadas y secciones libres, como suele ser el caso en la parte superior de la placa tubular, y es tanto más acusado cuanto más brusca sea esta transición.
- Las partes curvadas de los tubos. El proceso de doblado en frío introduce tensiones residuales, tanto mayores cuanto menor es el radio de curvatura, y que son máximas en el punto de tangencia en que termina la operación de doblado, y en el punto medio de la U, en la generatriz externa. Este efecto es muy acusado en los tubos de la primera fila (los de curvatura más cerrada), mucho menor

en los de la segunda fila y poco significativo a partir de la tercera.

- Las intersecciones de tubos con sus placas soporte en presencia de *denting*, esto es, de una concentración de productos de corrosión de las propias placas o de otra procedencia que se acumulan en el intersticio entre éstas y los tubos y, al crecer, deforman el tubo ovalizándolo hacia el interior, lo que produce tensiones residuales de tracción muy localizadas.

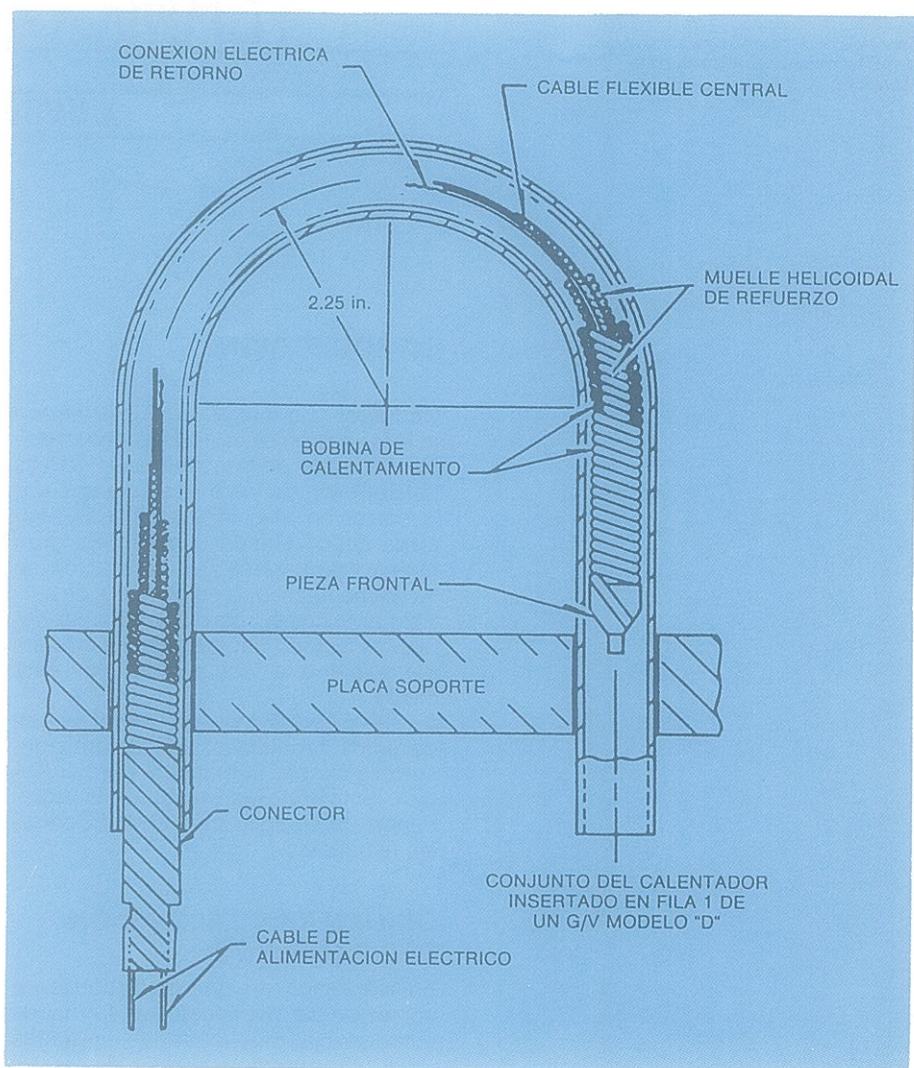
La identificación de estos procesos de corrosión y de sus causas y localización ha llevado a los diseñadores de generadores de vapor a introducir cambios en el material de los tubos, que ahora son sometidos a tratamiento térmico posterior a la fabricación; en el material de las placas soporte, que ahora son de acero inoxidable, y en la geometría de las intersecciones de éstas con los tubos, que ahora presentan

puntos de apoyo para restringir el movimiento de los tubos sin producir un espacio anular muy confinado en que puedan acumularse a presión los productos de corrosión.

Tales modificaciones han sido introducidas en los generadores de vapor de diseño más reciente, como son los de las centrales de Sayago y Vandellós II. Para los generadores que entraron en servicio anteriormente se han desarrollado técnicas para aplicación *in situ* que consiguen aumentar eficazmente la resistencia de los tubos a la CBT, prolongando su vida útil de forma muy significativa. Estas técnicas tienen el común objetivo de disminuir las tensiones residuales en el material, ya que éste es el único factor condicionante del proceso de CBT que puede modificarse mediante procesos en campo y sin afectar al rendimiento térmico de la unidad.

Se ha demostrado asimismo que, aunque las tensiones producidas por el

**F I** Calentador para tratamiento de las UES



funcionamiento en condiciones de servicio vienen a sumarse a las tensiones residuales de tracción procedentes de la fabricación, la disminución o supresión de las últimas es suficiente para minimizar la propensión del material a la corrosión bajo tensiones.

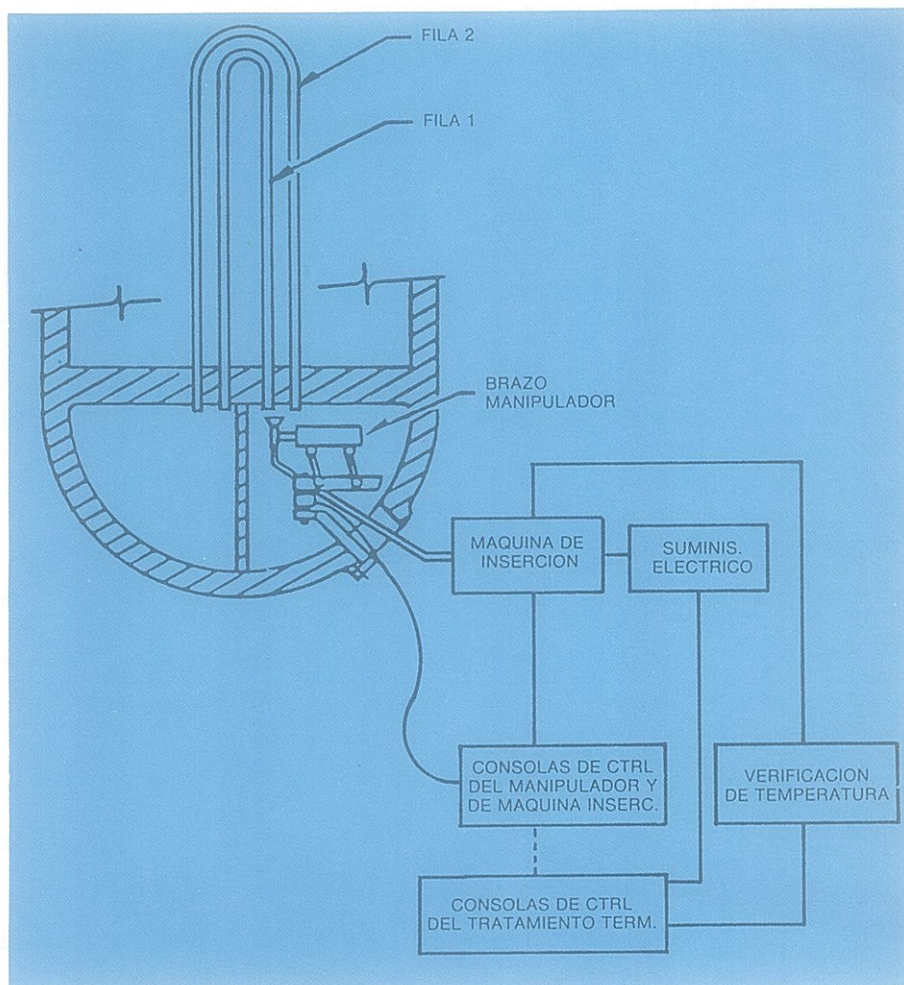
## TECNICAS UTILIZADAS PARA EL ALIVIO DE TENSIONES

Aunque la condición que se trata de corregir es la misma en las distintas partes de los tubos que conservan tensiones residuales, se han desarrollado técnicas especiales para el alivio de estas tensiones, adaptadas a cada zona de susceptibilidad, que se describen a continuación.

- En las zonas de los tubos expansi-nadas contra la placa tubular, las técnicas de tratamiento térmico son inviables por cuanto la placa tubular constituye un sumidero de calor por conducción de gran capacidad, que obligaría a utilizar potencias térmicas muy elevadas. Esto llevaría, en la práctica, a someter a la placa tubular al mismo tratamiento térmico que los tubos, lo cual es inaceptable tanto desde el punto de vista metalúrgico como de ejecución en campo. Para estas zonas, por tanto, se han desarrollado técnicas de alivio de tensiones por procesos mecánicos que se han utilizado masivamente con éxito en buen número de generadores, incluyendo los de las centrales españolas de Almaraz y Ascó. Estos procesos, que básicamente consisten en someter la superficie interior de los tubos en las zonas susceptibles a microgranallado (*shotpeening*) con granalla finísima, o bien a la acción rotatoria de unos mecanismos con aletas radiales así mismo portadores de bolitas que se centrifugan a gran velocidad contra la superficie (*rotopeening*), consiguen modificar la distribución de tensiones residuales en el espesor del material, haciendo que en la superficie interior cambien de tracción a compresión. Esto aumenta en gran medida su resistencia a la corrosión en aquellos tubos en que no se hubieran iniciado microgrietas anteriormente.

Los procesos mecánicos para alivio de tensiones no son objeto de este artículo y no nos ocuparemos de ellos en adelante.

- En las zonas curvas de los tubos, pertenecientes a las dos primeras filas (las de menor radio de curvatura), dada la geometría de las superficies a tratar y su difícil acceso desde las cajas de agua del generador de vapor, se planteó la necesidad de desarrollar alternativas a los proce-



F II Configuración conceptual del sistema para tratamiento de las UES

sos mecánicos, que parecían muy difíciles de llevar a la práctica en campo.

Esto dio lugar a la homologación y puesta a punto por parte de Westinghouse de un proceso de tratamiento térmico especialmente adaptado a la zona en cuestión, denominado UBHT (*U-Bend Heat Treatment*).

El proceso consiste en introducir un calentador eléctrico flexible en el tubo a tratar (Fig. 1), posicionarlo centrado sobre la zona curva, y someter a ésta a un ciclo de calentamiento que mantenga su temperatura dentro de un intervalo y por un tiempo predeterminados.

El equipo con el que se lleva a cabo incluye brazos posicionadores, mecanismos de empuje y posicionamiento axial, fuentes de alimentación eléctrica regulables, automatizadas, equipos para medida de temperaturas y para calibración *in situ*, y consolas de mando para el control y vigilancia del proceso, registro de datos, etc. (Fig. 2).

La optimización del proceso en campo exige el montaje y desmontaje rápido de todo el utillaje, así como la selección óptima del ciclo de potencia de alimentación al calentador que garantice la relajación de tensiones sin producir cambios metalúrgicos ni otros efectos nocivos en el material. El objetivo del tratamiento, como resultado de todos los ensayos previos de homologación, es conseguir el calentamiento de la zona curva, ampliada al menos en 0,5 pulgadas más allá del punto de tangencia en cada rama, a una temperatura comprendida entre 700 °C y 815 °C (rojo cereza) durante un período de cinco a siete minutos.

Los mecanismos de transmisión de calor que influyen en el proceso termodinámico son la radiación y la convección, en que la disipación de calor por radiación constituye el 90 % del total, siendo la conducción de calor a lo largo del tubo despreciable. Por esta razón el parámetro principal en función del cual ha de



#### **DIVISION NUCLEAR**

- Descontaminación
- Gestión de lavandería
- Tratamientos de superficie
- Pruebas hidrostáticas
- Desmantelamiento de instalaciones contaminadas
- Apoyo en recargas de combustible

#### **DIVISION INDUSTRIAL**

- Mantenimiento en paradas de instalaciones
- Puesta en marcha
- Limpieza industrial

#### **OTROS SERVICIOS**

- Mantenimiento de instalaciones en edificios
- Rehabilitación de edificios
- Jardinería y paisajismo



# EUROCIVIL

Albasanz, 79. 28037 MADRID. Teléfono 410 08 48  
Télex 48194 EURC. Fax 419 42 66

establecerse la potencia de alimentación para conseguir y mantener la temperatura deseada es la emisividad del tubo (ver Nota 1). La secuencia de operación es la siguiente:

1. Insertar un calentador en un tubo y realizar un ciclo de calentamiento de prueba, midiendo la tensión e intensidad suministradas una vez alcanzado el equilibrio térmico.
2. Medir la temperatura de la pared del tubo y, mediante la ecuación de equilibrio térmico, determinar la emisividad.
3. Una vez conocida la emisividad del tubo, resolver la ecuación de equilibrio térmico introduciendo en ella, como dato de partida, la temperatura deseada para el tratamiento, y determinando la potencia a suministrar al calentador.
4. Llevar a cabo el proceso iterativo descrito en los puntos 1 a 3 anteriores en un número suficiente de tubos, para cada generador de vapor, para disponer de un conjunto de medidas estadísticamente válido, en función del cual determinar los parámetros del tratamiento a aplicar a ese generador. De esta forma se toman en consideración las variaciones de temperatura axiales y circunferenciales a lo largo de cada U, la precisión de las medidas y las pequeñas variaciones de emisividad entre tubos de un mismo generador.
5. Realizar el tratamiento sistemático de los tubos de las dos primeras filas utilizando los parámetros específicos para cada generador.

La mejor garantía de que el calentamiento se da dentro del rango de temperaturas especificado, es el que dicha temperatura se mide directamente (paso 2 de la secuencia anterior), mediante un pirómetro óptico remoto que "ve" la temperatura en el punto de tangencia a través de un cable de fibra óptica de cuarzo cuya lente está situada inmediatamente debajo del calentador. Para realizar dicha medida, una vez que se han alcanzado condiciones estacionarias, se hace avanzar súbitamente el conjunto del calentador en dirección axial unos 9 cm, lo que sitúa la lente de la fibra óptica directamente enfrentada al punto de tangencia. (La medida así realizada ha de ajustarse mediante factores de corrección empíricos que tienen en cuenta el pequeño retardo en la medida y el enfriamiento producido por la propia sonda).

- La tercera zona de susceptibilidad a la corrosión bajo tensiones son las

intersecciones de los tubos con las placas soporte en presencia de *denting*.

También para este caso Westinghouse ha desarrollado técnicas de tratamiento térmico en campo para centrales en operación que producen relajación de las tensiones residuales y aumentan su resistencia a la corrosión. Dichas técnicas deben ir acompañadas de tratamientos químicos, por el lado secundario del generador, que detengan la progresión del *denting*, ya que de no ser así, volverían a aparecer nuevas tensiones con el transcurso del tiempo, anulando en parte el efecto beneficioso del tratamiento.

Aunque el tratamiento térmico en las intersecciones tubos/placa (T/TSPHT) actúa de forma semejante al tratamiento en las zonas curvas, las condiciones termodinámicas del proceso difieren considerablemente en ambos casos. Esto, unido al volumen de intersecciones a tratar en algunos generadores en que el *denting* es generalizado, ha obligado a desarrollar y homologar técnicas y utillaje especiales que permiten dar tratamientos múltiples simultáneos, reduciendo el tiempo de aplicación del proceso.

A diferencia del tratamiento de las Ues, en que la mayor parte del calor disipado por el tubo es irradiada, en las intersecciones tubo/placa, la placa actúa como un sumidero puntual de calor, por conducción, muy eficaz. Como el tratamiento debe extenderse ligeramente por encima y por debajo de la zona deformada del tubo, el proceso debe producir una distribución de potencia térmica que tenga en cuenta esta disipación de calor no uniforme y mantenga toda la zona del tubo a tratar (unas dos pulgadas) dentro del rango de temperaturas en que el tratamiento es eficaz (675-870 °F), durante un intervalo de cinco minutos.

Debido a que las condiciones de transmisión de calor pueden variar sensiblemente de unas intersecciones a otras en función de la naturaleza de los productos de corrosión, y de su distribución en el intersticio tubo/placa, se hace necesario, al comienzo del proceso, realizar un mapa del generador de vapor en que se determinen los parámetros del proceso específicos para alcanzar, en cada zona, la temperatura deseada. Esta fase inicial incluye numerosas medidas reales de temperatura mediante pirómetros ópticos remotos y transmisión por fibra óptica, similares a los utilizados en el tratamiento de las Ues.

Considerando además que las placas no deben ser objeto de trata-

miento térmico, y que su temperatura "sigue" a la del tubo con un retardo pequeño dada la excelente conducción del calor, no llegan a alcanzarse condiciones de equilibrio térmico a potencia constante de calentamiento, sino que la fuente de calor debe alimentarse con potencia variable (descendente) que tenga en cuenta el calentamiento progresivo de la placa durante los cinco minutos del proceso. Esto constituye otra característica del tratamiento, no presente en el tratamiento de las Ues.

Estas consideraciones han llevado a utilizar una fuente de calor de pequeñas dimensiones, que da una concentración lineal de potencia muy superior a la del calentador utilizado en el tratamiento de las Ues.

El problema de la disipación no uniforme de calor a lo largo de la longitud de tubo a tratar se ha resuelto introduciendo un nuevo parámetro en el proceso: se imprime al calentador un movimiento axial de vaivén durante el calentamiento, controlando los tiempos de permanencia en las distintas zonas para conseguir una distribución axial de temperaturas dentro de la banda prescrita. La pauta de este movimiento puede modificarse en función de las condiciones de transmisión de calor del tubo, y se controla automáticamente durante el proceso. Una pauta típica puede ser 2-1-2-1, es decir, dos segundos por encima de la placa, un segundo a la altura de la placa, dos segundos por debajo y un segundo a la altura de la placa, repitiéndose el ciclo durante los cinco minutos del tratamiento.

En función del número de intersecciones a tratar y del tiempo disponible durante la parada, el tratamiento puede hacerse tubo a tubo, como es práctica normal en el tratamiento de las Ues, o bien mediante mecanismos multisonda, capaces de tratar varios tubos a la vez, y de brazos manipuladores adecuados para situar dos mecanismos multisonda sobre la placa. Las consolas de control permiten el mando individual o agrupado de cada una de las sondas y su posicionamiento hasta cubrir todas las zonas del haz tubular a tratar.

## VALIDACION DEL PROCESO

La validación del proceso completo se realizó desde varios puntos de vista, incluyendo aspectos metalúrgico, de utillaje, de posibilidad de inspeccionabilidad posterior, de ahorro de dosis y de seguridad, y esto para cada uno de los sistemas de tratamiento, en las Ues y en las intersecciones tubo/placa,

aunque la validación de procesos para este último tratamiento se ha beneficiado de muchas de las conclusiones alcanzadas en el primero.

## VALIDACION DEL PROCESO METALURGICO

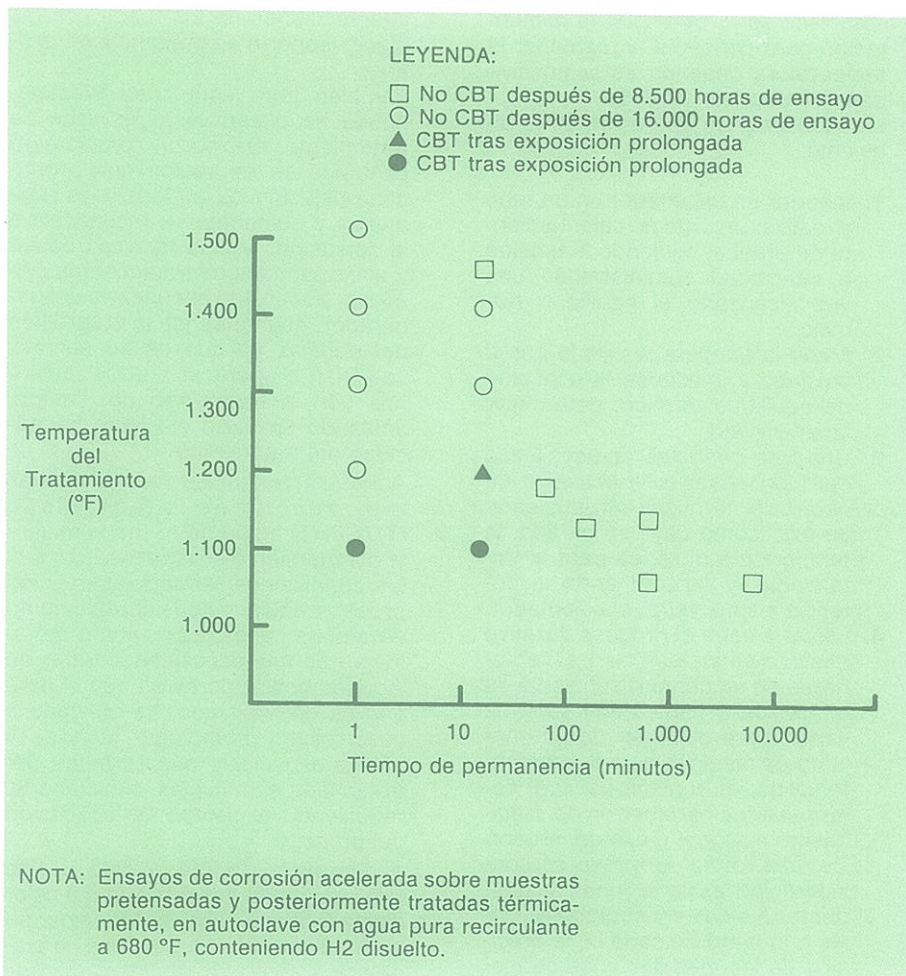
Para ello se procedió a someter a tratamiento térmico, a diferentes temperaturas y durante tiempos variables, una gran serie de probetas pretensadas de materiales considerados susceptibles de sufrir corrosión bajo tensión. Dichas probetas fueron posteriormente sometidas a procesos de corrosión acelerada en autoclaves de acero inoxidable donde se simulaban condiciones ambientales varios órdenes de magnitud superiores a los del refrigerante del núcleo desde el punto de vista de la agresividad del medio. La observación de estos juegos de probetas condujeron a la selección de los parámetros óptimos del proceso en cada caso. La figura III muestra la relación entre tiempo/temperatura y eficacia del tratamiento frente a la corrosión bajo tensiones, para tubos en U.

La validación del proceso para el tratamiento de las intersecciones tubo/placa incluye además la determinación de los parámetros específicos de este proceso, como la potencia de la lámpara a utilizar, en función del espesor y densidad de la magnetita en el espacio anular, la pauta de oscilación axial para lograr la distribución de temperatura adecuada en cada caso, etc.

## HOMOLOGACION DE LAS HERRAMIENTAS Y RESTO DEL EQUIPO

Antes de iniciarse el proceso de cualificación se establecieron las exigencias funcionales que deberían cumplir herramientas y resto del equipo. A partir de ahí se procederá al diseño y fabricación de los mismos y posteriormente a la cualificación con objeto de demostrar que el equipo utilizado podría cumplir su misión alcanzando o excediendo los criterios de diseño establecidos. El programa de cualificación seguido cubrió las siguientes fases y objetivos:

- Pruebas de herramientas (calentadores, mecanismos de introducción, etc.) para verificar los parámetros del proceso.
- Comprobación del funcionamiento conjunto del brazo posicionador, cabezal de trabajo y empujador de sonda. Verificación de la precisión del sistema de posicionado del calentador. Verificación de los sistemas de iluminación y visión remota (TV).
- Verificación de la precisión del sistema de localización de los puntos de tangencia y placas soporte de tubos.



F III Influencia de la duración y temperatura del tratamiento sobre la resistencia a la corrosión tubos en U

- Correlación entre potencia disipada por el calentador y temperatura resultante en el tubo.
- Determinación de la vida media de los calentadores.
- Evaluación del efecto de la humedad condensada en el lado secundario sobre el proceso.
- Efecto de compresión axial producida por el crecimiento del tubo al calentarse entre dos intersecciones con *denting*, etc.
- Efecto recíproco del tratamiento simultáneo de tubos contiguos sobre éstos y sobre las placas.

## POSIBILIDAD DE INSPECCION TRAS EL TRATAMIENTO TERMICO

Se realizaron series de ensayos de los tubos mediante Corrientes Inducidas para determinar el efecto del tratamiento térmico sobre la inspeccionabilidad de los tubos del generador en la zona de la U. El objetivo de estos ensayos era determinar si el tratamiento térmico introduce señales adicionales o altera la firma magnética existente, como

consecuencia de la capa de óxido producida, hasta el punto de dificultar o impedir la inspección. Los ensayos anteriormente mencionados se llevaron a cabo en laboratorio y en campo sobre tubos de distinto diámetro y espesor de pared, antes y después del tratamiento térmico.

La conclusión a que se ha llegado es que el tratamiento térmico de los tubos no afecta a los resultados de las inspecciones por corrientes inducidas realizadas hasta ahora de forma general en los mismos.

## REDUCCION DE DOSIS

Con objeto de limitar la exposición del personal al máximo se ha considerado como objetivo de diseño fundamental el cumplimiento con el criterio ALARA. En este sentido se han tomado dos decisiones de principio:

- La utilización al máximo de sistemas robotizados, habiendo sido utilizado en el caso de las plantas españolas el sistema SM-10-W para el trata-

miento de las Ues, que no precisa saltar a las cajas de agua para su instalación.

El tratamiento de las intersecciones tubo/placa con cabezales múltiples requiere la utilización de robots con mayor capacidad de carga que el SM-10, como pueden ser Vermaat o ROSA.

- Mantener la gran mayoría del personal participante fuera de la zona controlada. Sólo doce personas de las cuarenta y seis que constituyen el equipo deben pisar por absoluta necesidad la zona controlada durante el desarrollo de los trabajos.

Las estaciones de control, donde desarrollan su trabajo los operadores de consola, técnicos de Garantía y Control de Calidad, asesores técnicos, jefe de turno, etc., se instalaron tanto en Almaraz como en Ascó en la Sala de Penetraciones Eléctricas del edificio de Salvaguardia.

## EVALUACION DE SEGURIDAD

La evaluación del impacto del tratamiento térmico de la U en la integridad de los tubos del Generador y de las placas soporte se ha basado en una combinación de análisis de modelos mediante elementos finitos, otras técnicas de análisis convencional y ensayos de campo y en laboratorio.

Las conclusiones más importantes de las evaluaciones anteriores muestran que: el tratamiento térmico de la U no introduce tensiones adicionales o factores de fatiga en los tubos, el efecto de los óxidos formados como consecuencia del proceso no afecta a la resistencia a la corrosión de los tubos de Inconel 600 tratados térmicamente. En relación con la placa soporte superior de los tubos, se concluyó que las tensiones generadas durante el tratamiento eran aceptables. Además, la aplicación del tratamiento térmico de la U no interfiere con la inspección en servicio periódica ni con la evaluación de los resultados de la misma, tal como establecen las recomendaciones de la Guía Regulatoria 1.83, "Inspección en Servicio de los Tubos de Generadores de Vapor de Reactores de Agua a Presión".

Por último, el procedimiento aplicado al proceso del tratamiento térmico de la U y las comprobaciones sistemáticas de Garantía de Calidad, refuerzan el hecho de que la aplicación de este proceso no representa un *Unreviewed Safety Question*, según se deduce del 10CFR50.59 Criterio (a) (2).

Conclusiones análogas se derivan de la evaluación del proceso de tratamiento en las intersecciones tubo/placa, aunque el proceso de homologación aún no se ha completado para tubos de 3/4" como son los de las centrales españolas afectadas.

## EXPERIENCIA EN LAS CENTRALES ESPAÑOLAS

Los generadores de vapor de las centrales de Almaraz y Ascó fueron sometidos a tratamiento térmico en las Ues de las filas 1 y 2 entre noviembre de 1986 y agosto de 1987, coincidiendo con paradas programadas para recarga, y sin prolongar, en ningún caso, el camino crítico de las paradas, que venía condicionado por otras operaciones.

El servicio fue prestado por ENWESA-Servicios, con apoyo técnico de Westinghouse Electric Corporation. El equipo humano, compuesto por unas 46 personas, integraba personal técnico de ENWESA, Westinghouse y Equipos Nucleares bajo la coordinación general de ENWESA, trabajando a tres turnos. En la figura IV se presenta el organigrama típico del servicio. Previamente a la prestación de los servicios se entrenó al personal nacional para la realización de todas las funciones del organigrama, excepto la de asesores técnicos.

Los coordinadores, jefes de turno y operadores de consola fueron adiestrados en el Centro de Servicios de

Westinghouse en Nivelles, Bélgica, complementándose su entrenamiento con visitas a centrales en que se estaba realizando el servicio.

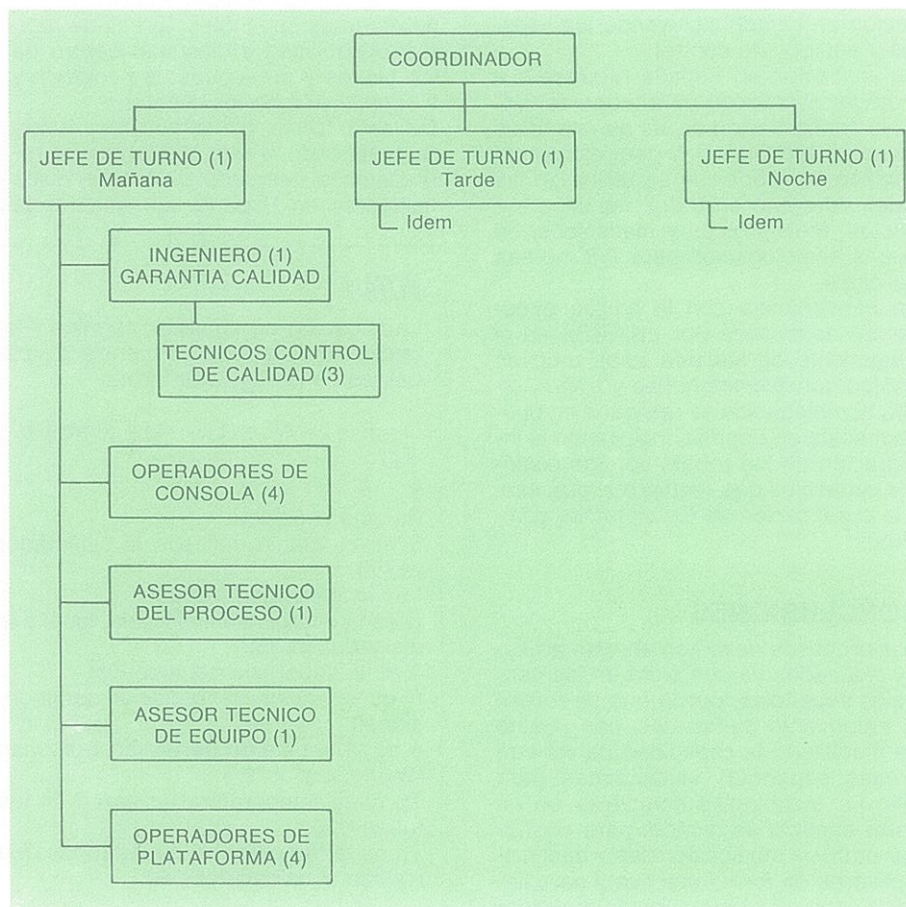
Los técnicos de Control de Calidad y Operadores de Plataforma fueron entrenados en España, en el Centro de Servicio de ENWESA en Santander, así como en las propias centrales, previamente a la realización de cada servicio. La figura V muestra la programación teórica y real del servicio en CN Ascó I, en agosto de 1987.

La dosis media global de cada servicio ha sido de 17.5 Rem.

## SITUACION ACTUAL

El proceso de tratamiento térmico de las intersecciones tubo/placa, único que queda por llevar a efecto en las centrales españolas cuyos generadores de vapor han experimentado *denting*, ha sido homologado por Westinghouse en los EE. UU. para tubos de 7/8". Posteriormente ha sido objeto de una demostración en la Central de North Anna en que se trataron 56 intersecciones tubo/placa con equipo de producción. Este servicio demostró la viabilidad del proceso, y validó su apli-

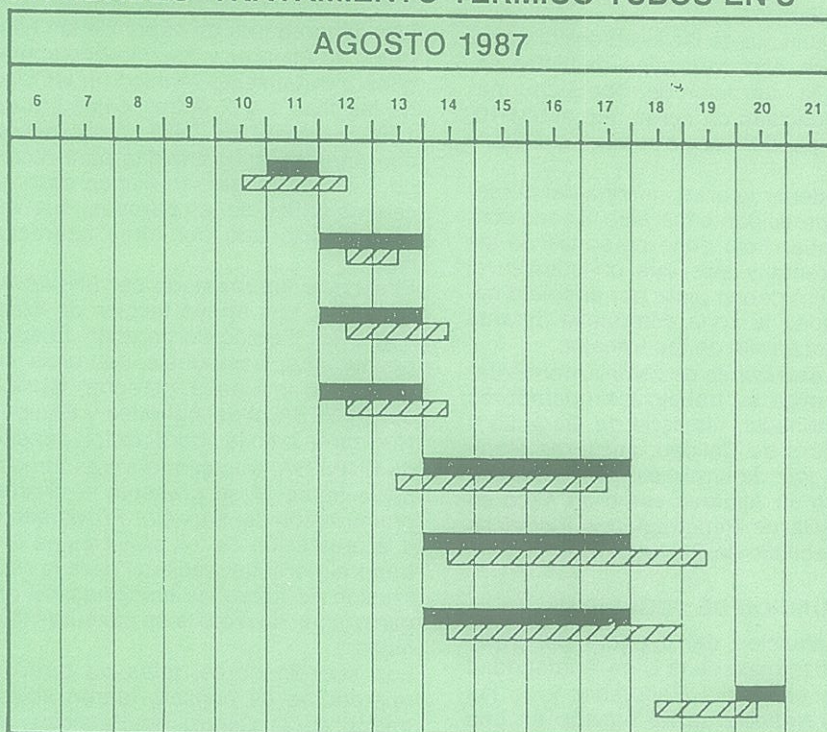
**F IV** Organigrama del servicio. Tratamiento térmico de las UES



## PROGRAMA AS-BUILT DE ACTIVIDADES TRATAMIENTO TERMICO TUBOS EN U

- MONTAJE
- PRUEBAS EMISIVIDAD GV A
- PRUEBAS EMISIVIDAD GV B
- PRUEBAS EMISIVIDAD GV C
- TRATAMIENTO GV A
- TRATAMIENTO GV B
- TRATAMIENTO GV C
- DESMONTAJE

PROGRAMADO  
RBAL



**F V** Programación de servicios UBHT EN ASCO I

cación en campo incluyendo los utillajes y equipos de control.

Su aplicación en España requiere homologar el proceso para tubos de 3/4" en la configuración de los generadores de vapor modelos D, y para el tipo específico de robot que se utilice en las cajas de agua, en todos aquellos aspectos, metalúrgicos y mecánicos, en que la homologación para 7/8" no sea aplicable.

En consonancia con la amplia experiencia acumulada por ENWESA en el tratamiento de las Ues trabajando en equipo con Westinghouse y ENSA, dicha homologación se realizaría en buena medida en España, incluyendo la integración de los robots con los distintos cabezales que requiere el proceso, y la cualificación de los sistemas completos.

### CONCLUSIONES

Los procesos descritos en este artículo, realizados ya con éxito en las centrales españolas, por lo que se refiere al tratamiento de las Ues, han puesto de manifiesto la capacidad de las empresas españolas involucradas para asimilar tecnologías complejas en un corto espacio de tiempo, para coordinar equipos multinacionales y multidisciplinares de forma efectiva y para llevar a cabo, con un contenido creciente

de recursos españoles, tareas de gran responsabilidad y dificultad dentro de los plazos y presupuestos pactados y a satisfacción de los clientes.

De esta forma pensamos que están respondiendo al reto creciente que representa el mercado de los servicios nucleares en España con una oferta

eficaz, económica, tecnológicamente adecuada, y progresivamente nacionalizada.

Nota: Algunas ilustraciones de este artículo han sido cortésmente cedidas por Westinghouse Electric Corporation.

### NOTA 1

La ecuación de equilibrio térmico (Potencia suministrada = Potencia disipada), es de la siguiente forma:

$$Q = E \times I = AF \sigma (T_p - T_a) + a \quad hc (T_p - T_a)$$

4 4

En esta ecuación:

E es el voltaje aplicado al calentador (volts)

I es la intensidad (Amp.)

Q es la energía suministrada, igual a la disipada (Btu/h)

A es la superficie del tubo (ft<sup>2</sup>)

F es el factor de radiación (adimensional)

$\sigma$  es la constante de Stefan Boltzman (Btu/hr  $\times$  ft<sup>2</sup>  $\times$  °R<sup>4</sup>)

T<sub>p</sub> es la temperatura de pared de los tubos (°R)

T<sub>a</sub> es la temperatura de los tubos que rodean al calentador (°R)

hc es el coeficiente de transmisión de calor por convección (Btu/hr  $\times$  ft<sup>2</sup> °F)

En esta ecuación, el único parámetro que no puede medirse directamente o determinarse empíricamente de forma genérica para todos los tratamientos es F, que depende de la geometría en cuestión (conocida), y de la emisividad del tubo, la cual varía de unos generadores a otros en función del estado superficial, ennegrecimiento, depósitos sobre la superficie externa o interna, etc.

Asimismo, al aplicar la ecuación, han de introducirse correcciones empíricas a las magnitudes medidas directamente para tener en cuenta desviaciones causadas por el pequeño retardo en la medición de temperatura, la distribución no uniforme de temperaturas en el perímetro del tubo debido al no perfecto centrado del calentador, la mayor disipación de calor en los extremos de la zona tratada, etc.