
CENTRALES PWR

DISEÑO DE LOS GENERADORES DE VAPOR DE REPUESTO

R. BOUECKE - G. SCHÜCKTANZ

INTRODUCCION

Durante las últimas dos décadas, los tubos de transmisión de calor de los generadores de vapor de los reactores de agua a presión se han visto afectados por diversos fenómenos de corrosión. Son muchos los factores que contribuyen a que se produzca la corrosión de los tubos en los generadores de vapor, incluyendo características de diseño, materiales y tratamiento del agua del secundario. Tal como puede verse en la figura 1 del trabajo de José María Zamarrón que se publica en este mismo número, los tubos de los generadores de vapor se han visto afectados principalmente de agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) debido al agua del primario (diámetro interior), abolladuras de tubos, picaduras, ataque intergranular (IGA), agrietamiento intergranular por corrosión bajo tensión por el lado secundario (diámetro exterior) y corrosión. La figura 1 presenta un resumen de una serie de tubos que habían sido taponados hasta fines de 1986, debido a problemas relacionados con la corrosión tales como los antes indicados. El número de tubos taponados habría sido mayor si se hubieran considerado también los tubos enmanguitados —unos 7.700 tubos en 1985 y 1986.

A partir de estas cifras resultó evidente la necesidad creciente de sustituir los generadores de vapor.

ANTECEDENTES EN EL CAMPO DE LA SUSTITUCION DE GENERADORES DE VAPOR PARA UNA CENTRAL DE S-KWU Y TAMBIEN PARA CENTRALES SUMINISTRADAS POR OTROS

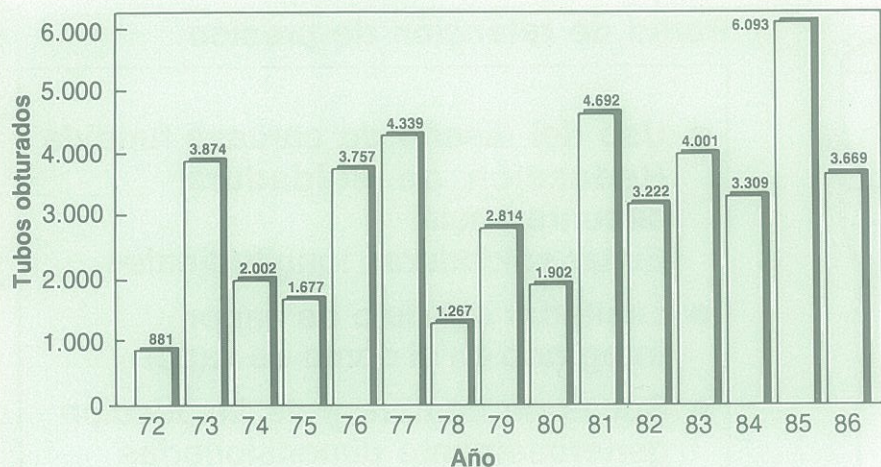
OBRIGHEIM

En 1983 y después de unos quince años de funcionamiento, S-KWU sustituyó los generadores de vapor de Obrigheim, un reactor de dos lazos de 357 MW que había sido suministrado originalmente por S-KWU, pero proyectado y fabricado bajo licencia de Westinghouse. Los dos generadores de vapor se retiraron sin desarmar y se sustituyeron por componentes que habían estado en el almacén de la planta desde 1976. Los antiguos generadores de vapor se habían fabricado utilizando Inconel 600 como material para los tubos. Desde 1971 se habían venido observando en ambos generadores de vapor fugas del circuito primario al secundario. Como consecuencia de ensayos mediante corrientes inducidas que indicaron una degradación de las paredes de los tubos superior al 50 % se taponaron numerosos tubos. El número cada vez mayor de pequeñas fugas que no se podían detectar durante las condiciones de parada fueron las

Reinhard BOUECKE estudió Ingeniería Mecánica en la Universidad Técnica de Braunschweig (RFA), ingresando en 1974 en el Departamento de Generadores de Vapor de KWU, especializándose en el diseño de estos componentes desde el aspecto termo-hidráulico. Desde 1983 es jefe de dicho Departamento.

Gerhard SCHÜCKTANZ estudió Ingeniería Mecánica en la Universidad Técnica de Graz (Austria). Después de su titulación ganó por oposición la plaza de profesor asistente de dicha Universidad.

Después de su doctorado, ingresó en 1969 en el Departamento de Generadores de Vapor de KWU; el diseño de estos componentes tuvo un gran desarrollo bajo su influencia. En la actualidad, el doctor Schücktanzt es jefe de la Subdivisión de diseño, fabricación y ensayos de esfuerzos de componentes primarios para centrales nucleares.



FI Número de tubos obtenidos en Generadores de Vapor

causantes de las fugas cada vez mayores durante el funcionamiento de la central. Dado que no existía ningún método económico para detectar y reparar el gran número de estos tubos, se sustituyeron ambos generadores de vapor por unidades fabricadas por S-KWU. Los generadores de vapor de repuesto van equipados con tubos en Aleación 800, granallados por la superficie exterior y totalmente expandidos en la placa tubular.

La experiencia adquirida con este trabajo ha demostrado que es posible sustituir generadores de vapor completamente montados en un plazo de diez semanas, con una exposición total a las radiaciones inferiores a 690 Man-Rem.

RINGHALS 2

En marzo de 1986 se adjudicó a S-KWU el suministro de generadores de vapor de repuesto para la CN Ringhals 2, un reactor de agua a presión de tres lazos de 800 MW suministrado por Westinghouse y propiedad de la Empresa Estatal Sueca de Electricidad. Su suministro estaba previsto para abril de 1988. Los generadores de vapor originales de Ringhals 2 adolecen de una extensa degradación de los tubos atribuida a agrietamiento por corrosión bajo tensión por el lado primario, en la zona de transición de laminación en la placa tubular, así como de agrietamiento por corrosión bajo tensión / ataque intergranular dentro de la cavidad de la placa tubular. El agrietamiento por corrosión bajo tensión del lado primario se manifiesta también en las curvas en U de las filas de tubos más interiores. Las nuevas unidades para Ringhals 2 incorporarán numerosas características de diseño que ya se encuentran en los generadores de

vapor estándar de S-KWU, y que han contribuido a un excelente historial de prestaciones para los reactores de agua a presión suministrados por S-KWU. Pero también hay diferencias en algunos campos, especialmente en la elección de material para los tubos y en el diseño de la unión entre los tubos y la placa tubular.

Mientras tanto, S-KWU ha recibido también un pedido de la Empresa Estatal Sueca de Electricidad para efectuar la sustitución de los generadores de vapor, lo cual está programado que se realice en verano de 1989.

Además de los dos casos antes mencionados, S-KWU ha adquirido considerable experiencia en la prestación y tratamiento de propuestas para la sustitución de generadores de vapor en:

- Doel
- Indian Point 3
- Millstone Point 2
- Beznau 1 + 2

El objetivo principal de este artículo es mostrar cuáles son los criterios de diseño principales adoptados por S-KWU en el proyecto de sustitución de los generadores de vapor, y qué esfuerzos ha hecho S-KWU para responder a las necesidades específicas y deseos de los clientes.

CRITERIOS DE DISEÑO PRINCIPALES

El objetivo de S-KWU ha sido y será considerar los siguientes criterios de diseño principales para los generadores de vapor:

- Responder estrechamente a las necesidades de los clientes, expuestas en la correspondiente especificación de diseño.

- Incorporar el mayor número posible de las características de diseño estándar utilizadas con éxito por S-KWU, y que han demostrado en el curso de la experiencia de trabajo que son sumamente eficaces para reducir al mínimo los problemas en los generadores de vapor.
- Mantener suficientemente pequeñas las diferencias en los parámetros relevantes para la seguridad, de manera que no sea necesario efectuar nuevos cálculos de los transitorios FSAR y de accidentes, y que el FSAR original de la central siga siendo el documento de licencia válido.
- Considerar nuevos materiales tales como Inconel 690 TT y unas técnicas de fabricación avanzadas cuando esto resulte deseable para mejorar aún más la fiabilidad y disponibilidad de los componentes.

CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO ESTÁNDAR

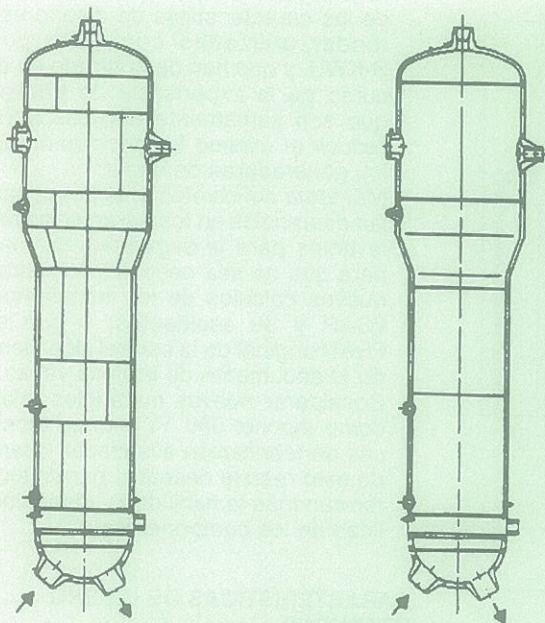
Además de otras medidas de corrección tales como la instalación posterior de condensadores de alta integridad con tubos soldados de acero inoxidable o de titanio, y un tren de alimentación exento de aleación de cobre para reducir al mínimo la entrada de sal y productos de corrosión a los generadores de vapor, S-KWU ha dedicado especial atención al diseño estructural mejorado de los nuevos generadores de vapor.

- Evitar la concentración de impurezas, evitando para ello intersticios calentados y zonas de estancamiento de flujo.
 - Evitar tensiones elevadas en los tubos.
 - Reducir al mínimo la vibración de los tubos.
 - Proporcionar unos accesos adecuados para inspección y mantenimiento.
 - Utilizar separadores de humedad y secadores optimizados experimentalmente.
 - Utilizar materiales apropiados para los tubos en U y soportes de tubos.
- La materialización de estos requisitos básicos dio lugar a las siguientes características de diseño:

Envoltorio de presión

La práctica de S-KWU para la fabricación de la envoltorio de presión del generador de vapor entraña la utilización de aros forjados, eliminando totalmente los cordones de soldadura longitudinales (ver figura II).

También se ha reducido el número de soldaduras periféricas, incluyendo la eliminación de soldaduras en la parte superior e inferior del cono de transición, al forjar el cono como parte integral de un anillo forjado. La tubuladura



Número de soldaduras

Soldaduras circunferenciales	10	Soldaduras circunferenciales	7
Soldaduras longitudinales	10	Soldaduras longitudinales	—
Soldaduras de toberas	15	Soldaduras de toberas	14

Pared de retención de presión

- Uso del diseño de carcasa fundida
Reducción de soldadura circunferencial
Evitar soldaduras longitudinales
- Limitador del flujo de vapor integrado en el domo de vapor
- Bocas de hombre y de inspección generosamente dimensionadas
- Tobera separada de agua de alimentación de emergencia

F II Diseño de Generador de Vapor

de vapor en la parte superior también va forjada integralmente con la cabeza superior, evitando de esta manera la soldadura entre tubuladura y cabeza. El menor número de soldaduras reduce la cantidad de inspección necesaria durante el funcionamiento, y reduce al mismo tiempo la probabilidad de que se produzcan problemas relacionados con la soldadura. Los generadores de vapor de S-KWU, incluidos los del diseño de placas, no han experimentado jamás agrietamiento en las soldaduras periféricas, del tipo sufrido en varias centrales de USA.

Soporte de la tubular

El haz tubular va soportado por distanciadores de tubo de "cesta de huevos". Las "cestas de huevos" están hechas de bandas austeníticas que forman una rejilla abierta que sólo tiene contacto lineal con los tubos. Este diseño permite grandes secciones de flujo transversal, produce sólo una pérdida de presión reducida, con lo cual se mejora el grado de circulación. Por tanto, nunca se han encontrado deformaciones de los tubos a causa de abolladuras en las zonas de soporte de los tubos en los generadores de vapor S-KWU. Los soportes de tubo en forma de "cesta de huevos", así como las barras antivibratorias de acero inoxidable austenítico en la zona de las curvas en U eliminan cualquier vibración inadmi-

ble de los tubos que pudieran dar lugar a corrosión por rozamiento. Se monta una fila central de bandas onduladas (figura III) cuyas ondulaciones posibilitan las curvas en su dirección vertical, para asegurar que las curvas en U no hagan contacto entre sí.

Tubuladora de agua de alimentación, rociador de agua de alimentación

Todo el caudal de agua de alimentación se suministra al rociador de agua de alimentación a través de tubuladura principal de agua de alimentación, y se distribuye uniformemente en el anillo descendente a través de los tubos J. La tubuladura principal de agua de alimentación lleva un manguito térmico soldado a la tubuladura de agua de alimentación.

Los bajos caudales de agua de alimentación podrían dar lugar a una estratificación del flujo en la tubería de agua de alimentación horizontal, antes del generador de vapor, de manera que se podrían formar capas de agua caliente y agua fría reduciendo tensiones térmicas en la zona de la tubuladura de agua de alimentación. Este fenómeno se elimina mediante una disposición adecuada de tubuladura y tubo de agua de alimentación en el interior del generador de vapor, que lleva una curva hacia arriba, evitando la posibilidad de estratificación del flujo por efecto sifón (figura IV).

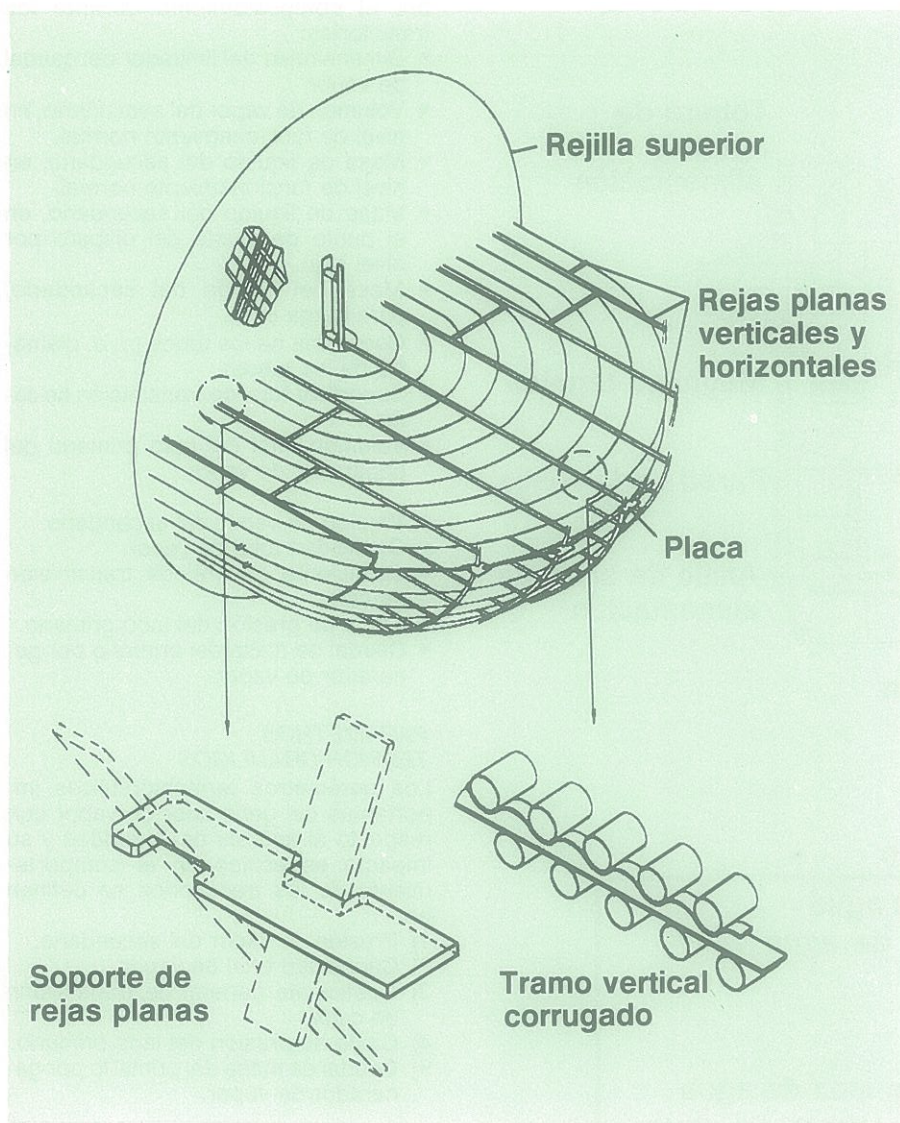
En caso de nivel bajo de agua en el generador de vapor se evita que el anillo pueda quedar totalmente vacío, mediante la utilización de los tubos de distribución, soldados a la cara superior del anillo de distribución (consiguiéndose un efecto sifón). De esta manera se impide la entrada de vapor después de los efectos de condensación (golpe de ariete), cuando se inicia el flujo de inyección de alimentación.

Separadores, secadores

El sistema de separación de humedad fue desarrollado y ensayado en prácticamente todas las condiciones de trabajo imaginables, en un banco de ensayo de vapor/agua propio. Estos ensayos incluyeron la obtención de los datos característicos del separador tales como arrastre de humedad, pérdida de presión y falta de arrastre. La experiencia de explotación obtenida hasta ahora ha confirmado las posibilidades del sistema de separación y su efectividad para reducir de forma segura el contenido de humedad de entrada de hasta un 75 %, bajándolo a un contenido de salida del 0,25 %, en todas las condiciones de trabajo de carga parcial y plena carga.

Consideraciones de mantenimiento

En los generadores de vapor de reemplazo de S-KWU se incorporan diver-



F III Sistema de soporte del lado tubular

sas características de diseño para reducir la exposición a las radiaciones para el personal de mantenimiento, y que son, entre otras:

- Acceso adecuado al lado primario y secundario.
- Posibilidad de adaptación de equipos automáticos y de control remoto para efectos de mantenimiento.
- Posibilidad de acoplamiento de dispositivos de tensado de pernos para las tapas de los agujeros de hombre y los agujeros de mano.

Dos agujeros de hombre dimensionados generosamente (diámetro interior 500 mm), situados en la cámara del primario proporcionan acceso adecuado para inspecciones de tubos y placa tubular por control remoto, para trabajos de mantenimiento y de reparación. Además, unos agujeros de mano y agujeros de hombre (diámetro interior 550 mm) en la lado secundario permi-

ten el acceso a la parte inferior del haz tubular (para el *sludge lancing* e inspección), a la región de la curva del haz tubular, al sistema de agua de alimentación y al equipo separador de humedad.

El agujero de hombre del secundario es suficientemente grande para permitir el paso de los separadores primarios y aletas del secador. Para tener mejor acceso a las interioridades del generador de vapor hay agujeros de hombre en la placa de cubierta del separador y en el bastidor del secador. Además, el diseño embreado de los separadores, la placa de cubierta del separador así como la sección del cono envolvente permite pleno acceso a la zona superior de la curva en U y a la tubería anular de agua de alimentación, para cualquier inspección o mantenimiento.

Para asegurar un cierre estanco, cada

tapa de agujero de mano y de agujero de hombre va sellada mediante juntas de acero inoxidable ranuradas, con un anillo de cubierta de plata de alta pureza (figura V).

Sistema de soplado descendente

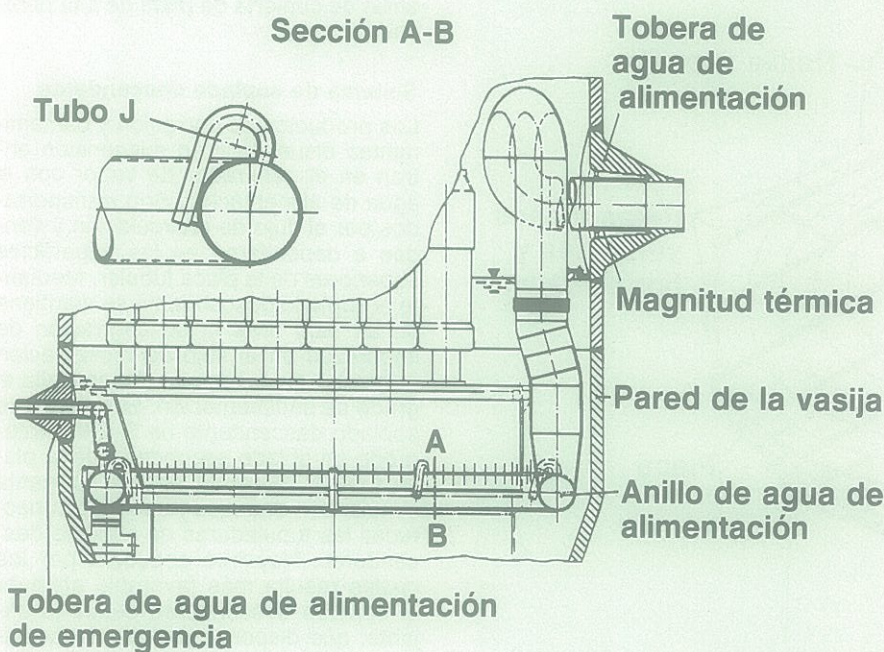
Los productos de corrosión y contaminantes disueltos y en suspensión entran en el generador de vapor con el agua de alimentación. Son transportados por el flujo de recirculación y tienden a depositarse en las superficies superiores de la placa tubular. Mediante el soplado descendente se mantiene en un bajo nivel la concentración de impurezas en el flujo de recirculación general y, en consecuencia, se limita el grado de sedimentación. El sistema de soplado descendente de S-KWU, integrado en el lado secundario de la placa tubular, consiste en una garganta circular con drenajes y que lleva conectadas las tubuladuras de soplado descendente. Hay tres aspectos por los cuales resulta más favorable efectuar el soplado descendente desde la bajante, que disponer un tubo de soplado descendente en la fila de tubos o en el centro del haz tubular:

- Cualquier dispositivo situado encima de la placa tubular impediría el *lancing* de dicha placa.
- Solamente se prevé una elevada concentración de impurezas en las inmediaciones de los tubos expuestos a bajas velocidades de flujo.
- El soplado descendente en esta región traería pocas ventajas, ya que la pequeña velocidad del flujo de masa del soplado descendente no modificaría el caudal de recirculación general y, por tanto, la característica de sedimentación de materias extrañas.

Evaluación del análisis de seguridad

El examen de autorización y la aprobación para una central específica inclusive sus generadores de vapor, se basa en las características y prestaciones de la central tal como se describen en el FSAR. Con respecto al análisis de seguridad para los generadores de vapor de repuesto diseñados por S-KWU, la base es que el diseño y los parámetros geométricos y termohidráulicos importantes son tan semejantes a los del generador de vapor original, que sigue siendo aplicable en el análisis que figura en el FSAR. Por ese motivo, uno de los objetivos del diseño de los generadores de vapor de repuesto de S-KWU es mantener lo más pequeña posible la desviación de los parámetros relevantes para la seguridad entre el generador de vapor original y los generadores de vapor de repuesto.

S-KWU tiene la posibilidad de analizar



Sparger de agua de alimentación

- Colocado bajo nivel de agua
- Juntas soldadas en tobera de agua de alimentación
- Sifón de vapor
- Sifón
- Nunca se han observado golpes de agua
- Estratificación mínima en tobera de agua de alimentación

F IV Distribuidor de agua de alimentación para el Generador de Vapor estándar

los transitorios y accidentes y efectuar la interpretación típica de los resultados de cálculo.

S-KWU tiene muchos años de experiencia en el análisis de seguridad y en obtener con éxito la autorización para las centrales propias, y ello no solamente en la República Federal de Alemania sino en países del extranjero. Además, en el campo de la investigación termohidráulica hay numerosos contactos con autoridades internacionales. Mediante la participación activa en estos programas de investigación, S-KWU tiene acceso a los códigos de ordenador actuales y avanzados, así como a los resultados analíticos y experimentales más recientes.

Parámetros del generador de vapor relacionados con la seguridad

El generador de vapor de un reactor de agua a presión influye sobre las variaciones de temperatura y presión en la central durante los transitorios, y a su vez en el comportamiento en caso de accidentes. Las características del generador de vapor están regidas por diversos parámetros geométricos.

PARAMETROS GEOMETRICOS

A continuación se relacionan los parámetros geométricos importantes del generador de vapor que han de considerarse con respecto al análisis de seguridad y a su impacto específico so-

bre el comportamiento durante los transitorios:

- Dimensiones del limitador del caudal de vapor.
- Volumen de vapor del secundario, en nivel de funcionamiento normal.
- Masa de líquido del secundario, en nivel de funcionamiento normal.
- Masa de líquido del secundario, en el punto de ajuste del disparo por nivel bajo.
- Masa del líquido del secundario, para carga cero.
- Geometría de los tubos (p. e. diámetro de los tubos).
- Superficie total de transmisión de calor.
- Volumen total del lado primario del generador de vapor.
- Presión de vapor del secundario.
- Capacidad total de vapor.
- Coeficiente general de transmisión de calor.
- Caída de presión del lado primario.
- Caudal de masa del primario por generador de vapor.

PARAMETROS TERMOHIDRAULICOS

Los parámetros termohidráulicos importantes del generador de vapor con respecto al análisis de seguridad y su impacto específico en el comportamiento de los transitorios se definen por:

- 1) Presión de vapor del secundario.
- 2) Capacidad total de vapor.
- 3) Coeficiente general de transmisión de calor.
- 4) Caída de presión del lado primario.
- 5) Caudal de masa del primario por generador de vapor.

Evaluación del análisis de seguridad

La influencia de cualquiera de los parámetros anteriores que pueda haber cambiado en el diseño de generador de vapor de repuesto, se tratará a la luz del FSAR de la central en cuestión. El FSAR es y seguirá siendo el documento de autorización válido.

Se demostrará que:

- Las desviaciones de los parámetros son tan pequeñas que no tienen impacto significativo en el comportamiento en caso de accidente de la central, o bien
- las desviaciones de los parámetros tienen un impacto positivo sobre el comportamiento en caso de accidente de la central.

En el caso de que surgiera un impacto negativo en algún caso específico, éste se destacará y tratará con detalle para el caso específico.

Se prevé que la evaluación de seguridad específica para la central demos-

trará que no existe ningún tema de seguridad que no se haya resuelto.

Nuevos desarrollos

Tal como se ha descrito anteriormente, el objetivo de S-KWU es el de incorporar en el diseño del generador a vapor de repuesto el mayor número posible de características del diseño estándar que tiene tanto éxito, pero también hemos tenido máximo interés en seguir lo más de cerca posible los nuevos desarrollos en el campo de los materiales u otras características de diseño o relacionadas con la fabricación. Recientemente, S-KWU ha dedicado extensos esfuerzos de investigación y desarrollo a dos nuevos campos.

Materiales de los tubos

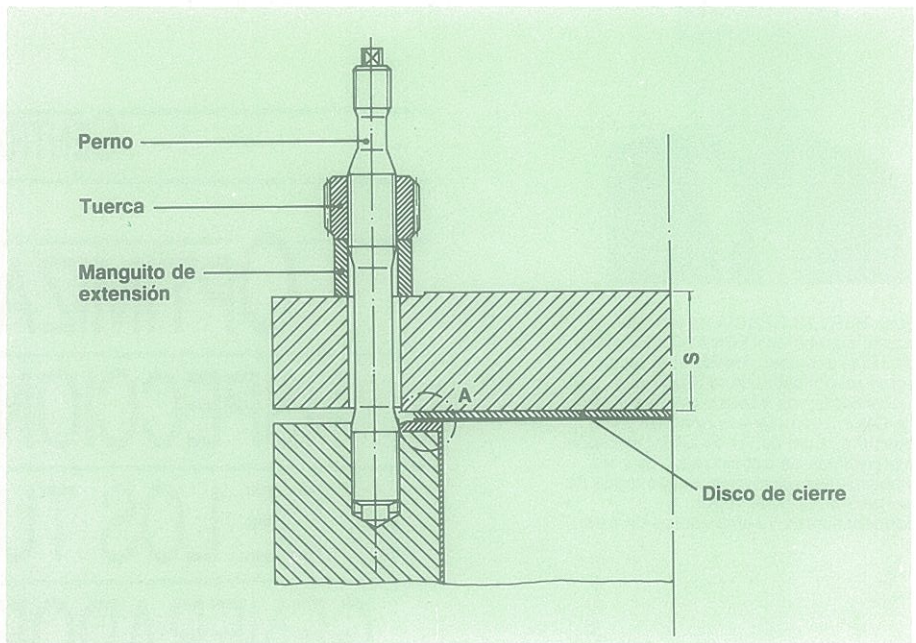
Se ha prestado especial atención al material de los tubos, puesto que son una de las partes más importantes del generador de vapor. Como consecuencia de extensas investigaciones y ensayos se modificó el material de tubos estándar, Aleación 800, y se cualificó por S-KWU para aplicación nuclear. En la actualidad se utilizan más de 172.000 tubos modificados de Aleación 800 en los generadores de vapor de los reactores de agua a presión de S-KWU.

A lo largo de dieciséis años de funcionamiento hasta la fecha, ha habido un único tubo que ha presentado una grieta intergranular, comenzando del lado secundario en la región de la pila de fango. Además, solamente se han observado dos tubos con unas pocas picaduras. En los tubos de generadores de vapor de S-KWU en Aleación 800 modificada no se ha detectado ninguna grieta de agua pura, ningún ataque intergranular y, en especial, ningún agrietamiento por corrosión bajo tensión inducida por cloruros.

El destacado éxito que se observa a lo largo de la experiencia de funcionamiento con Aleación 800 modificada, demuestra que el material está bien equilibrado, con una elevada resistencia a la corrosión y que es adecuado para tubos de transmisión de calor en intercambiadores de calor de centrales nucleares.

En octubre de 1986, S-KWU ha solicitado al Comité ASME una clasificación de código para la Aleación 800 modificada. Al mismo tiempo se envió una solicitud al comité ASTM para que considere la Aleación 800 modificada en la especificación ASTM B 163.

Como alternativa a la Aleación 600 MA se ha desarrollado la Aleación 690 TT. Basándose en datos de laboratorios de S-KWU las características de esta aleación son muy prometedoras, y S-KWU considera este material como aleación adecuada para los tubos de un generador de vapor nuclear. Según la pre-



F V Concepto de cierre de KWU

ferencia del cliente, S-KWU ofrece por tanto dos aleaciones alternativas para los tubos. Por ejemplo, se utilizará la Aleación 690 TT en los generadores de vapor de repuesto de la central Ringhals 2.

Conexión tubo a placa tubular

La soldadura de los tubos a la placa tubular se realiza aplicando un procedimiento de soldadura. Los bordes de soldadura están desarrollados sin resaltes de modo que no interfieren con el refrigerante.

Ha sido la práctica de Siemens/KWU expandir cada tubo a la placa tubular aplicando un procedimiento mecánico de rodillos en dos emplazamientos.

En base a estudios detallados, ha sido posible optimizar este procedimiento de rodillos respecto a componentes individuales (jaula, rodillos), velocidad de rodadura y tiempo de montaje de los equipos.

La sección expandida en la parte superior de la placa tubular frente al lado secundario está colocada de tal forma que la ranura entre tubo y placa tubular queda cerrada.

Sobreexpansiones que producen altos grados de stress local quedan excluidos por esta posición de expansión. La expansión inferior, por el lado primario, protege de cargas la soldadura entre tubo y placa tubular, debido a una expansión axial térmica del tubo.

La soldadura del tubo, así como cada una de las expansiones de tubo son capaces de soportar la carga de la máxima presión diferencial que podría

ocurrir durante una ruptura potencial de la tubería principal de vapor.

El uso del proceso de expansión en combinación con *Alloy 800 Modified* como material de tubo, nunca ha dado motivo para quejas ni ha originado condiciones de servicios alteradas.

Hace poco, Siemens/KWU calificó un proceso avanzado de expansión de tubos que une las ventajas de ambos procesos de expansión:

- Expansión hidráulica de los tubos en toda la altura de la placa tubular.
- Rodillos mecánicos superpuestos en ambos extremos del área de expansión hidráulica.

Ventajas de este proceso combinado:

- Queda cerrada la ranura entre tubo y placa tubular en toda la altura de la placa tubular.
- Mediante el proceso se consigue una transición suave desde la zona de tubo expandida hasta la no expandida.
- Los tubos están firmemente sujetos a la placa tubular mediante los rodillos mecánicos superpuestos.
- El rodillo duro frente al lado secundario sirve para obturar del todo la hendidura.
- En cuanto al proceso mecánico rotativo en sí, la expansión inferior protege de cargas la soldadura entre tubo y placa tubular, debido a una expansión térmica de diferencia axial entre tubo y placa tubular.