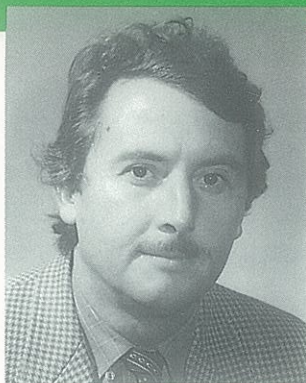




José Luis PRIETO PRIETO es Ingeniero Técnico de Minas (1965) e Ingeniero Industrial por la ETSI de Madrid (1971). En 1973 ingresa en Empresarios Agrupados en el Departamento de Ingeniería de Equipo Mecánico para la CN de Almaraz.

En 1974 es contratado por Westinghouse Sistemas Energéticos España, donde trabajó en el Departamento de Ingeniería de Equipo Mecánico para las centrales nucleares de Almaraz, Lemóniz, Ascó, Sayago y Vandellós II.

En 1982 se incorpora al Engineering Task Force formado para el SEP de puesta al día de la CN de Zorita, pasando a continuación un año en el emplazamiento de dicha central como Ingeniero supervisor responsable del montaje mecánico y pruebas de equipos hasta la culminación del proyecto en 1985. En 1986 es asignado como Ingeniero Mecánico al grupo de apoyo a la operación de CN de Almaraz, puesto que continúa desempeñando en la actualidad.

CENTRALES PWR

EVOLUCION DE LAS CARACTERISTICAS DE DISEÑO DEL GENERADOR DE VAPOR

J. L. PRIETO PRIETO

Westinghouse ha diseñado y fabricado básicamente dos tipos de generadores de vapor, el de precalentador y el de anillo distribuidor de agua de alimentación. La diferencia entre ellos reside fundamentalmente en el recorrido del flujo de agua de alimentación a través del lado secundario del generador de vapor.

Así, en el de tipo precalentador el agua de alimentación procedente del circuito secundario, entra en el generador directamente a la zona del precalentador, localizado dentro de la rama fría del haz tubular, donde se precalienta antes de mezclarse con el flujo interno de recirculación en el fondo del haz, a través del cual luego asciende alcanzando la ebullición, produciendo el vapor que posteriormente accionará el grupo turbina-alternador.

En el de tipo anillo distribuidor de agua de alimentación el agua del secundario entra en el generador a través de un anillo tórico distribuidor, localizado encima de la parte superior de los tubos en U del haz tubular, descendiendo luego por el espacio anular existente entre la carcasa y la camisa envolvente del haz tubular y a continuación ascendiendo a través del haz donde llega a ebullición y vaporización.

A continuación se va a describir la evolución de las características de diseño y experiencia operacional con el modelo de anillo de alimentación.

GENERADOR DE VAPOR MODELO F

Las condiciones químicas ambientales en el interior de un generador de vapor son complicadas de predecir, al depender de la química del agua del lado secundario. En consecuencia, una gran parte del diseño del mismo está basado en métodos empíricos derivados del análisis de la experiencia operacional acumulada y de las pruebas llevadas a cabo a nivel de laboratorio, por lo que en adelante el propósito de este artículo se va a limitar a discutir las mejoras o avances de diseño resultantes del análisis de tales experiencias, los cuales han sido incorporados dentro del diseño estándar del modelo F de generador de vapor.

Por tanto, el diseño actual del modelo F de generador de vapor (ver Fig. 1) es el resultado de un programa continuo de desarrollo e investigación y de una experiencia operativa acumulada a lo largo de muchos años. Con objeto de lograr un aumento tanto de su margen de resistencia a la corrosión y tolerancia a condiciones severas de operación como de su operabilidad y fiabilidad, dicho programa se marcó los siguientes objetivos:

- Disminuir el potencial de concentración local de impurezas.
- Incorporar materiales más resistentes a la corrosión.

- Mejorar el acceso al lado secundario.
- Incrementar la tasa de circulación de flujo para conseguir un mayor rendimiento termohidráulico, eliminar zonas de bajo flujo y facilitar la evacuación de lodos.
- Proveer margen adicional en la capacidad de separación de humedad.
- Reducir la probabilidad y efectos perniciosos del golpe de ariete.

En la tabla I se exponen las mejoras de diseño introducidas en el modelo F, así como sus resultados en cuanto a beneficios y ventajas más relevantes.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

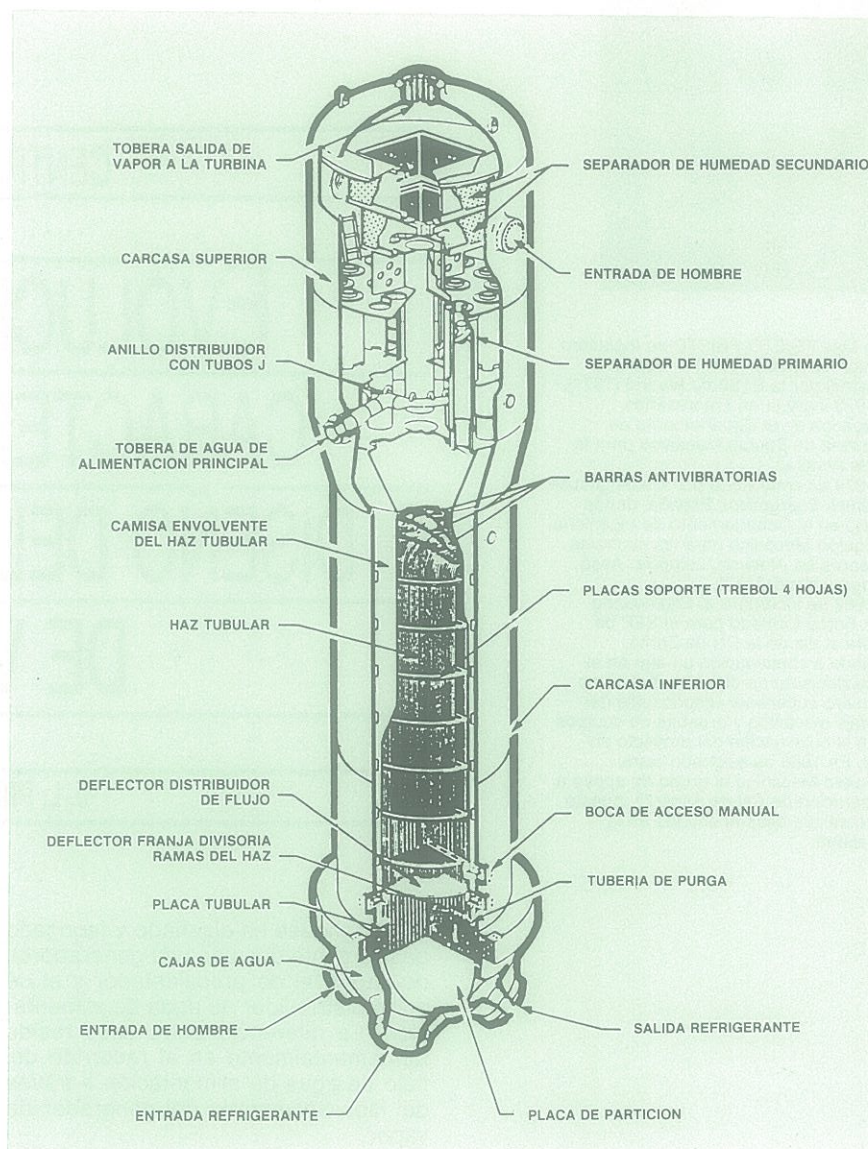
El generador de vapor Westinghouse del tipo anillo distribuidor de agua de alimentación ha acumulado hasta la fecha una extensa experiencia operacional, trabajando bajo una muy amplia gama de condiciones de operación, con buenos resultados de rendimiento. La corrosión motivada por la entrada de contaminantes ha sido la causa predominante de la degradación experimentada en general en los generadores de vapor. Las condiciones a que están sometidos internamente durante la operación de la central son de naturaleza realmente compleja, pudiendo llegar la concentración de sustancias corrosivas a exceder el grado de tolerancia de los materiales, cuando la química del agua del lado secundario no esté debidamente controlada.

El fenómeno del golpe de ariete observado en los primeros diseños de generadores de vapor no constituye ya en adelante problema significativo alguno a causa de haberse identificado con claridad los mecanismos que lo originaban y realizado las modificaciones de diseño pertinentes.

La vibración de los tubos tampoco representa ya preocupación para el diseño de generador de vapor con anillo distribuidor, debido a la manera específica en cómo se ha resuelto la entrada del flujo de alimentación hacia el haz tubular, lo cual genera un flujo transversal de velocidad relativamente baja. Durante muchos años, Westinghouse ha venido acometiendo un programa continuo de desarrollo e investigación, cuyo resultado es el nuevo diseño del generador de vapor designado como modelo F, el cual es actualmente el estándar que Westinghouse ofrece a las centrales.

Dicho modelo, en lo relativo a la resistencia a la corrosión, incorpora mejoras en las tres áreas básicas siguientes: selección de materiales, cambios específicos de diseño y procedimientos de fabricación.

- En cuanto a innovación en materiales, la utilización de:



F I Generador de vapor Westinghouse Modelo F

F II Placa soporte tubos (trébol de 4 hojas)

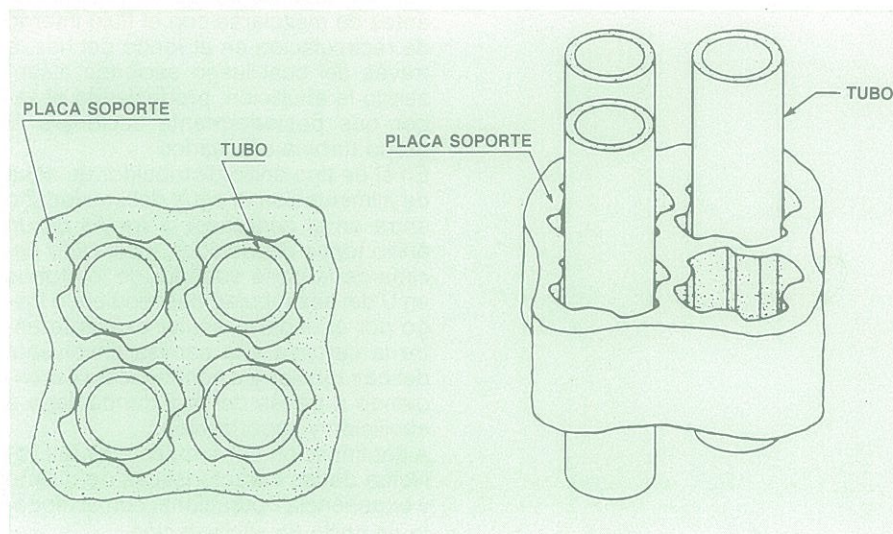


Tabla I

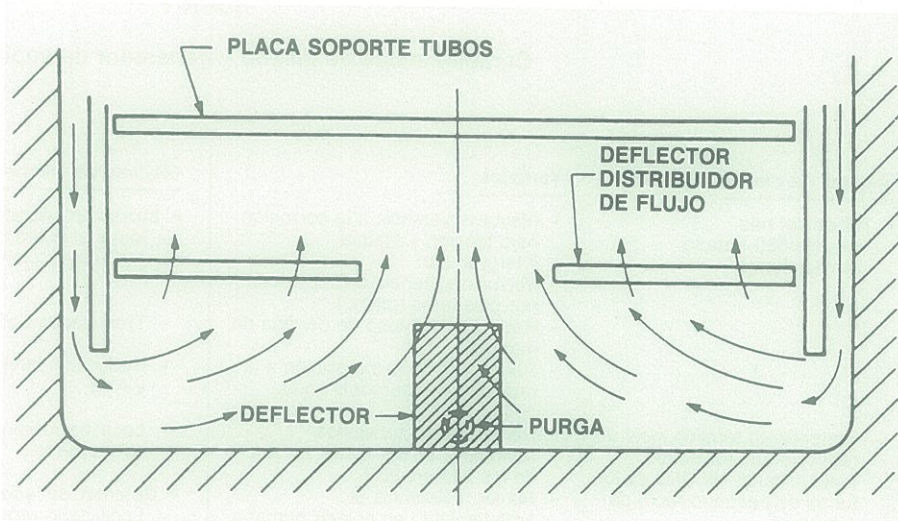
Características de diseño – generador de vapor modelo F

Mejoras de diseño	Ventajas	Mejoras de diseño	Ventajas
• Tubos del haz - Inconel 690 tratado térmicamente - Tratamiento térmico local de reducción de tensiones residuales en las UES de los tubos de pequeño radio de curvatura. - Expansión hidráulica de tubos en todo el espesor de la placa tubular (Fig. IV). - Reducción contenido en cobalto. • Placa soporte tubos - Material acero inoxidable 405. - Agujeros (configuración trébol de 4 hojas) (Fig. II). - Localización optimizada de soportes. - Alineación de placas soporte mediante láser. • Deflector distribuidor de flujo - Material acero inoxidable 405 (Fig. III). - Agujeros (configuración trébol de 8 hojas). - Localización optimizada del deflector. • Placa tubular - Mecanización superficies primaria y secundaria de placa. • Barrera contra objetos - Localizada a la entrada del espacio anular entre carcasa y envolvente del haz.	- Mayor resistencia a la corrosión bajo tensión y ataque intergranular. - Mayor resistencia a la corrosión por picaduras (pitting). - Reducción de tasa de pérdida de material. - Reducción de la exposición a la radiación del personal en la zona. - Reducción de tensiones residuales en las zonas curvas de los tubos (UES). - Mayor resistencia al agrietamiento en el lado primario de las UES. - Eliminación de holgura entre tubo y placa tubular. - Reducción de tensiones residuales en tramo de tubo insertado en placa tubular. - Mayor resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión y ataque intergranular en zona placa tubular. - Reducción nivel productos de activación en el refrigerante del reactor. - Reducción de exposición a la radiación en la zona. - Mayor resistencia de las placas soporte a la corrosión. - Mayor resistencia al "denting" (corrosión en intersticios tubo-placa, ovalizando y tensionando el tubo). - Mayor flujo a lo largo de los tubos. - Reducción de la posibilidad de secado y concentración química en intersticios placa-tubo. - Mayor resistencia al agrietamiento. - Reducción de vibración y desgaste de tubo. - Reducción de tensiones de flexión en tubos durante la fase de calentamiento de Planta. - Mayor resistencia del deflector a la corrosión. - Mayor flujo a lo largo de los tubos. - Reducción de la posibilidad de secado y concentración química en intersticios. - Mayor resistencia al agrietamiento. - Reducción del área de deposición de lodos corrosivos. - Espesor uniforme de placa. - Reducción de la probabilidad de intersticios entre tubo y placa en lado secundario. - Reducción potencial de corrosión en intersticios placa tubular. - Protección del haz contra el impacto de piezas sueltas u objetos extraños (tornillos, tuercas, herramientas, etc.).	• Barras antivibratorias (AVB) - Material acero inoxidable 405. - AVB de sección cuadrada. - Tres juegos de AVB. - Reducción huelgo entre tubo y AVB. - Localizaciones soporte AVB optimizadas. • Colector de lodos - Localizado próximo al fondo de la cámara de vapor del generador. • Separadores de humedad - Separadores primarios de 50 cm de diámetro con aletas de centrifugación más bajas. - Mejora de drenajes separador secundario. • Deflector en franja central entre las ramas del haz - Localizado en franja central sobre placa tubular. • Purga - Tubería de purga con taladrado especial localizada sobre placa tubular. - Sistema incorporado de limpieza del colector de lodos. • Distribución agua de alimentación - Tubos-J invertidos de descarga, en lo alto del anillo distribuidor (Fig. V). - Material Inconel 600 para los tubos-J. - Manguito térmico soldado a la unión tobera - anillo distribuidor (Figs. VI y VII). • Tobera adicional para alimentación auxiliar al generador • Bocas de acceso - Entradas de hombre de 45 cm de diámetro en cajas de agua (primario) y carcasa superior (secundario). - Agujeros de acceso manual de 15 cm de diámetro por encima de placa tubular y deflector distribuidor de flujo. • Toberas de mantenimiento húmedo - Localizadas en la carcasa superior.	- Mayor resistencia de las barras a la corrosión. - Aumento del área de contacto con el tubo. - Reducción del desgaste del tubo. - Aumento del soportado del tubo en el área doblada en U. - Reducción potencial de vibración del tubo. - Reducción del desgaste del tubo. - Reducción de vibración del tubo. - Reducción del desgaste del tubo. - Recogida de lodos en zona benigna o no caliente del generador. - Reducción de acumulación de lodos sobre placa tubular. - Reducción potencial de secado y corrosión asociada del tubo. - Reducción de operaciones de limpieza de placa tubular. - Reducción de exposición del personal a la radiación en la zona. - Mejora del rendimiento de separación de humedad. - Reducción de arrastre de humedad. - Reducción de la corriente de flujo, que puentea superficies transferencia térmica. - Aumento del flujo de purga de placa tubular en zonas propensas a la acumulación de lodo. - Evacuación de lodos del colector durante paradas para mantenimiento sin abrir el generador. - Disminución de requisitos de mantenimiento. - Inhiben el drenaje y entrada de vapor en el anillo distribuidor. - Reducen la probabilidad del golpe de ariete. - Reducción potencial de corrosión de los tubos-J. - Aumentan la protección frente a la fatiga y choque térmicos y golpe de ariete. - Protección de tobera alimentación principal contra los efectos de fatiga y estratificación térmica durante inyección agua fría, a baja potencia, etc. - Más fácil acceso a inspección y mantenimiento. - Reducción de exposición del personal a la radiación en estas zonas. - Ampliado el acceso para inspección y mantenimiento lado secundario. - Facilita el mantenimiento de la química del secundario durante el mantenimiento húmedo del generador.

- Inconel 690 (I-690TT) tratado térmicamente, adoptado como estándar para el material de los tubos de generadores de vapor.
- Acero inoxidable tipo 405 en lugar de acero al carbono para la fabricación tanto de las placas soporte de tubos como del deflector distribuidor de flujo, al objeto de aumentar el margen de resistencia a la corrosión en el proceso de *denting*.
- En cuanto a cambios o mejoras de diseño se han introducido diferentes modificaciones con objeto de minimizar los puntos de concentración de productos corrosivos, tales como:
 - Placas soporte de tubos con orificios de paso en forma de trébol de cuatro hojas.
 - Deflector distribuidor de flujo con orificios en forma de trébol de ocho hojas.
 - Expansión del tubo a lo largo de todo el espesor de la placa tubular.
- En lo relativo a métodos de fabricación se han establecido una serie de procedimientos al objeto de incrementar la resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión, tales como:
 - Expansionado hidráulico del tubo dentro de la placa tubular.
 - Tratamiento térmico local de reducción de tensiones residuales en la U de los tubos de pequeño radio de curvatura.
 - Alineación de los internos (haz-placas soporte) mediante técnica de rayo láser.

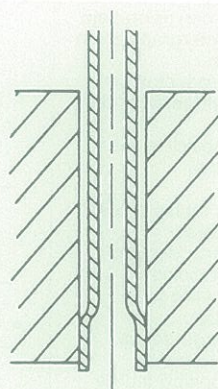
Aparte de las innovaciones anteriormente descritas contra la corrosión, el modelo F asimismo incorpora una serie de modificaciones adicionales tendientes a reforzar la fiabilidad, operabilidad y el mantenimiento, tales como:

- Colector de lodos, que recoge y evacúa lodos en la región superior del generador de vapor, lejos de las superficies de transferencia de calor.
- Barrera antiobjetos, que intercepta cualquier objeto extraño que pueda acceder al interior del generador de vapor y lo retiene en la región superior del mismo.
- Tubos-J invertidos de Inconel 600 y manguito térmico soldado al anillo distribuidor que disminuyen la probabilidad de fatiga y choque térmicos y golpe de ariete.
- Tobera adicional para alimentación auxiliar, que protege la tobera principal contra los efectos de fatiga térmica cuando se produce inyección de agua de alimentación fría.

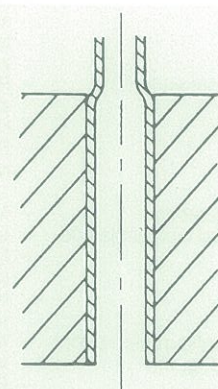


F III Deflector distribuidor de flujo

F IV Expansionado hidráulico de la unión tubo-placa tubular

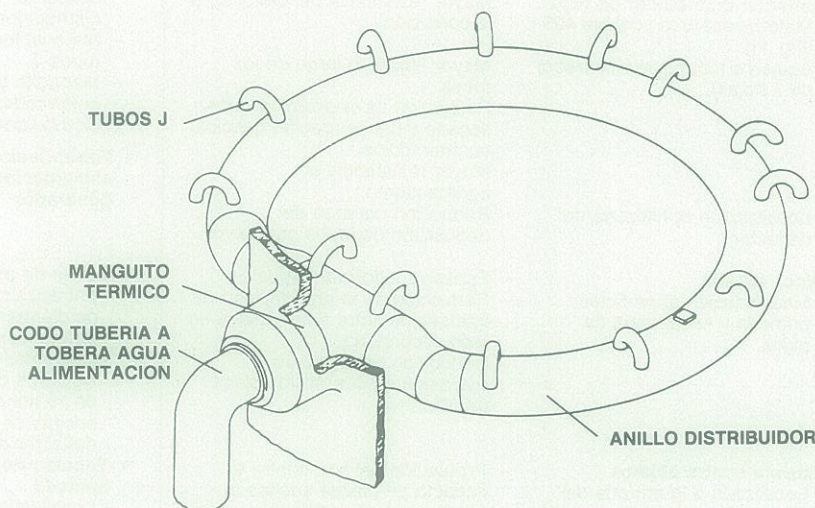


PRIMEROS MODELOS
EXPANSIONADO PARCIAL



A PARTIR DE 1978 EXPANSIONADO
HIDRAULICO EN TODO EL ESPESOR
DE LA PLACA TUBULAR

F V Anillo distribuidor agua alimentación generador de vapor Modelo F



- Barras de antivibración (AVB) adicionales en la región curvada en U del haz, que reducen la probabilidad de vibración y el desgaste.
- Separadores de humedad avanzados, que minimizan el arrastre de humedad.
- Mejora del acceso al interior del generador de vapor (bocas de hombre de mayores dimensiones y adición de un agujero para acceso manual), que facilitan la inspección, mantenimiento y reducen el tiempo de exposición.
- Toberas de mantenimiento húmedo que facilitan el mantenimiento de la química del secundario.

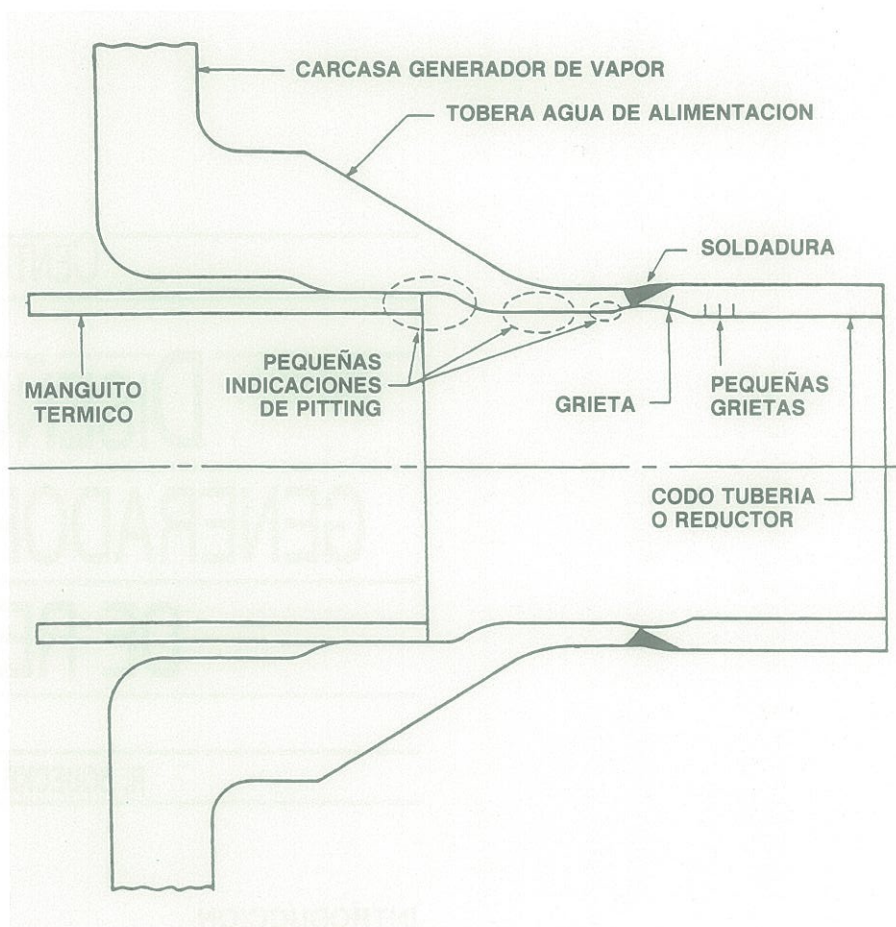
En lo referente a experimentación, el diseño del modelo F ha sido sometido a más de cuatrocientas mil horas de pruebas, utilizando autoclaves, cápsulas presurizadas y varios tipos de calderas. De particular relevancia es el modelo de caldera de 10 MWt (MB-2) mediante la cual se simulaban las condiciones hidráulicas y termodinámicas del modelo F, ensayando un haz tubular a escala real bajo condiciones típicas de flujo térmico y solicitaciones dinámicas equivalentes. Transcurridas cuarenta mil horas de operación, se inspeccionaron exhaustivamente todas las partes componentes del haz tubular no encontrándose señal alguna de degradación en los tubos.

La experiencia operacional con el modelo F de generador de vapor, que empezó a operar en septiembre de 1980, ha sido buena, y a este respecto es significativo destacar lo siguiente en relación con generador de vapor de reposición:

- Ninguna parada forzosa ha acaecido debido al modelo F.
- Ninguna extensión del período de recarga ha sido requerida debido a corrosión de tubos en el modelo F.

Una evaluación global de la experiencia operacional con el modelo F indica la ausencia de indicaciones de corrosión sistemática u otros mecanismos conducentes a la degradación de tubos.

Finalmente y como síntesis de lo anteriormente expuesto, indicar que el alcance y extensión del programa de desarrollo del generador de vapor Westinghouse, junto con la confirmación de las predicciones de diseño en base a pruebas experimentales y programas en campo, sustancian el hecho de que el actual modelo F sea considerado un componente fiable que ofrece a las centrales ventajas significativas en términos de durabilidad y resistencia a la corrosión.



F VI Descripción general de Pitting y grietas en la unión tubería-tobera

F VII Estratificación térmica en línea agua de alimentación

