

Ingeniería de fiabilidad

por T. Demler y W. Issler*

Las centrales nucleoelectricas han acumulado más de 3000 años-reactor de experiencia en servicio y alcanzado, en casos individuales, disponibilidades de hasta el 80%. Podría, pues, sostenerse que es perfectamente posible hacer funcionar estas centrales, en condiciones de seguridad y de economía, a base de los reglamentos y de los principios de diseño actuales. Esto no obstante, la optimización del diseño y de las tecnologías de los materiales, incluyendo los aspectos de la garantía de calidad y del funcionamiento sujeto a control mediante repetidas inspecciones, es un requisito previo importante para garantizar la seguridad y la fiabilidad constantes.

En marzo de 1983 tuvo lugar un Simposio internacional sobre la fiabilidad de los componentes de reactor sometidos a presión, organizado por el OIEA en cooperación con el Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) de la Universidad de Stuttgart (en el *Boletín*, Vol. 25 Núm. 3 de septiembre de 1983 figura un informe). Junto con el simposio se organizó una exposición con miras a familiarizar a los participantes con la experiencia práctica en las tecnologías y métodos que

contribuyen a realzar la seguridad y la fiabilidad. La exposición daba particular relieve a las técnicas de fabricación y de reparación, así como a los métodos de ensayos no destructivos. Tomaron parte en la muestra 15 expositores de los Estados Unidos de América, Francia, el Reino Unido, y la República Federal de Alemania. En el presente informe se pasa revista a algunos de los elementos particularmente interesantes exhibidos.

Fabricación de vasijas mediante soldadura con cambio de dirección (Shape welding)

Hace nueve años, se formularon planes para la construcción de componentes de toda dimensión y forma utilizando únicamente metal de soldadura. En vez de piezas moldeadas, forjadas o laminadas, se puede utilizar un proceso de soldadura por arco sumergido en varias capas. Este método, llamado de soldadura con cambio de dirección (shape welding), presenta ventajas concretas para la fabricación de componentes de paredes gruesas con propiedades tales como gran solidez y resistencia a la deformación y a la corrosión. Se supone que los componentes soldados con este método satisfacen los requisitos de seguridad más rigurosos y son más baratos que los fabricados con los métodos corrientes.

* Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA), Universidad de Stuttgart, República Federal de Alemania.

Participantes en la exposición sobre ingeniería de fiabilidad

Babcock & Wilcox Co., Lynchburg, Estados Unidos/Brown Boveri Reaktor GmbH, Mannheim, República Federal de Alemania
Bopp & Reuther GmbH, Mannheim, República Federal de Alemania
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlín
Central Electricity Generating Board (CEGB), Generation, Development and Construction Division, Barnwood, Reino Unido
Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (Izfp), Saarbrücken, República Federal de Alemania
GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht, República Federal de Alemania
Intercontrôle, Rungis, Francia
Kraftwerk Union AG, Erlangen, República Federal de Alemania
M.A.N. Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG, Nuremberg, República Federal de Alemania – Gutehoffnungshütte GHH, Sterkrade, República Federal de Alemania
Gg. Noell GmbH, Würzburg, República Federal de Alemania
Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA), Universidad de Stuttgart, República Federal de Alemania
Technischer Überwachungsverein Bayern eV, Munich, República Federal de Alemania
Technischer Überwachungsverein Stuttgart eV, Stuttgart, República Federal de Alemania
Thyssen Schwerkompnenten GmbH, Düsseldorf, República Federal de Alemania
United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA), Risley Engineering and Materials Laboratory, Risley, Reino Unido

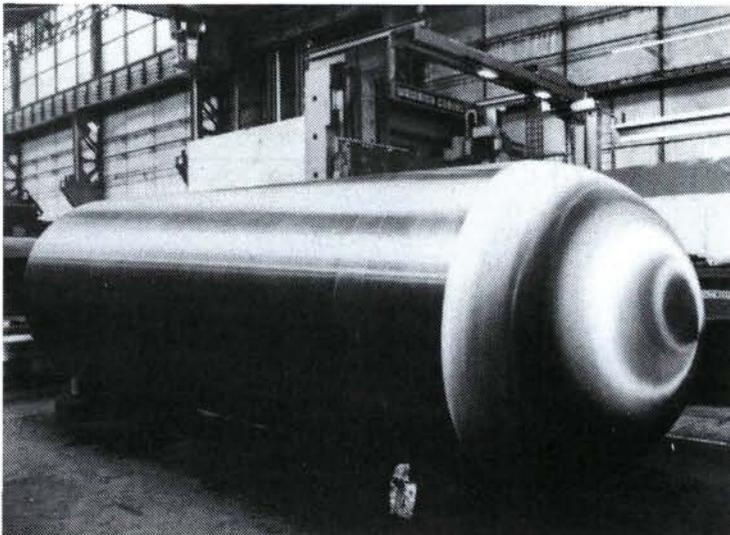


Figura 1. Vasija fabricada con soldadura con cambio de dirección (shape welded).

Una de las ventajas principales del procedimiento es que por primera vez se han podido variar sistemáticamente el límite de elasticidad y la resistencia a la tracción o a la deformación utilizando materiales diferentes en un componente de paredes gruesas. Utilizando metales de aportación optimizados se pueden resolver normalmente problemas inherentes a la distribución de la tensión y a la tenacidad, así como a la fisuración por corrosión y a la erosión provocadas o coadyuvadas por la tensión. Los ensayos preliminares han demostrado también que la soldadura con cambio de dirección (shape welding) presenta ciertas ventajas con respecto a los métodos tradicionales en lo que se refiere, por ejemplo, a la fabricación de vasijas con revestimiento interno de acero inoxidable.

El empleo de este método de soldadura en la fabricación de componentes complejos se encuentra todavía en la fase de desarrollo. La Figura 1 muestra una vasija de presión de 58 toneladas soldada según este método, provista de una cúpula fabricada con metal de aporte 10 MnMoNi 55, sin soldadura de junta. El diámetro externo es 1811 mm, la longitud de la parte cilíndrica es 4575 mm y la longitud total es 5482 mm.

Las válvulas de seguridad y el concepto de la seguridad básica

El concepto de la seguridad básica utilizado en la República Federal de Alemania hace especial hincapié en los materiales. La seguridad básica de un componente se determina con arreglo a lo siguiente:

- empleo de materiales de alta calidad que posean buenas características, en particular de tenacidad
- limitación prudente de las tensiones
- evitación de las concentraciones de tensión mediante la optimización del diseño
- garantía de la utilización de la mejor tecnología posible
- conocimiento y apreciación de los fallos.

Si se satisfacen los requisitos expuestos se considera garantizada la "seguridad básica" de los componentes; se excluye el fallo resultante de deficiencias en el procedimiento de fabricación.

Se requieren igualmente ensayos de funcionamiento en bancos de pruebas. Antes de dar comienzo a la fabricación, se ensayan prototipos de válvulas de seguridad en condiciones reales de presión y de temperatura, flujo másico, etc. Los resultados obtenidos tienen que ser confirmados nuevamente mediante otros ensayos en piezas fabricadas en serie. Al mismo tiempo, se determinan los valores iniciales que han de servir para las repetidas inspecciones y ensayos de funcionamiento que se harán más tarde, cuando las válvulas se encuentren en servicio.

La Figura 2 muestra una válvula de seguridad con arandela elástica y unidad de control neumático, del tipo SIZ-DN 200 X 250, para una presión de 65 bar de presión de vapor a 550°C y para un flujo de 200 toneladas por hora, que se demostró en la exposición.

Máquinas de soldar y de rectificar controladas a distancia

La tecnología de la soldadura por impulsos ha alcanzado niveles tan elevados que las operaciones de soldadura de tuberías se pueden hacer ahora eficazmente en cualquier emplazamiento. La introducción de fuentes de alimentación transistorizadas ha tenido un efecto benéfico, ya que permite la repetición exacta de los parámetros de soldadura.

Para que se pueda utilizar en las regiones "calientes" del reactor, el equipo debe también ser diseñado de modo que se lo pueda manejar a la mayor distancia posible. El equipo de soldadura presentado en la exhibición (Figura 3) comprende:

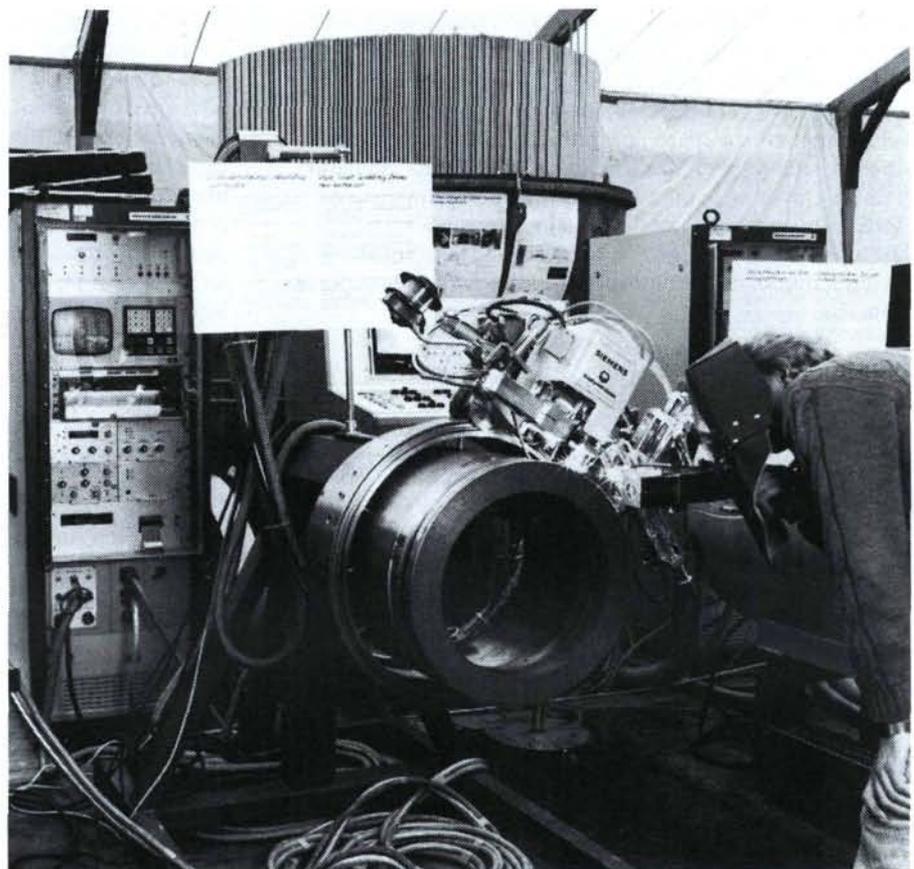
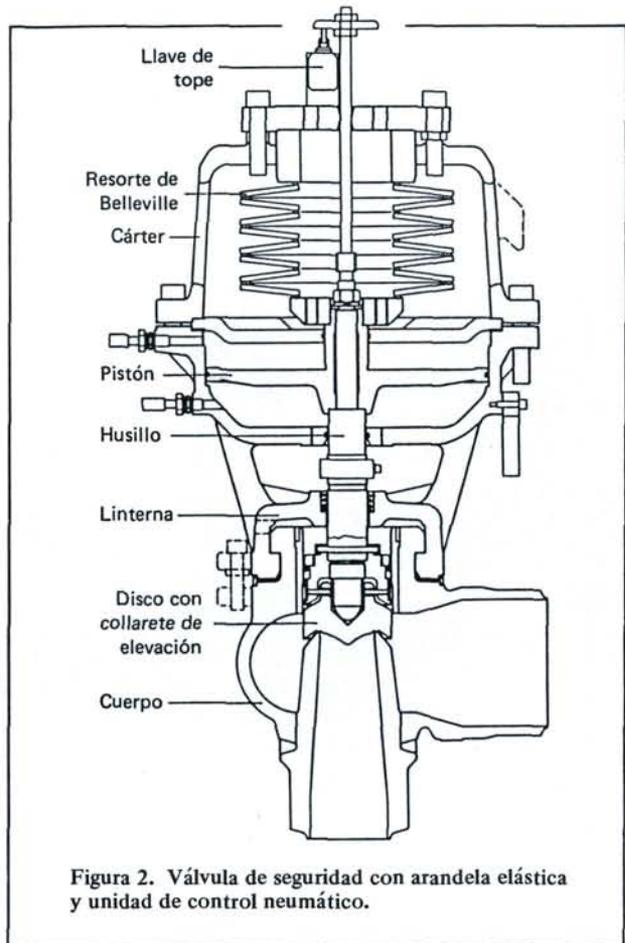
- fuente de alimentación con control de programación
- sistema de monitoreo
- cabeza soldadora
- manipulador a distancia de la cabeza soldadora
- dispositivos de refrigeración
- dispositivo de recocido (a los efectos del precalentamiento).

Los parámetros de soldadura pueden ser diferentes en cada una de las posiciones de una soldadura circunferencial, por lo que para lograr una capa constante se

necesita un programa para el control de la soldadura. La cabeza orbital de soldadura mostrada, guiada con el manipulador en una pista estrecha, puede soldar tuberías de hasta 120 mm de diámetro externo. La cabeza soldadora está equipada con una cámara de televisión que permite el monitoreo preciso del proceso de soldadura.

Los requisitos más rigurosos de seguridad actualmente en práctica exigen ensayos no destructivos de las soldaduras sometidas a presión durante las inspecciones en servicio de las centrales nucleares, utilizando técnicas tales como exámenes con ultrasonido o con rayos X. Si se efectúan exámenes con ultrasonido en superficies soldadas no preparadas, se pueden obtener indicaciones erróneas debido a imperfecciones de las soldaduras tales como deformación o contracción de la raíz. Si se rectifican las zonas de la raíz de las soldaduras circunferenciales hechas de un solo lado, se reduce considerablemente la iniciación de la fisuración de la raíz. Ahora es posible rectificar el diámetro interno de las tuberías a un grado de perfección tal que las indicaciones de la raíz de la soldadura se pueden obtener de manera rápida y precisa.

Un fabricante utiliza hoy día muy satisfactoriamente una máquina diseñada con tal finalidad, durante la construcción inicial y el ulterior reemplazo de las tuberías de todas las plantas de su fabricación. Se utiliza un sistema de control llamado "teach in" cuando es necesario rectificar soldaduras acodadas. Se han rectificado ya más de 3000 soldaduras sobre el terreno, la mayoría de las cuales se encuentran en lugares casi inaccesibles por otros medios.



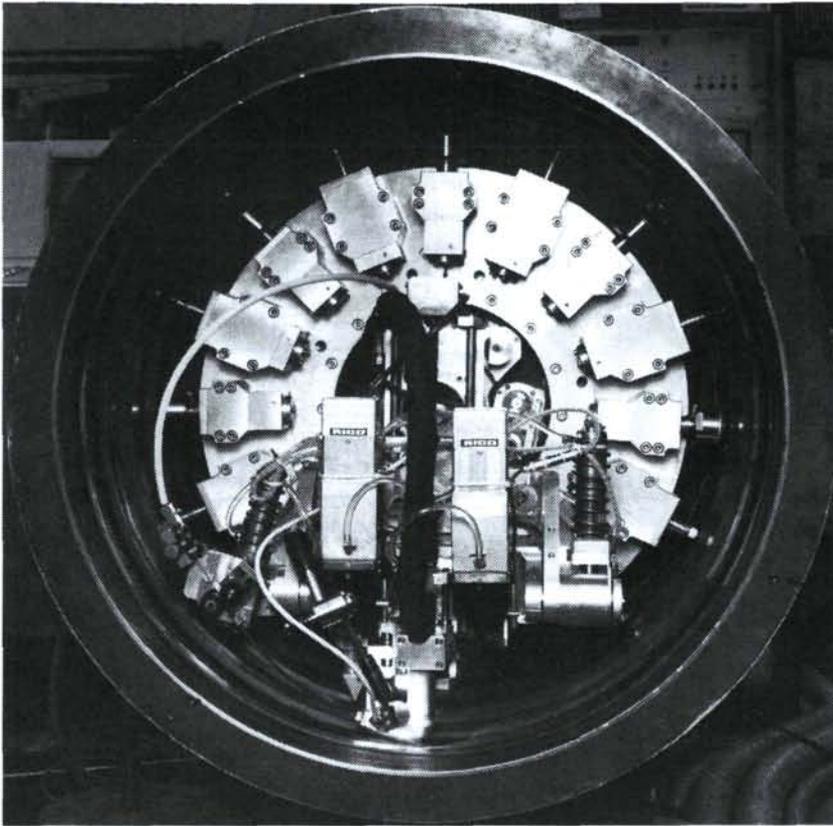


Figura 4. Máquina de soldar para el revestimiento interno de tuberías.

Esta máquina para rectificar el diámetro interior de las tuberías ha sido adaptada para servir como dispositivo portador y de puesta en posición de la cabeza soldadora con control remoto para el revestimiento interno de tuberías y para la reparación de tubos. El aparato de soldar, ilustrado en la Figura 4, consiste esencialmente del mismo equipo que se utiliza para la soldadura externa, pero comprende también un sistema de televisión para el monitoraje del proceso de soldadura y la puesta en posición. Se lo utilizó por primera vez durante la construcción de la central nucleoelectrica Philippsburg 2, en la que fueron revestidas sobre el terreno, con control remoto, 20 soldaduras de la tubería primaria.

Reparación por inserción de manguitos en tubos del generador de vapor

En los reactores de agua a presión (PWR) los generadores de vapor son la interfaz entre los sistemas primario y secundario. La experiencia recogida en períodos prolongados indica que los tubos del generador de vapor están expuestos a corrosión causante de pérdidas debidas a melladuras, adelgazamiento y fisuración por corrosión intergranular de tensión.

Las inspecciones periódicas en servicio para determinar las condiciones de los tubos son obligatorias. Los resultados de dichas inspecciones determinan si los tubos se pueden mantener en servicio o si se los debe obturar. Ahora bien, demasiadas obturaciones reducen la eficacia de la central nuclear y, por consiguiente, se ha desarrollado un "manguito sellador" específicamente

para la reparación de los tubos. La Figura 5 muestra esquemáticamente un manguito sellador. Este consiste de un tubo de Inconel-600 termotratado revestido con Ni-200, con un espesor de pared de aproximadamente 1 mm. Después de la limpieza, se inserta el manguito en el tubo defectuoso y se lo fija en el extremo superior mediante una soldadura fuerte con aleación de oro. Primeramente se dilata la zona de soldadura mediante expansión explosiva para establecer contacto entre el manguito y el tubo. La aleación de soldadura está contenida en dos ranuras anulares poco profundas del manguito; el calentamiento se hace con una bobina de inducción introducida en el manguito. El extremo inferior del manguito se suelda al tubo por soldadura explosiva. El método de la expansión mecánica no se utiliza por que podría crear tensiones residuales más importantes que las resultantes de la soldadura explosiva o de la expansión hidráulica.

La aplicación de manguitos en los tubos de un generador de vapor presenta varias ventajas:

- la reconstitución de la integridad estructural del generador de vapor
- la preservación de toda la capacidad de intercambio de calor
- la restauración de la vida útil teórica del generador de vapor
- la ejecución de la operación en forma rápida y apropiada.

La Figura 6 muestra un manipulador que se puede utilizar como herramienta universal para inspeccionar tubos en U de un generador de vapor con bajos niveles de exposición a las radiaciones. Se lo puede utilizar para:

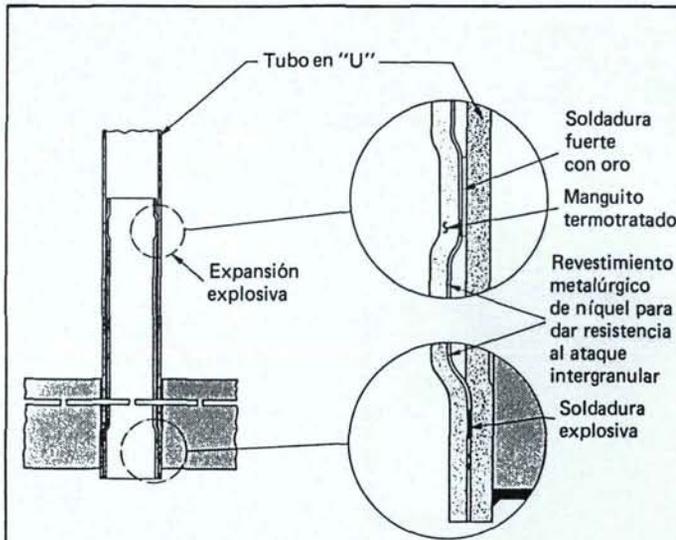


Figura 5. Introducción de manguitos en los tubos.

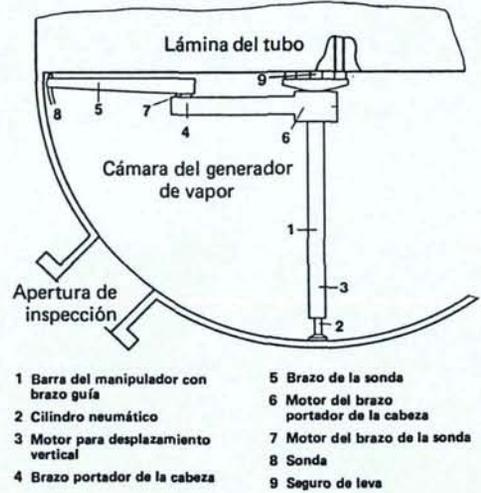


Figura 6. Manipulador de control remoto para la inspección y reparación de tuberías de generadores de vapor.

- ensayos no destructivos, es decir, inspección con corrientes de Foucault, ensayos con ultrasonido, perfilometría, inspecciones visuales
- obturación de tubos con tapones explosivos, tapones mecánicos desmontables y tapones soldados
- reparaciones: por ejemplo, inserción de manguitos en tubos y extracción de tapones defectuosos
- extracción de tubos para su examen ulterior.

Vasijas de presión de reactores de tamaño natural

La principal atracción de la exposición fue una vasija de presión de un reactor, de tamaño natural. La experiencia adquirida con los ensayos no destructivos básicos y periódicos de vasijas de presión de reactores (RPV) es de aplicación limitada, ya que aquellas que se encuentran en funcionamiento raras veces presentan fisuras y, por lo general, los defectos de fabricación ya han sido reparados. En el marco de un proyecto de investigación del Ministerio de Investigaciones y Tecnología de la República Federal de Alemania se ha puesto a disposición del MPA de Stuttgart una vasija de presión de tamaño natural con una vasta gama de defectos. Los defectos de la vasija se utilizan para cualificar y evaluar la eficacia de los procedimientos de ensayos no destructivos que son de utilización corriente.

La vasija de presión del reactor de agua en ebullición (BWR) tiene un diámetro interno de 5875 mm y el espesor de las paredes en la parte cilíndrica es de 146 mm. La cúpula superior tiene un espesor de 88 mm, la inferior de 202 mm y la altura total es de 17 500 mm. Esencialmente está constituida de material A508 Clase 2 y contiene varios materiales y condiciones defectuosas, así como toberas de diferentes formas (véase la Figura 7).

La finalidad principal del proyecto es demostrar y verificar la eficacia de los diversos métodos, tradicionales y recientemente desarrollados, de ensayos no destructivos junto con la utilización de sistemas de manipuladores automáticos en condiciones de funcionamiento simuladas. Los procedimientos y conceptos de ensayo

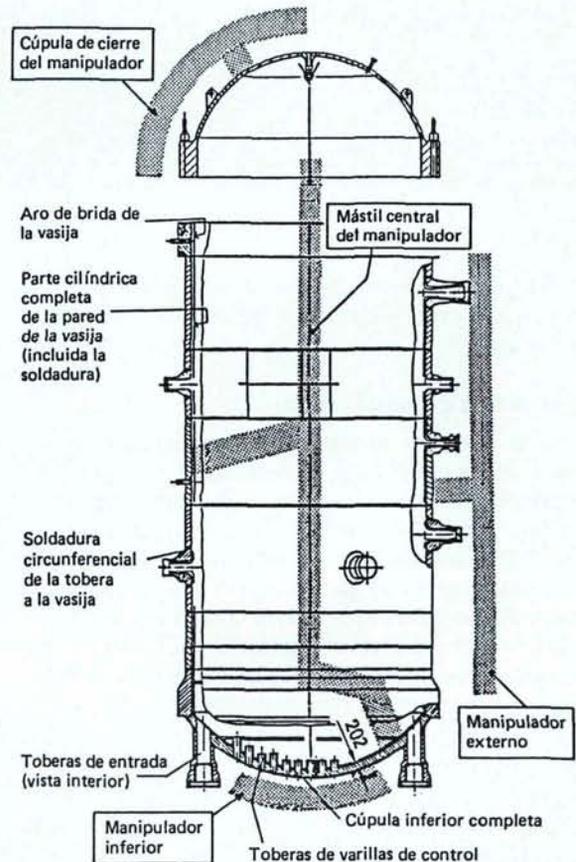


Figura 7. Zonas de ensayo de una vasija de tamaño natural.

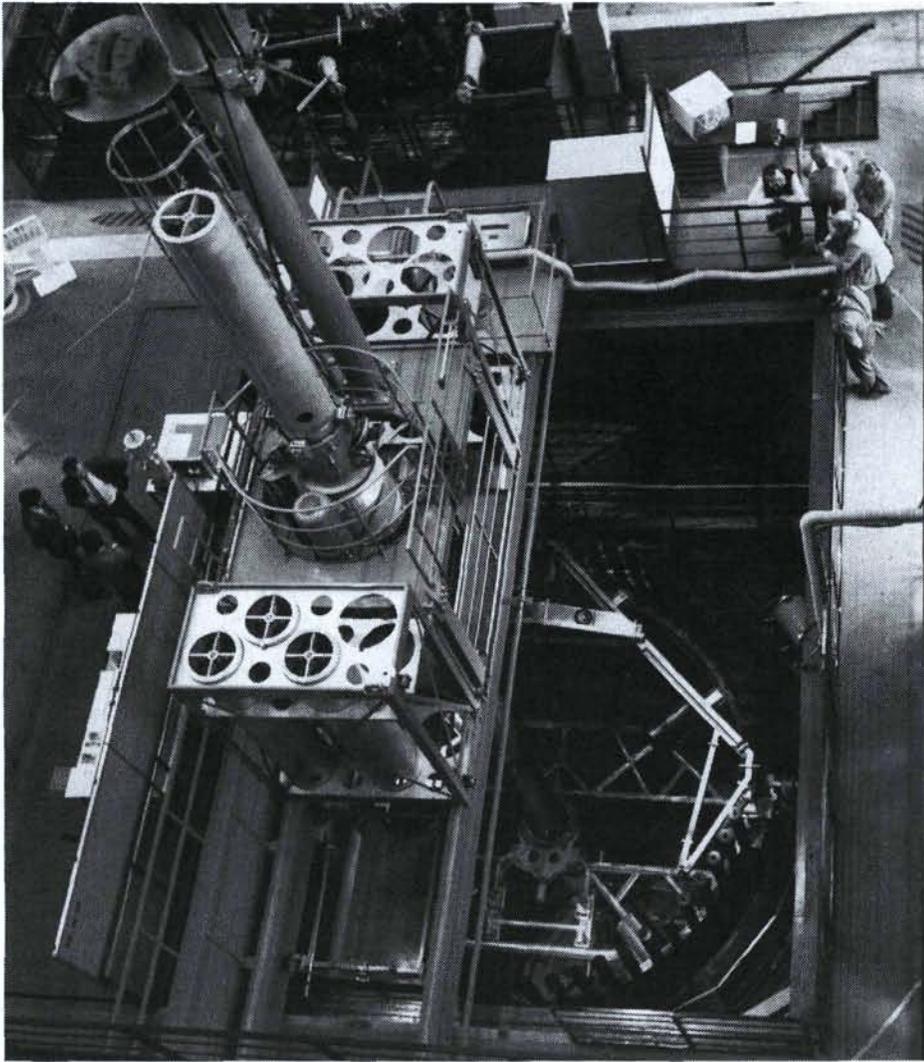


Figura 8. Manipulador de mástil central adaptado a una vasija de tamaño natural.

se optimizarán sobre la base de un análisis de defectos y sistemas. Las principales zonas de ensayo aparecen en la Figura 7.

Manipulador de mástil central

Se ha diseñado un manipulador de mástil central para la inspección interna por ultrasonido de las vasijas de presión de los reactores. Se ha dado particular importancia a la máxima flexibilidad en lo que se refiere a su utilización en vasijas de presión (principalmente PWR) de diversos tamaños. Para proceder a la inspección, se instala el manipulador de mástil central en un puente auxiliar. El mástil está compuesto de un cierto número de columnas cilíndricas centradas en un dispositivo ubicado al nivel de los pernos prisioneros. La parte inferior soporta los brazos de inspección (uno horizontal para la inspección del cilindro y de la tobera, y otro basculante para el fondo). Una grúa integral permite que el manipulador sea independiente de la grúa de construcción.

Para la inspección interna de la vasija BWR de tamaño natural se adaptó el manipulador a dimensiones más grandes (véase la Figura 8). El dispositivo de centrado se puede fijar a diferentes alturas dentro de la vasija, lo que permite una inspección completa.

Manipulador universal para la inspección de vasijas de presión de reactores BWR

El manipulador universal se desplaza sobre guías verticales fijas en el espacio intermedio de inspección que existe entre la vasija de presión y su aislación. Se puede llevar a cabo la inspección completa de la parte cilíndrica de la vasija de presión del reactor BWR y de las toberas, comprendido su radio. Para ello fue necesario dar una disposición especial a las toberas de la vasija de presión y optimizar el diseño del carro portador básico del manipulador, así como adoptar un número limitado de brazos de extensión a las diversas geometrías.

La Figura 9 muestra el manipulador universal en una maqueta de vasija de presión con un trozo de guía de 1:1 y una simulación de las limitaciones de movimientos impuesta por una tobera. El sistema de sondas múltiples se puede percibir claramente encima de la tobera simulada.

Manipulador para la inspección de ligamentos de la cúpula inferior

Para guiar sondas a distancia en las inspecciones periódicas obligatorias de las vasijas de presión de los reactores es ahora práctica común utilizar manipuladores

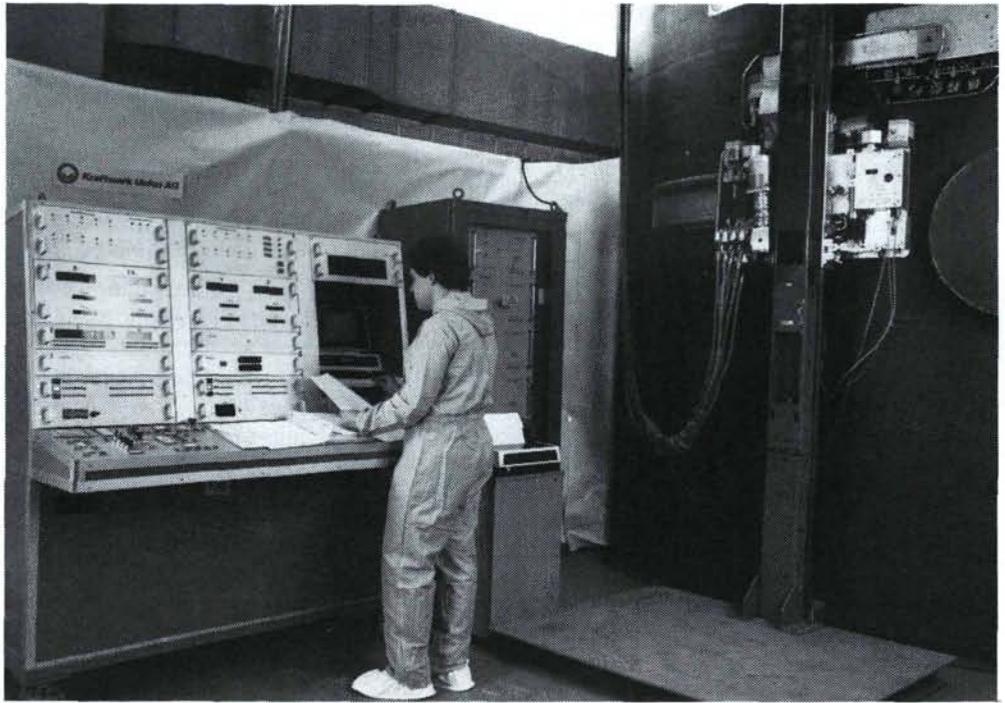


Figura 9. Manipulador universal en un modelo de vasija de presión de reactor.

normalizados de inspección que, equipados con todos los accesorios necesarios, están diseñados para explorar las zonas de inspección. Además, con frecuencia es necesario utilizar manipuladores de diseño especial para inspeccionar zonas o componentes determinados, especialmente cuando se requiere la inspección de la superficie exterior. Una de esas herramientas es un manipulador desarrollado para la inspección de los ligamentos de la cúpula inferior; está diseñado para guiar las sondas desde el exterior de un reactor BWR (véase la Figura 10).

El manipulador comprende muchos componentes separados: carriles de guías, carro portador de la sonda, montajes de las sondas, carro de transferencia y un tablero de control eléctrico y neumático. El carro portador de la sonda, equipado con diversos módulos de sonda intercambiables de acuerdo a las necesidades concretas, se desplaza siguiendo un sistema de carriles curvos instalados permanentemente en las bandas entre los ligamentos. El carro de inspección y el montaje de las sondas se mueven por control remoto desde el tablero de control eléctrico y neumático, transmitiéndose

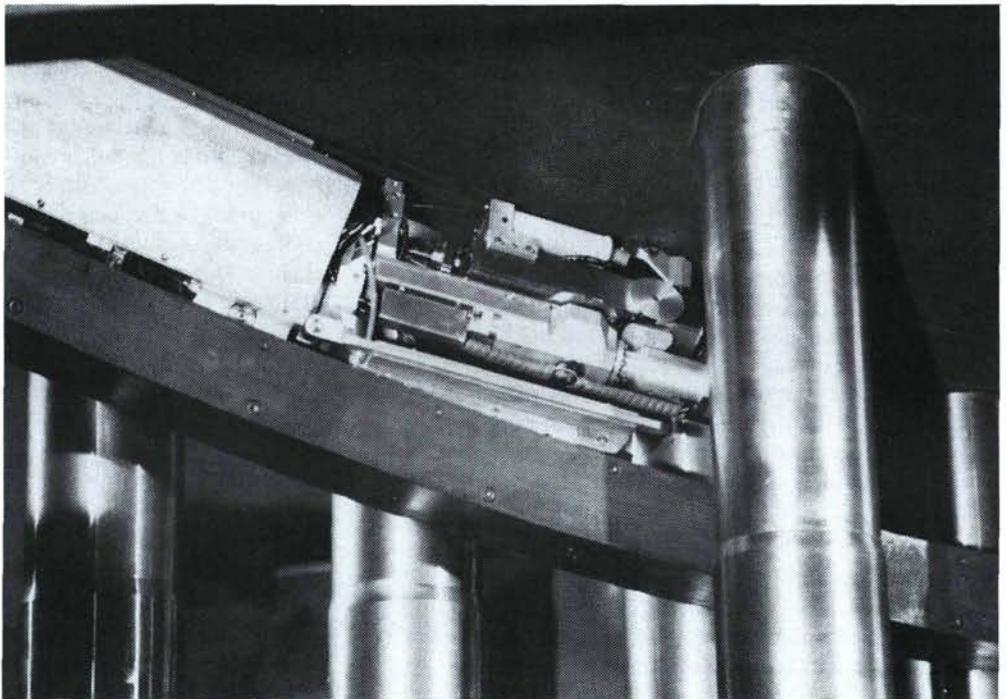


Figura 10. Manipulador para la inspección de ligamentos en la cúpula inferior.

instantáneamente su posición a los fines de indicación y registro (junto con los resultados del ensayo). El carro de transferencia se usa para pasar el carro de la sonda de un carril a otro.

Los carriles son vías en forma de "U", abiertas en la parte superior, con una cremallera integrada para mover el carro de la sonda y controlar la posición. El sistema de carriles está montado sobre soportes rígidos y rodamientos de deslizamiento suave para que no lo afecte la expansión térmica. Pasada la zona de la cúpula inferior el sistema de carriles se prolonga para que el carro de la sonda se pueda montar fuera de la zona de alta irradiación, donde se pueden también llevar a cabo todos los trabajos de mantenimiento necesarios y cambiar los módulos de sonda. El carro de la sonda es de propulsión autónoma, movido por un motor y guiado en los carriles por un sistema de piñón y cremallera. Tiene como función llevar los módulos de sondas siguientes, que están conectados por juntas articuladas y se pueden intercambiar según sea necesario: una sonda multicristal; un soporte voladizo que permite el movimiento de la sonda en forma perpendicular a la dirección de los pasillos; un módulo con tres sondas separadas; una cámara de televisión y proyectores luminosos, y un botolón de medición, para obtener datos dimensionales.

Manipuladores para la inspección de tuberías

Para la inspección en servicio de tuberías se cuenta con varios "conjuntos" de manipuladores de equipo modular básico. A cada juego de manipuladores corresponde un dispositivo modular de ensayo por ultrasonido y un sistema de tratamiento de datos.

La Figura 11 muestra un manipulador de cinturón. Se monta un cinturón guía en la periferia del tubo cerca de la zona que se desea inspeccionar. Un carro con un brazo de extensión variable que permite el movimiento perpendicular con respecto al cinturón transporta el sistema de sonda permitiendo un movimiento sinuoso. La altura del manipulador es relativamente pequeña (120 mm aproximadamente), por lo que se lo puede utilizar en centrales que ya se encuentran en funcionamiento. La gama de los diámetros de las tuberías que se pueden examinar va de 160 a 1500 mm.

Examen de tuberías de generador de vapor con corriente de Foucault

La integridad de los tubos del intercambiador de calor de los generadores de vapor debe ser comprobada periódicamente para cerciorarse de que no haya escapes de refrigerante radiactivo al circuito secundario. Como en el generador de vapor hay radiactividad, con el correspondiente riesgo de exposición a las radiaciones del personal de mantenimiento, el examen requerido debe efectuarse en forma rápida y extremadamente fiable por medio de dispositivos de control remoto.

Los ensayos con corriente de Foucault se utilizan para localizar posibles defectos. Se pueden utilizar procedimientos analíticos especiales para describir cualquier defecto en términos de su posición, magnitud y origen. Los cambios en las propiedades físicas de los tubos debidos a daños se determinan a partir de los resultados de dos campos magnéticos alternativos super-

puestos. Uno es generado por una sonda de ensayo, que induce corrientes de Foucault en el tubo. Estos a su vez producen un campo magnético alternador en sentido opuesto al del campo iniciador. Es preciso utilizar varias frecuencias de ensayo al mismo tiempo a fin de garantizar que ni la disposición del tubo ni los depósitos conductores de electricidad acumulados en la pared del tubo interfieran con la señal del defecto y, por ende, con la detección del defecto.

Utilizando este proceso de examen se puede detectar con fiabilidad todo adelgazamiento del espesor de la pared igual o superior al 20%, y determinar si es un defecto interno o externo. Además, durante el examen de los tubos se puede detectar el nivel de cualquier sedimento en el lado secundario.

Para efectuar el examen con corriente de Foucault es indispensable disponer del equipo siguiente:

1. el manipulador, que consiste de una unidad de puesta en posición, un dispositivo de alimentación y un dispositivo de control;
2. un dispositivo de ensayo de corriente de Foucault de frecuencia múltiple, incluyendo sondas de ensayo
3. equipo de obtención y tratamiento de datos
4. contenedor de instrumentos y equipo de control.

La Figura 12 muestra el modelo de una cúpula de cámara primaria con el equipo de ensayo de corriente Foucault, tal como fue expuesto.

Sistema de sonda de fases multiples

Este sistema fue desarrollado por el Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (Izfp) para la inspección mediante ensayos no destructivos básica y en servicio de las vasijas de presión del reactor. El sistema consiste de 24 canales controlados por micro-computadora. Se utiliza una línea de dispositivos de acoplamiento de carga (CCD) para demorar los impulsos transmitidos y recibidos. Los tiempos de demora se pueden variar cambiando el temporizador de frecuencias. Cada plaqueta CCD contiene dos canales. El primero demora apropiadamente el tren de ondas sinusoidales que excitan, tras amplificación lineal, la serie de elementos de sonda. Las señales de eco preamplificadas se demoran en el segundo canal de las plaquetas CCD, se suman y aparecen en la pantalla como imagen de exploración A o imagen de exploración B. Los módulos sintetizadores generan las frecuencias de temporización. Una micro-computadora efectúa el cálculo de las frecuencias de temporización y el control del tiempo básico de la gráfica de ejes x-y. La frecuencia central puede variarse de 0,5 a 5 MHz y la longitud de la impulsión entre 1 y 20 Hz. Mediante el adecuado ajuste de fase se pueden generar ondas longitudinales, transversales y superficiales; y mediante una adecuada excitación de la serie de elementos de sonda se pueden dirigir, enfocar y formar campos de ultrasonidos. La rápida formación de haces electrónicos mediante series escalonadas ofrece nuevas posibilidades con respecto a la reconstrucción y clasificación de defectos. Se pueden distinguir fundamentalmente tres enfoques:

- con la sonda fija en una posición se puede explorar el defecto con un haz sónico fino (exploración de sector);

Figura 11. Manipulador de cinturón para la inspección de tuberías.

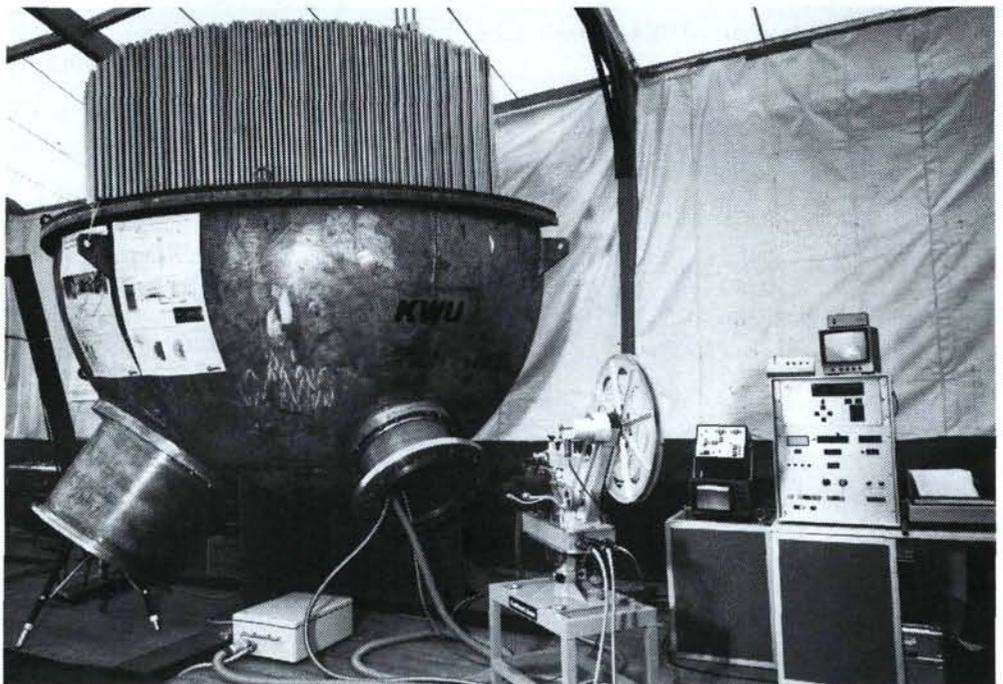
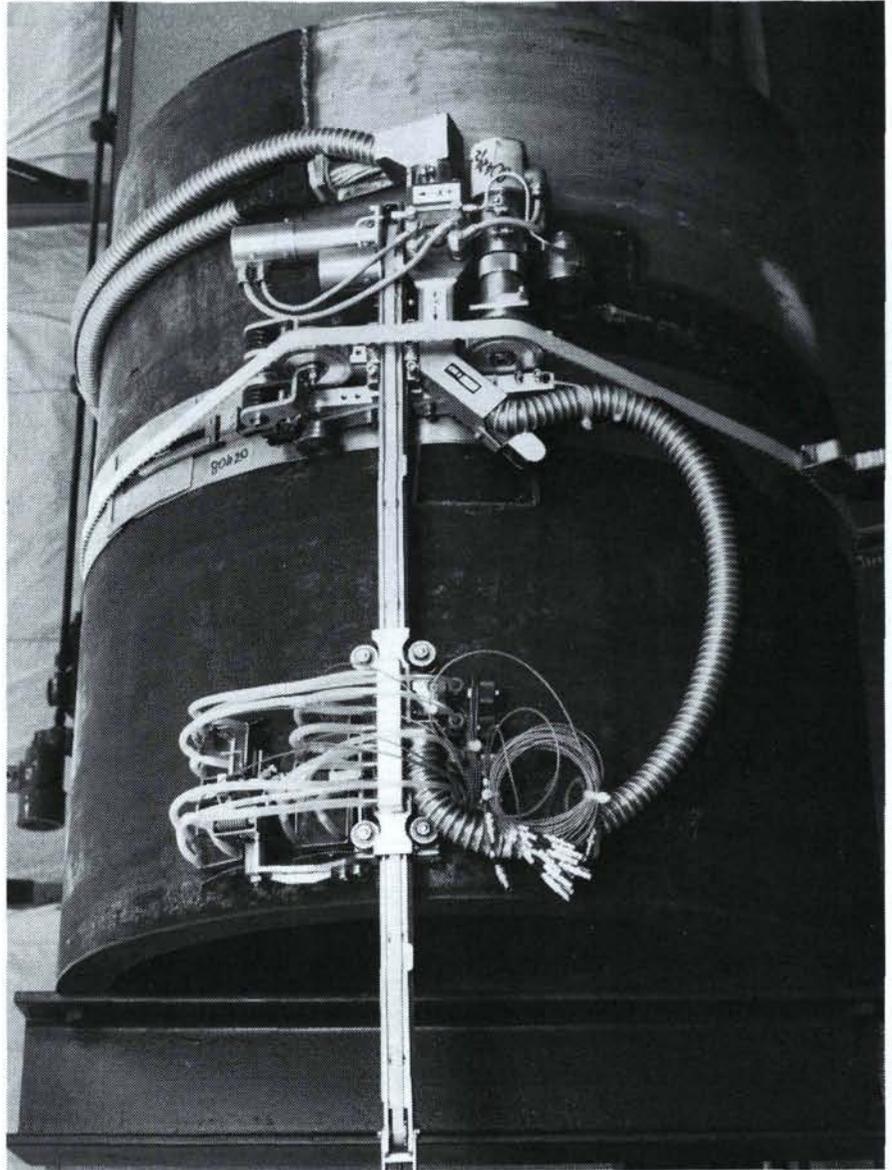


Figura 12. Modelo de cúpula de cámara primaria con equipo de corriente de Foucault.

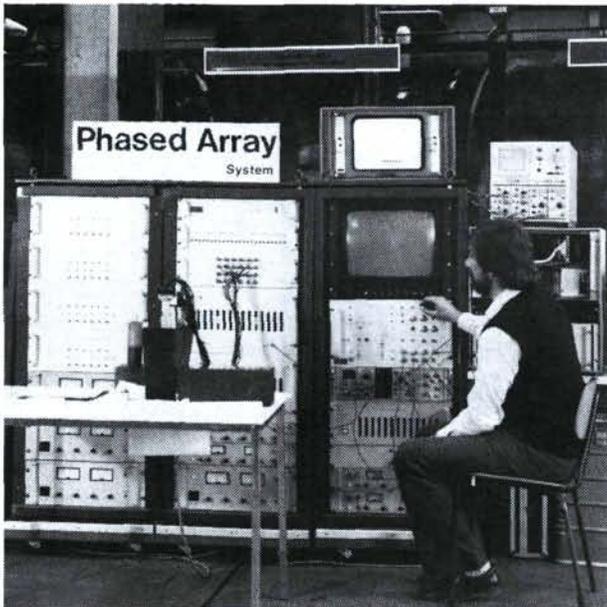
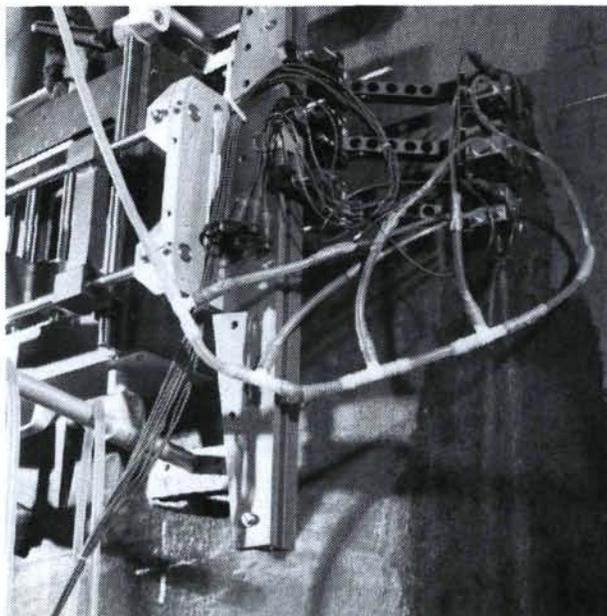


Figura 13. Sistema de sondas de fases múltiples.

- con el manipulador se puede mover la sonda y en cada posición se puede hacer una exploración de sector. En una imagen de la memoria se superponen todas las exploraciones de sector (exploración compuesta);
- en cada posición de la sonda se puede efectuar una exploración de sector con un haz abierto, y registrar en la dirección azimutal la altura máxima del eco. La curva de amplitud de trayectoria de la exploración compuesta así obtenida representa directamente la orientación del defecto.

La Figura 13 muestra la configuración del sistema preparado para el examen de una pieza de prueba.

Figura 14. Sistema de sondas ALOK con manipulador.



Sistema ALOK (curvas de amplitud – tiempo de vuelo – lugar geométrico)

El sistema ALOK fue diseñado por el IzfP para efectuar inspecciones en servicio de vasijas de presión y de componentes de reactor, como un sistema para detectar defectos de gran capacidad de detección y alto poder de resolución. Posee también una capacidad inherente para la caracterización de defectos. La Figura 14 muestra un sistema de sonda ALOK y su manipulador, montados en una vasija de tamaño natural. Un sistema de transmisión utiliza emisiones multiplex de alta frecuencia en las unidades de entrada, que transfieren todas las señales de ensayo a un sistema de tratamiento de señales. La determinación del valor de punta de la señal de alta frecuencia se hace en un sistema compactador de señales. Se mide el tiempo de tránsito, lo que indica la profundidad del fallo, y simultáneamente el compactador vigila la situación del contador de profundidad del fallo y efectúa la reducción de los datos.

Las coordenadas locales del sistema de sonda y los valores de amplitud/tiempo de tránsito se compilan en forma de bloques de datos. Cuando el bloque de datos alcanza una determinada importancia, se transfieren los datos a la computadora o a un dispositivo de almacenamiento en masa. El dispositivo principal de dirección coordina todo el sistema. Durante el examen se puede obtener en la pantalla la imagen de exploración A de cada función de ensayo, con sus curvas de amplitud lineales o logarítmicas.

Con la técnica ALOK se almacena la señal de fallo si un cierto número de semiondas antes y después del máximo son iguales o inferiores al máximo. La decisión depende de la forma de la señal del transductor utilizado. Mediante esta técnica todas las señales, aun cierta información sobre perturbaciones, se almacenan según el tiempo de tránsito; las indicaciones pertinentes se pueden separar del ruido estocástico de fondo y, mediante la determinación de la pauta, de los efectos geométricos.

Holografía lineal acústica

La holografía lineal acústica es un método para analizar los defectos detectados determinando sus dimensiones. Se "ilumina" el defecto con un haz divergente procedente de una sonda ultrasónica. Los datos sobre amplitudes y fases se miden, almacenan y superponen numéricamente con respecto a una onda de referencia. El holograma formado como resultado de este procedimiento puede servir como base para la reconstrucción del campo de ultrasonido en el semiplano inferior a la línea de apertura.

Para los defectos planares con orientaciones perpendiculares a la superficie resulta muy adecuada la técnica de tandem. En la Figura 15 se ilustra cómo se efectúa una medición, en una vasija de prueba de grandes dimensiones, de uno de los 120 defectos investigados. Para efectuar la medición se requiere un manipulador especial de análisis (de gran precisión y una resolución de posición superior a 1/10 de la longitud de onda). El aparato se puede montar en el manipulador de mástil central o en el manipulador del circuito primario.

Inspección visual a distancia de reactores avanzados refrigerados por gas

Los reactores nucleares comerciales británicos están diseñados para que tengan una vida útil de más de 25 años. Uno de los métodos utilizados por la Central Electricity Generating Board para confirmar la integridad constante es una inspección visual periódica del interior del reactor durante las paradas. La cámara de televisión modular TRIUMPH (Figura 16) se utiliza para efectuar la mayoría de las inspecciones visuales. Tiene una longitud total de 1000 mm, está refrigerada por gas y se puede montar en una variedad de unidades de elevación y manipuladores. Se la ha utilizado en temperaturas ambientales de 120°C. Tiene un alcance visual de hasta 6 m. Un prisma montado en el módulo frontal puede oscilar en una gama de 105°. Detrás de este módulo se encuentra un juego óptico motorizado de zoom de 6:1 que incorpora una gama ampliada de distancias focales para permitir el examen de objetos muy cerca de la cámara utilizando iluminación frontal. El módulo de la cámara de televisión utiliza un tubo de bajo nivel de iluminación de 16 mm. El último módulo contiene el elemento principal de iluminación que se puede inclinar en el ángulo requerido. El conjunto completo puede girar más o menos 180°. La cámara completa, con lentes y sistema de iluminación, se controla a distancia.

Para los reactores avanzados refrigerados por gas Hartlepool y Heysham I se han desarrollado cámaras y manipuladores para inspeccionar la cúpula superior y las tuberías de la caldera. Tal como se indica en la Figura 17, la zona de cada una de las cúpulas de las calderas ha sido equipada con dos sistemas de carriles circulares; en un carro que se desplaza por los mismos, se puede transportar una cámara compacta de 16 mm provista de su propia fuente de iluminación. La cámara tiene enfoque remoto, puede efectuar una rotación de 180° y está refrigerada por gas.

Después de retirar un circulador de gas, se guía la cámara de televisión para examinar el tubo de la caldera por el espacio de 25 mm que existe entre los tubos concéntricos (véase la Figura 18). La cámara tiene una sección transversal de 43 mm por 18 mm. También en este caso posee enfoque remoto, puede girar 360° y está refrigerada por gas.

Se añaden varillas de prolongación a la sección frontal de la cámara a medida que se la introduce en el espacio entre los tubos. En la parte frontal de la cámara hay un espejo para la observación lateral, que se puede mover fuera del campo de visión para permitir la observación frontal. Se ha desarrollado una cámara fotográfica que tiene las mismas dimensiones transversales.

La necesidad de inspeccionar visualmente a distancia la parte superior de la cúpula desviadora de gas ha dado como resultado el desarrollo del manipulador de eslabones (véase la Figura 19). Este manipulador puede colocar una cámara de televisión en diversas orientaciones. Puede alcanzar hasta 7 m utilizando una apertura de acceso del reactor de solo 260 mm de diámetro. Este dispositivo se encuentra aún en perfeccionamiento para permitir

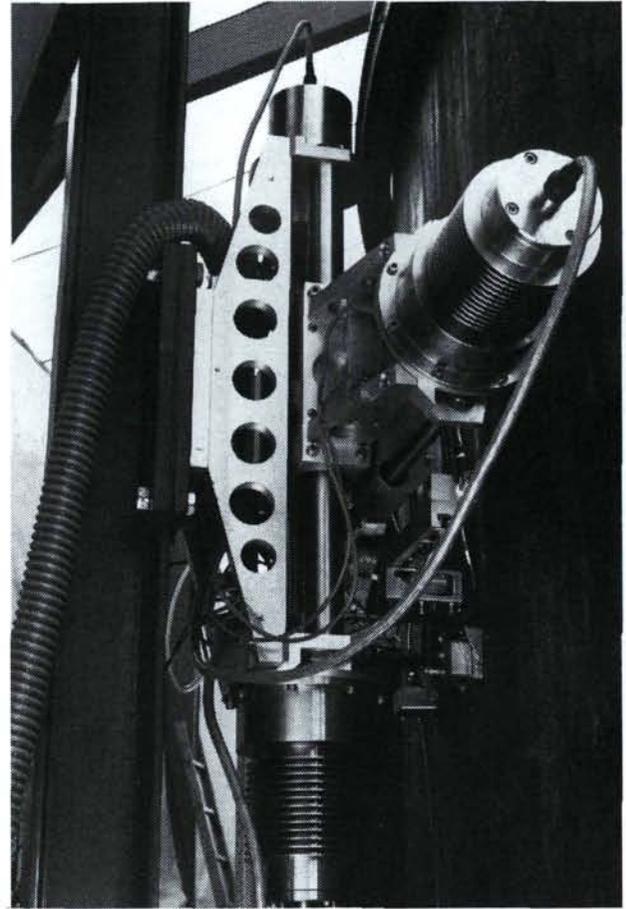
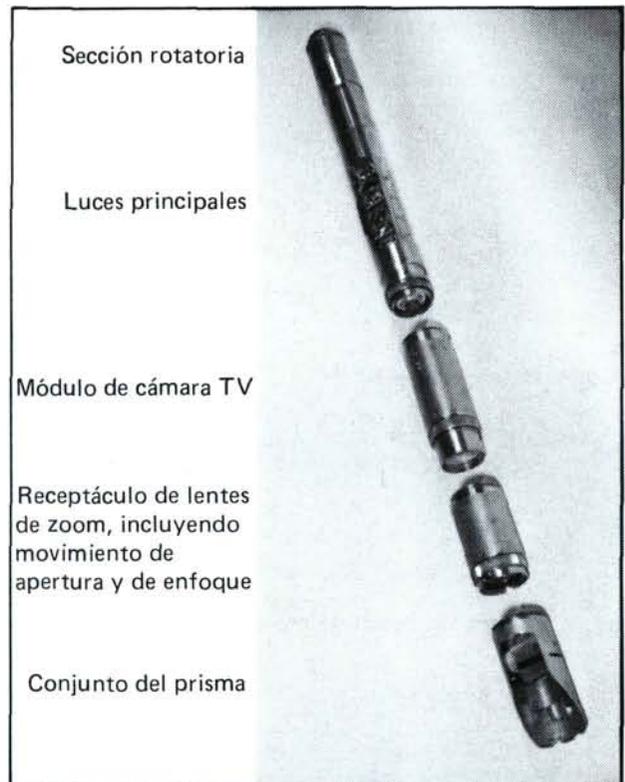


Figura 15. Manipulador de análisis para holografía lineal acústica.

Figura 16. Conjunto TRIUMPH de 70 mm de diámetro.



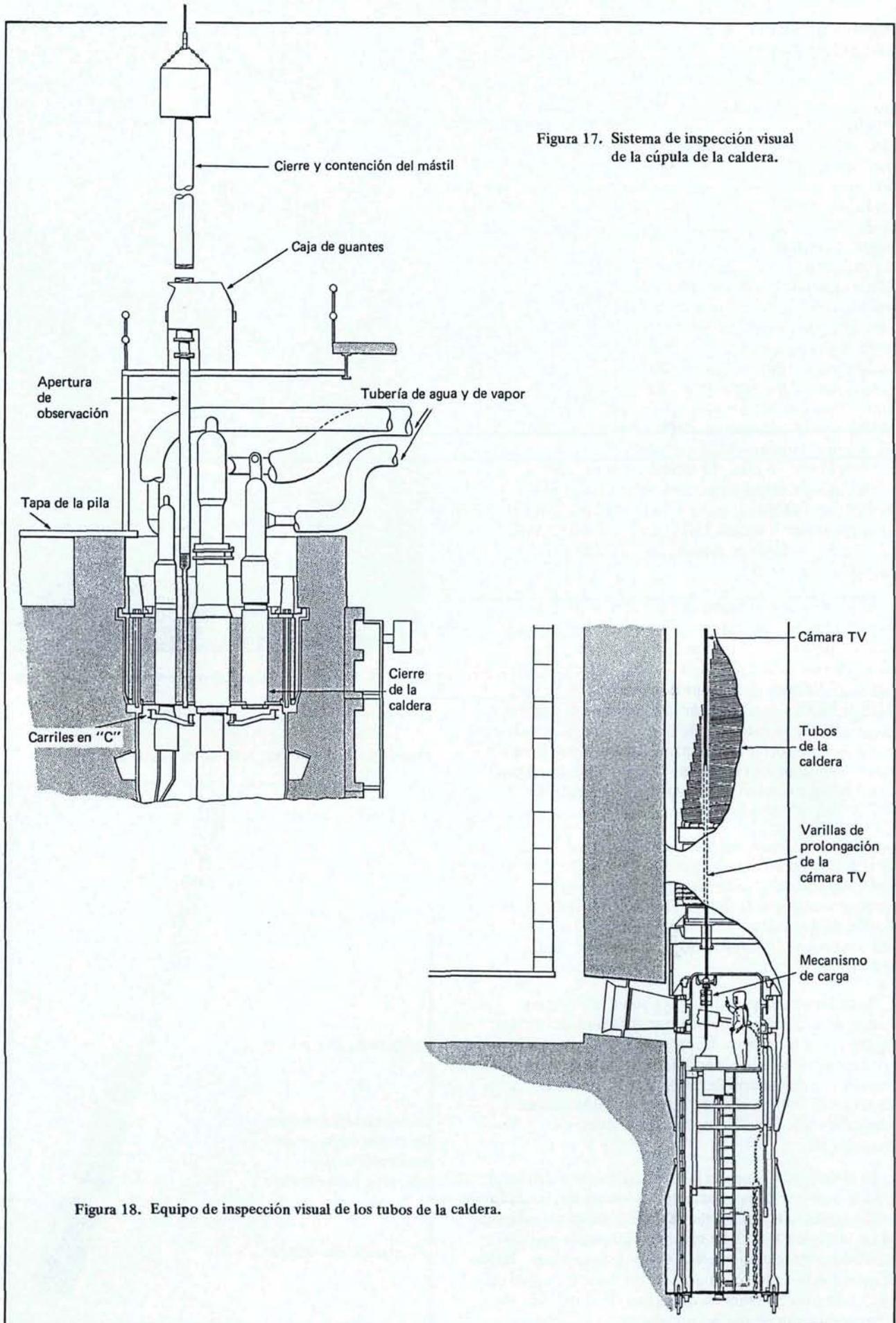


Figura 17. Sistema de inspección visual de la cúpula de la caldera.

Figura 18. Equipo de inspección visual de los tubos de la caldera.

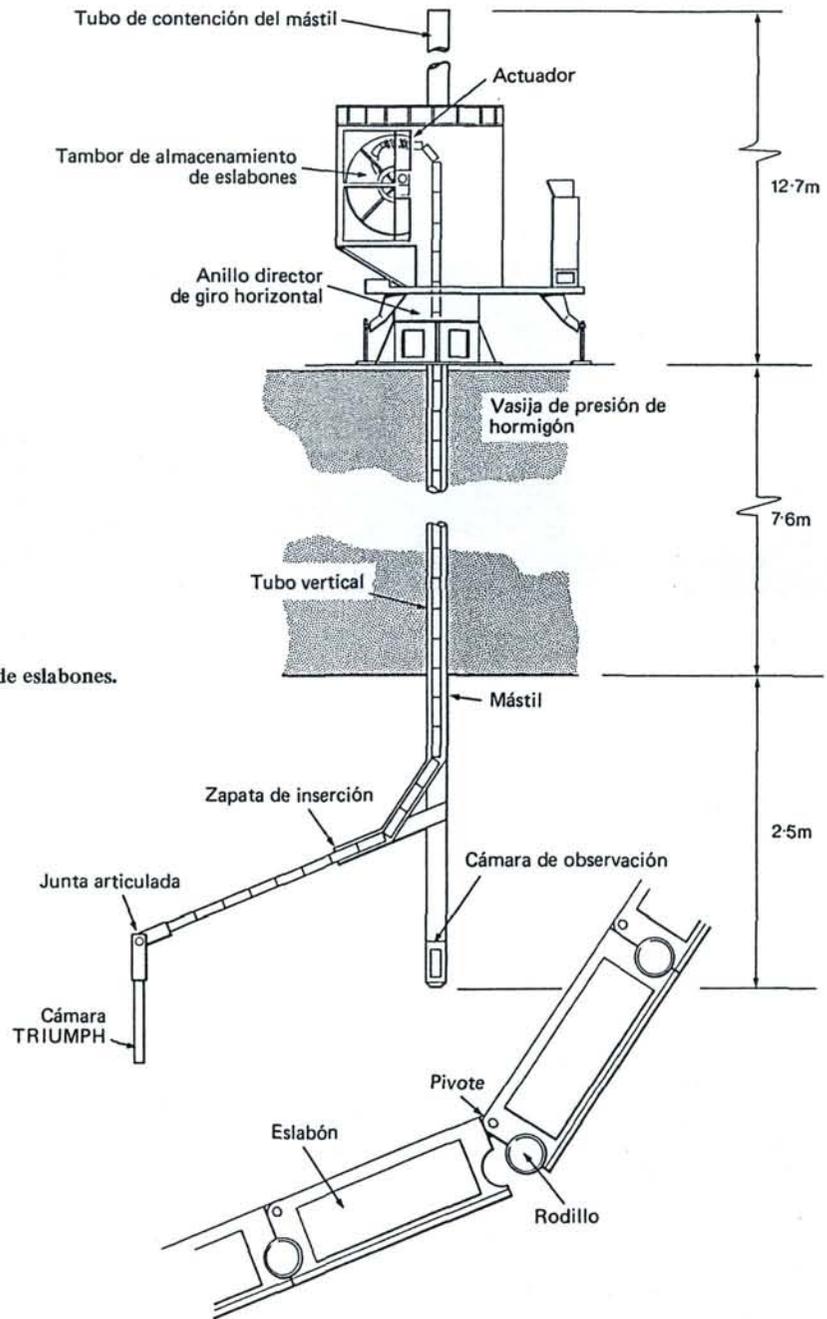


Figura 19. Esquema de manipulador de eslabones.

las inspecciones visuales por debajo de la cúpula deflectora de gas en regiones periféricas del circuito de presión.

Manipuladores reforzados para operaciones a distancia

Los ejemplos de los métodos de ensayos no destructivos mencionados ponen en evidencia el éxito que se ha logrado en la detección y determinación del tamaño de los fallos, junto con una reducción de la exposición a las radiaciones del personal que hace los ensayos utilizando sistemas de manipuladores automáticos.

Para otras tareas tales como las reparaciones necesarias del revestimiento de las vasijas o, llegado el caso, el desmantelamiento de las vasijas de presión, para las que se necesita un sistema manipulador que pueda portar las diferentes herramientas automáticas en un medio ambiente altamente radiactivo y que sea capaz de levantar o sostener equipo pesado, se ha desarrollado un sistema manipulador reforzado controlado a distancia que posee un cierto número de aparatos automáticos adaptables para el maquinado mecánico o térmico de aceros al carbono o de aceros inoxidables. La primera aplicación industrial de este sistema manipulador será

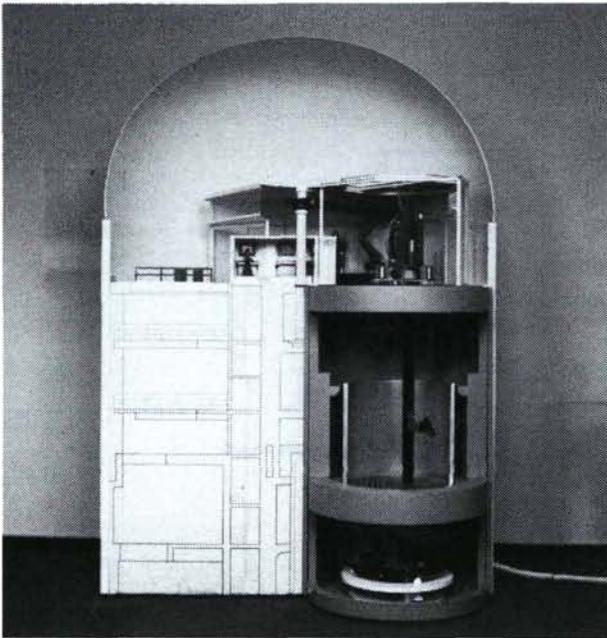


Figura 20. Modelo operacional en escala de 1 : 15 de sistema manipulador reforzado controlado a distancia.

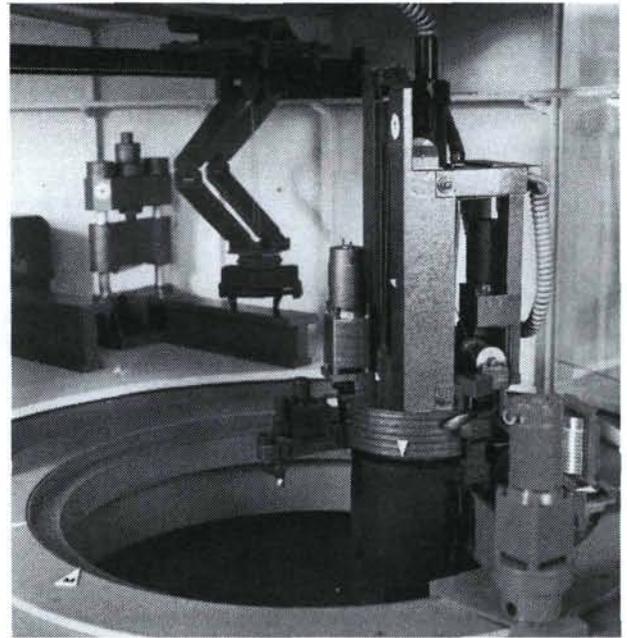


Figura 21. Vista del sistema manipulador reforzado, con la abertura de la viga anular rotatoria.

el desmantelamiento a distancia de un tubo de presión activado de reactor como parte de un proyecto llave en mano para la clausura de la central nucleoelectrica de Niederaichbach.

La Figura 20 muestra un modelo operacional completo a escala de 1 : 15 de uno de dichos sistemas de manipuladores, instalado en una réplica de la central de Niederaichbach.

Los movimientos multidireccionales del manipulador comprenden la rotación de 380° de la viga anular, que sirve de estructura de apoyo del manipulador instalada en la base original de la máquina para la manipulación de elementos combustibles en el piso superior del reactor (Figura 21), sobre el que funciona un brazo excéntrico que se desliza horizontalmente. El mástil del manipulador, que también tiene una rotación de 380° , está montado en la pieza corrediza horizontal. Una pieza corrediza vertical, equipada con una abrazadera universal y con un adaptador para herramientas especiales, se desplaza a lo largo del mástil. Existe una posición determinada en la que la pieza corrediza

vertical puede pasar de la parte inferior de la viga anular a la parte superior del mástil. Este sistema presenta pues una ventaja especial con respecto a la transferencia de piezas o de herramientas adaptadas del piso superior a la zona operacional dentro de la vasija del reactor, o viceversa.

El sistema tiene un gran diámetro operacional, igual al de la abertura de la viga anular, y para su estabilización no necesita ningún afianzamiento adicional dentro de la vasija. La capacidad del diseño del sistema es de tres toneladas.

Agradecimientos

El Staatliche Materialprüfungsanstalt agradece profundamente el apoyo a la preparación del presente informe prestado por Brown Boveri Reaktor GmbH, Bopp and Reuther GmbH, CEGB Generation, Development and Construction Division, Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, Kraftwerk Union AG, M.A.N. Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG, y Gg. Noell GmbH.