

ÚLTIMAS EXPERIENCIAS EN LAS INSPECCIONES POR EL INTERIOR DEL ESCUDO DE LAS VASIJAS DE LOS BWR

R. ALBERDI - E. GONZÁLEZ

En los últimos años, los propietarios de centrales nucleares BWR se han visto obligados a afrontar nuevos requisitos de inspección del escudo del combustible. La respuesta a esta situación por parte de TECNATOM ha sido el lanzamiento de los proyectos TEIDE, que incluyen el desarrollo de una máquina de inspección y de las correspondientes técnicas de Ensayos No Destructivos para el examen por el interior del escudo. Con estos proyectos TECNATOM ha realizado más de 12 inspecciones del escudo del combustible en distintos países. En este artículo se trata de reflejar la experiencia adquirida en los últimos tres años.

In recent years, the owners of BWR type nuclear power plants have had to address new inspection requirements relating to the core shrouds inside reactor vessels. With a view to addressing this problem, Tecnatom has in recent years launched several projects, grouped under the generic name TEIDE, to develop a scanner and the NDE techniques to examine the shroud welds from ID. With these tools, TECNATOM has performed more than 12 core shroud inspections in the United States, Switzerland and Spain. This article deals with the experience obtained performing shroud inspections during the last three years.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los propietarios de centrales nucleares de tipo BWR se han visto obligados a afrontar nuevos requisitos de inspección del escudo del combustible situado en el interior de la vasija del reactor, cuya misión es contener los elementos de combustible, sirviendo a su vez de apoyo a las estructuras situadas en la parte superior del reactor.

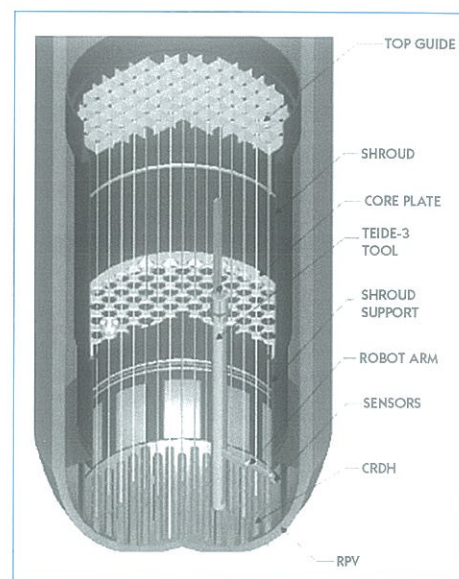
Este componente consiste en un cilindro de espesor en torno a los 40-50 mm, fabricado a partir de distintas virolas de acero inoxidable 304 e INCONEL, unidas entre sí mediante soldaduras verticales y circunferenciales. Es evidente que la aparición de grietas inestables en dichas soldaduras podría afectar directamente a su integridad es-

tructural y a la seguridad de la planta.

Los análisis tensionales realizados basados en las condiciones de servicio y en los materiales de que está formado el escudo, corroborados por la experiencia aportada por los exámenes visuales realizados en distintas plantas durante las paradas para recarga, postulan agrietamientos paralelos al cordón de soldadura y abiertos a la superficie interior, con progresión hacia el exterior. Pueden ser de dos tipos: IASCC (Irradiated Assisted Stress Corrosion Cracking) o IGSCC (Intergranular Stress Corrosion Cracking), y pueden aparecer a ambos lados de la soldadura, en la zona térmicamente afectada. La necesidad de posicionar, dimensionar en longitud y profundidad, y evaluar con fiabilidad las potenciales grietas detectadas mediante el examen visual previo, ampliando el alcance a cualquier defecto presente en el espesor del componente, exige el empleo de avanzadas técnicas de ensayos no destructivos (END's).

Desde el punto de vista del acceso al escudo del combustible y del ataque de la superficie a examinar, pueden plantearse dos alternativas claras: inspección desde el exterior del componente, moviéndose en la zona denominada "annulus" comprendida entre las paredes de la vasija y del componente (inspección OD), o inspección desde el interior (inspección ID).

Buscando soluciones a este problema, Tecnatom ha lanzado en los últimos años varios proyectos agrupados bajo el nombre genérico de TEIDE, con el objetivo de desarrollar máquinas de

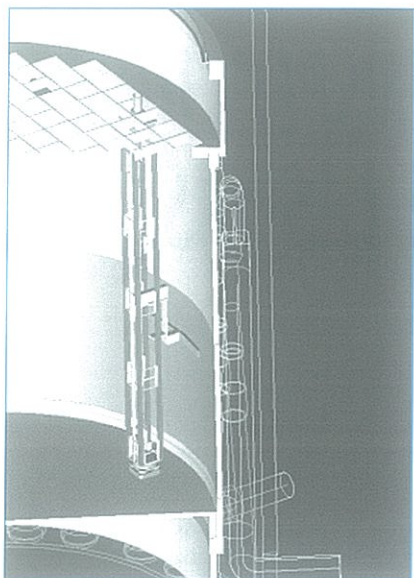


Interior de vasija. TEIDE-3 instalado

inspección y técnicas de ensayos no destructivos tratando de alcanzar el máximo recubrimiento posible de estos componentes.

De las dos opciones se optó por la inspección ID, que aporta, desde nuestra opinión, las siguientes ventajas:

- Máxima longitud de soldadura inspeccionada. Elimina las interferencias con las bombas de chorro y los sistemas presentes en el annulus que afectan a las inspecciones OD.
- Las reparaciones que se efectúan en los escudos del combustible en servicio añaden siempre nuevos elementos fijos por el exterior del mismo, dado que el espacio de los elementos



Escudo del combustible. TEIDE-2 instalado

combustibles debe mantenerse libre. Este hecho garantiza la viabilidad de las inspecciones ID, obstaculizando cada vez más las de tipo OD.

- Reducción del tiempo de inspección y de los imprevistos: mantenimiento de la planificación, reducción de dosis al personal, reducción del tiempo de camino crítico.
- Altas prestaciones en precisión y repetibilidad, al poder utilizar como apoyo las celdas de los elementos combustibles y la guía superior.
- Simplificación de los trabajos de posicionamiento del equipo (similar a

la instalación de los elementos combustibles).

En lo referente a las técnicas de inspección se optó por incorporar ultrasónicos (UT) y corrientes inducidas (ET) adquiriendo simultáneamente. La técnica ultrasónica proporciona, por medio de diferentes sensores reunidos en un sólo palpador, el dimensionamiento en longitud y profundidad de los agrietamientos cuya orientación preferente sea paralela a la soldadura, ya estén abiertos a la superficie interior o exterior (examen volumétrico principal).

La técnica de corrientes inducidas, por su parte, se justifica por la mayor precisión que garantiza en el dimensionamiento en longitud de defectos abiertos a la superficie de exploración (examen superficial complementario). Adicionalmente, esta técnica garantiza una alta fiabilidad en la detección de defectos y en su visualización en tiempo real.

TEIDE-1 Y TEIDE-2

El desarrollo de estos equipos mecánicos se ha realizado en diferentes fases desde 1996 hasta 1998, dentro de proyectos de mayor alcance que incluyeron también la puesta a punto de las técnicas y los procedimientos de inspección, la fabricación de bloques para ensayos de laboratorio y validación, y las pruebas finales de cualificación ante los clientes. Los trabajos han cul-

minado con el diseño, fabricación y puesta a punto de dos manipuladores capaces de realizar la inspección automatizada de las soldaduras verticales (TEIDE-1) y circunferenciales (TEIDE-2) situadas a la altura del núcleo, en el escudo de la vasija de reactores de tipo BWR.

Estos equipos son colocados en el interior del escudo del combustible, trabajando en inmersión y controlados remotamente desde fuera del área contaminada. Las comunicaciones se hacen mediante una línea de fibra óptica de hasta dos kilómetros de longitud, evitando en lo posible las interferencias debidas al ruido radioeléctrico.

Los TEIDE pueden adaptarse a distintas versiones de reactor BWR, maximizando el volumen de soldadura inspeccionado, compatibilizándolo con el mínimo número de introducciones en vasija posible (reducción de tiempos de inspección y de dosis al personal).

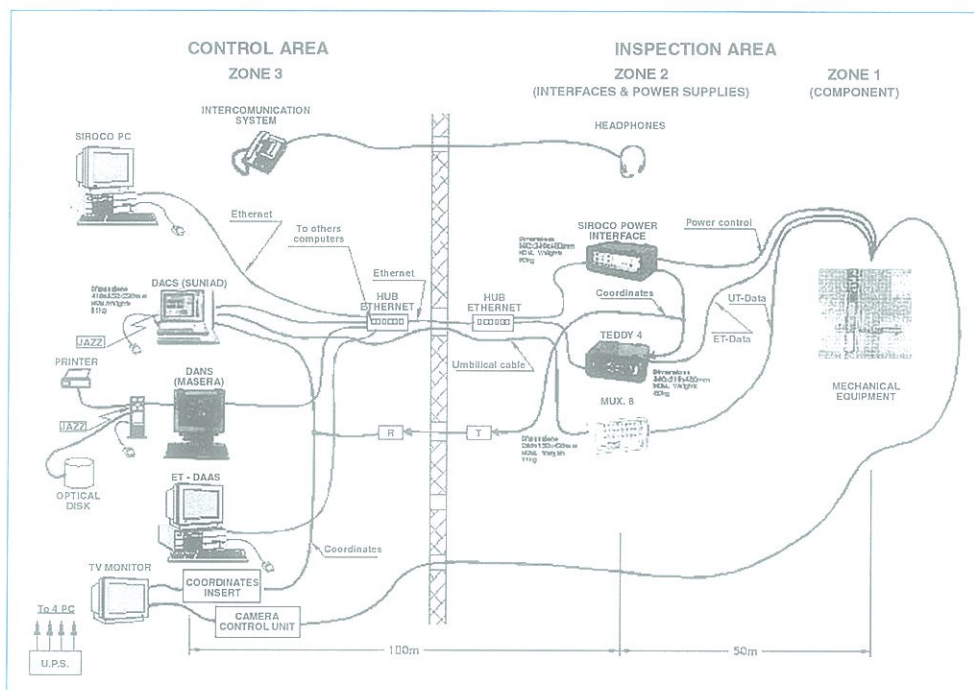
TEIDE-1

El proyecto TEIDE se lanzó durante mediados de año 96, con el objetivo concreto de inspeccionar las soldaduras verticales de la CN Sta. Mª. de Garoña en la primavera del 97. Este objetivo se cumplió en su totalidad y dada la buena operativa del sistema se solicitó el equipo para realizar inspecciones en E.I. Hatch (Octubre 97) en Georgia-EUUU y Nine Mile Point (Junio 98) en Nueva York-EUUU, planta en la que también realizó retest de soldaduras horizontales. Momento en el que fue sustituido por el TEIDE-2.

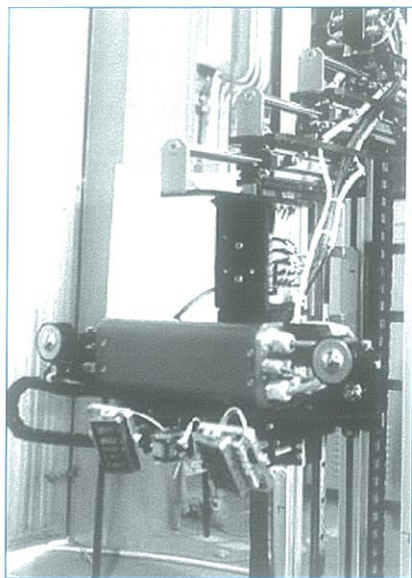
El equipo TEIDE-1 requiere una única introducción en vasija para inspeccionar cada una de las soldaduras verticales del escudo del núcleo, teniendo un alcance del 90%.

El tiempo de inspección se ha optimizado acoplando simultáneamente los sensores de UT y CI. Además, la inspección de las soldaduras verticales se ejecuta en paralelo desde ambos lados de la soldadura, con ambas técnicas.

Para instalar el manipulador, deben haberse vaciado los elementos combustibles de su entorno y, en las posiciones en las cuales va a ser introducido, debe haberse extraído también la barra de control. Se maneja suspendido de la grúa polar o la del combustible, bajándolo hasta el tubo guía de la barra de control, al nivel de la placa de apoyo del combustible. En este caso la orientación del carro portaplataformas se realiza manualmente antes de la introducción de la máquina. Por lo que es necesaria la extracción completa



Esquema del sistema de inspección TEIDE



Brazo Inspección TEIDE-1

fuera de la vasija de la máquina cuando es necesaria modificar la orientación de la misma.

Está dotado con dos movimientos de inspección motorizados, servocontrolados en posición y velocidad, capaces de proporcionar con alta precisión y velocidad la trayectoria en almena necesaria para el examen de las soldaduras. Ambos sensores, de ultrasonidos y de corrientes inducidas están montados en un mismo brazo de inspección, que cuenta con una serie de actuadores neumáticos encargados de situarlos frente a la soldadura, manteniendo una distancia constante a la superficie durante el examen.

Ambos equipos, TEIDE-1 y TEIDE-2, están especialmente protegidos frente a un entorno altamente radioactivo y para su inmersión prolongada en agua. Cuentan con captadores de posición analógicos resistentes a la radiación (resolvers), sensores de proximidad sin semiconductores, motores blindados, y cámaras estancas presurizadas. Además, se han provisto sistemas de aviso y seguridad, con el objetivo de asegurar su correcto funcionamiento y extracción del núcleo.

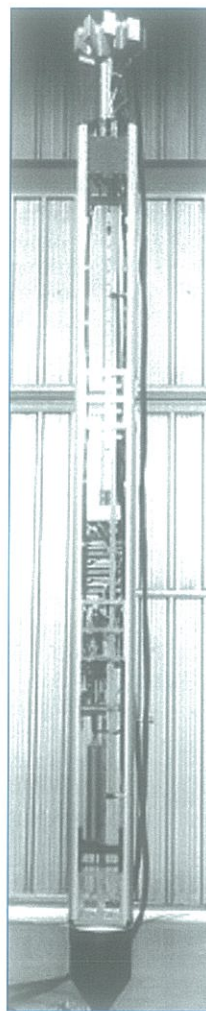
TEIDE-2

Después del desarrollo y su primera aplicación en planta, se vio que con pequeñas modificaciones de diseño, el sistema TEIDE, a partir de este momento TEIDE-1, podría ser válido para la inspección de soldaduras horizontales, manteniendo sus ventajas de precisión de posicionamiento y fiabilidad de la inspección al carecer de interferencias. Para ello se lanzó en Junio de 1997 el proyecto TEIDE-2.

Las principales modificaciones que se incorporaron fueron de dos tipos, las primeras para poder cubrir las soldaduras horizontales, para lo cual se proyectó un nuevo sistema de brazo, siendo ahora curvo. Este brazo además se diseñó intercambiable, para poder así cubrir los distintos diámetros de los escudos. Así mismo, se tuvo que modificar el sistema de extracción de los cilindros neumáticos para darle mayor rigidez.

Por otro lado, después de las experiencias adquiridas, se aprovechó el nuevo proyecto para incorporar mejoras a su operación. Así el TEIDE-2 lleva incorporado un nuevo movimiento codificado de orientación de la máquina y el brazo de inspección, para así poder apoyar el equipo sobre el Fuel Support casting. Esto hizo necesario reducir la sección de la máquina para poder girar dentro de la celda de combustible sin interferencias de los elementos o falsos elementos de las celdas adyacentes. También se incorporó un nuevo sistema de giro del brazo mediante un motor de corriente continua que posteriormente fue también codificado.

Con todas estas modificaciones el TEIDE-2 es capaz de verificar el 100%



TEIDE-1

de las soldaduras horizontales H3 y H4. La soldadura H5, si el modelo la tiene, dependiendo de la configuración del reactor, se puede inspeccionar 100% desde ambos lados, sólo desde uno de ellos o puede ser que no sea accesible (por estar a la altura de la placa soporte de núcleo). Siendo necesarias únicamente ocho introducciones en la vasija, que pueden ser alguna más dependiendo de la central.

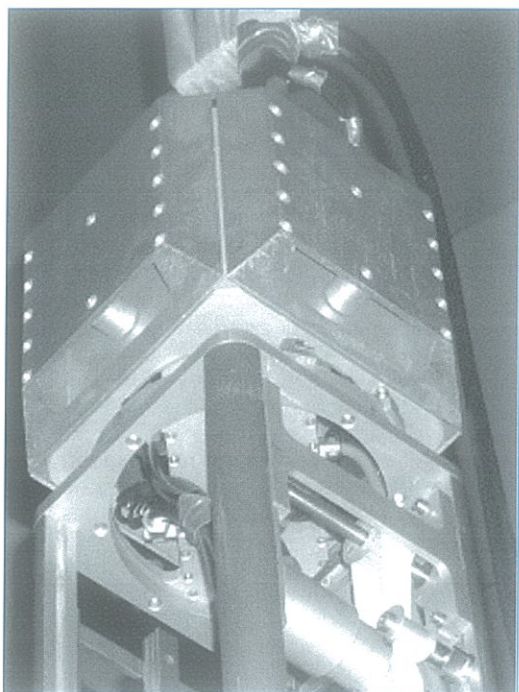
Para instalar el manipulador, se recomienda el vaciado de los elementos combustibles de su entorno y, en las posiciones en las cuales va a ser introducido, debe haberse extraído también la barra de control. Se maneja suspendido de la grúa polar o la del combustible, bajándolo hasta el fuel support casting sobre el que apoya, al nivel de la placa de apoyo del combustible. En este caso, para la orientación del brazo no es necesaria su extracción del agua, ya que ese movimiento es automático.

Para ambos equipos, las dimensiones exteriores son similares a las de un elemento combustible, siendo sus prestaciones más destacables:

- Peso total: 150 kg
- Velocidad de inspección: hasta 70 mm/s para ambos movimientos



Teide-2 en plataforma de recarga listo para inspección



Detalle de la cabeza del TEIDE-2

- resolución: 0.1 mm
- error de repetibilidad: menor de 1 mm para ambos movimientos

La aceptación de estos sistemas de inspección se realizó cualificando primero las técnicas de inspección en el Instituto EPRI-NDE (EEUU), validando posteriormente los equipos mecánicos con sus sensores en maquetas a tamaño real, bajo el agua, con el objetivo

de comprobar su funcionalidad antes de aplicarlo en una planta.

Tanto TEIDE-1 como TEIDE-2 han sido utilizados en campo ejecutando la inspección requerida en paralelo con el movimiento del combustible y/o inspecciones visuales de los internos de vasija, de forma que el impacto sobre el planificación de la parada para recarga fuese mínimo.

EXPERIENCIAS DE INSPECCIONES EN SERVICIO

Durante estos años se han realizado inspecciones en servicio en España (2), Suiza(3) y Estados Unidos(7). En estas inspecciones se han cubierto distintos alcances, tanto de soldaduras verticales como horizontales, en distintos tipos de centrales BWR (tipo -3, tipo -4, tipo -5 y tipo -6), de distintas potencias y configuraciones del núcleo.

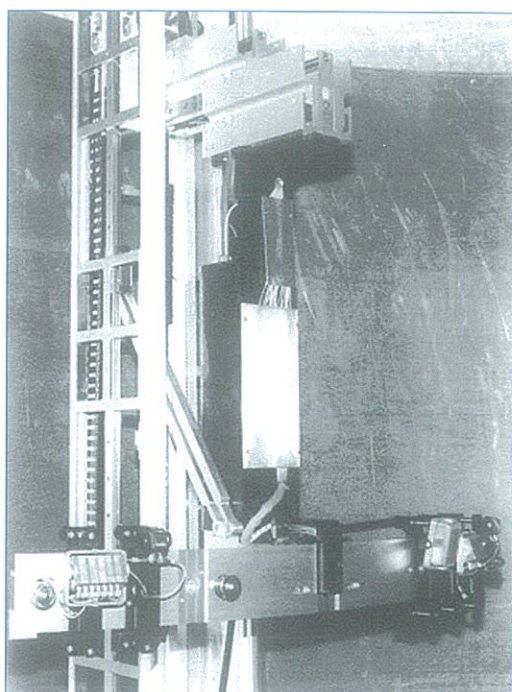
De estas experiencias podemos deducir unos tiempos de operación y de ocupación de vasija, aunque en general, suelen ser variables al realizarse la inspección en paralelo a otros trabajos en plataforma de recarga.

Como referencia se pueden estimar los siguientes tiempos de ocupación de vasija por tarea:

- Colocación de la maquina en una posición desde Plataforma: 2 horas
- Inspección de 3 soldaduras verticales entre H3-H4 (brazo arriba): 18 horas
- Cambio a configuración con el brazo hacia abajo: 8 horas
- Inspección de 3 soldaduras verticales entre H3-H4 (brazo abajo): 12 horas
- Inspección de 3 soldaduras verticales entre H4-H5 (brazo abajo): 15 horas
- Cambio a configuración para soldaduras horizontales: 8 horas
- Inspección de 4 sectores (180º aprox.) de solduras H3 y H4: 20 horas

Estos tiempos son una media de los realizados ya que dependen de las posiciones en que se encuentren las soldaduras.

También se debe re-



Detalle del brazo curvo del TEIDE-2

señar que los momentos de necesidad de la grúa polar son aquellos en los que se necesita introducir/extraer la máquina del agua, es decir la primera introducción, la última extracción y al principio y final de las operaciones del cambio de configuración.

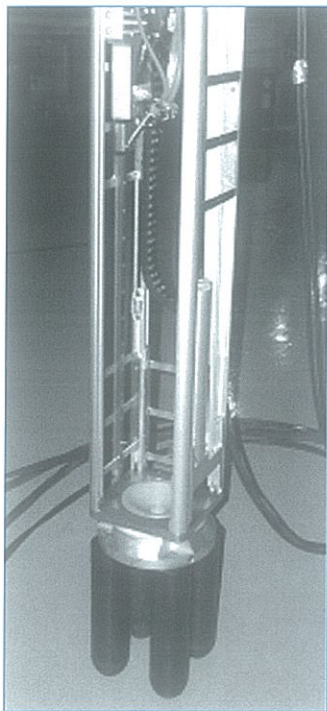
TEIDE-3: EL FUTURO

A consecuencia de los trabajos desarrollados en el escudo, EPRI ha pasado a estudiar también las posibilidades de aparición de grietas en su soporte.

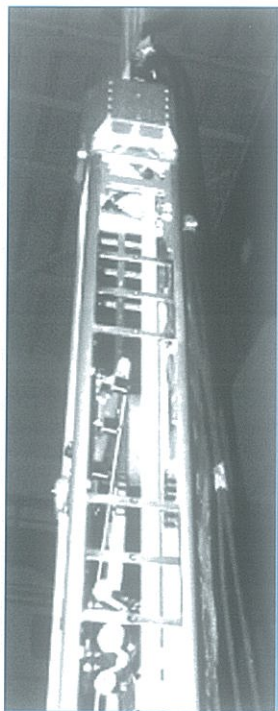
Como respuesta a la necesidad de inspeccionar las soldaduras del escudo situadas por debajo del placa soporte del combustible (soporte del escudo), Tecnatom está desarrollando un nuevo sistema de inspección basado en el empleo de un brazo robotizado que permitirá realizar con un mismo equipo la inspección de sus soldaduras verticales y horizontales. El desarrollo de este equipo comenzó en el año 1998 y está prevista su validación durante el año 2001.

TEIDE-3 tendrá 7 grados de libertad, todos ellos motorizados y codificados en posición, alcanzando velocidades superiores a 100 mm/s.

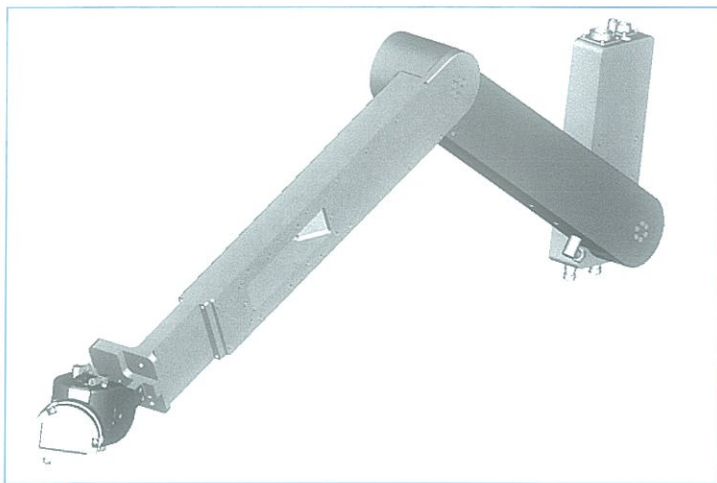
Estos movimientos son, el primero la elevación del brazo de inspección, el segundo el giro de la base (cuerpo de máquina) que orienta el brazo en coordenadas polares, el tercero y cuarto son los movimientos de "hombro" y "codo" que lo que hacen es un movimiento de extensión de los palpadores y por ultimo, los tres movimientos de



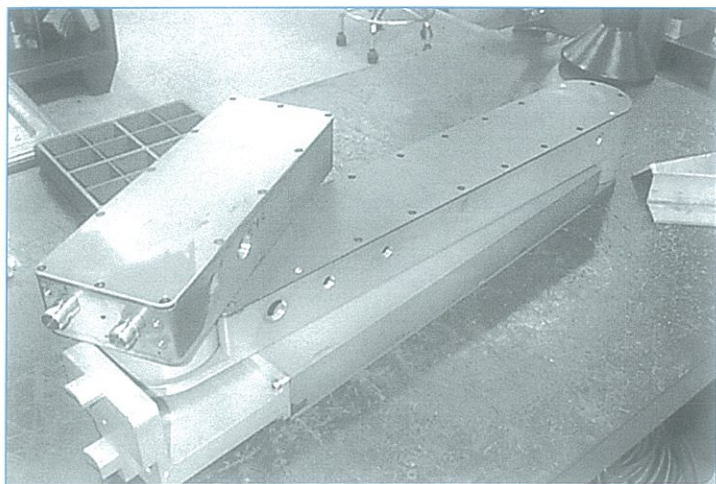
Detalle del apoyo para FSC del Teide-2



Vista lateral del TEIDE-2 recogido



Diseño del Brazo de Inspección del TEIDE-3



Montaje del brazo de Inspección

orientación en la muñeca, alabeo, cabeceo y rotación, que mantienen el palpador constantemente perpendicular al escudo.

Se espera que su repetibilidad y resolución sean similares a la de los equipos TEIDE-1 y TEIDE-2. El alcance del brazo será de 1.3 metros, lo que permitirá, para la mayoría de las centrales, que la inspección de los 360° de una soldadura horizontal se realice requiriendo aproximadamente 8/10 introducciones. En su extremo, montará un palpador UT y una bobina de corrientes inducidas o un sistema phase array de ultrasonidos, realizando ambos exámenes simultáneamente.

El posicionamiento del equipo se realizará de forma similar a la de los equipos TEIDE existentes, con la diferencia de que el apoyo inferior se realiza sobre el Control Rod Drive Housing (CRDH) y el apoyo superior sobre la placa soporte. La orientación angular se verificará aprovechando el pin de alineamiento del fuel support casting.

Asimismo, dispone de sistemas de

son H7, H8, H10 y H11 del escudo y su soporte. H9 soldadura del soporte de las bombas de chorro a vasija, se podrá inspeccionar parcialmente, en donde hay continuidad del material o a través de los soportes, soldaduras de los alojamientos de los tubos de las barras de control,....

CONCLUSIÓN

El desarrollo de los proyectos TEIDE convirtió a Tecnatom en la primera empresa capaz de realizar la inspección automatizada de las soldaduras verticales del escudo del combustible en centrales nucleares de tipo BWR. A la fecha, es la única empresa que realiza el examen volumétrico completo mediante técnicas de ensayos no destructivos de las soldaduras del componente desde su interior.

Se han obtenido resultados satisfactorios con los equipos TEIDE realizando inspecciones en servicio en centrales nucleares de España, Estados

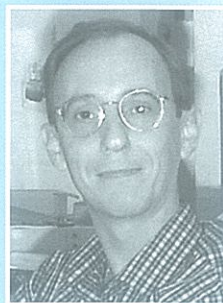
Unidos y Suiza, habiendo sido aprobados los procedimientos de inspección por los respectivos Organismos Reguladores Nacionales.

Lo anterior avala la idoneidad de las soluciones adoptadas, y capacidad de Tecnatom para ofrecer a los propietarios un conjunto de equipos cualificados, procedimientos y personal para la completa inspección mecanizada de los escudos del núcleo en la vasija. El nuevo equipo TEIDE-3 en fase final de desarrollo podrá aportar a los propietarios de centrales BWR una herramienta eficaz para poder cumplir con los próximos requisitos de inspección de las soldaduras situadas por debajo de la placa soporte del núcleo.

protección y seguridad necesarios para realizar una operación segura y facilitar la extracción de la herramienta de la vasija.

Ha sido necesario desarrollar un nuevo tipo de controlador en tiempo real, capaz de mover simultáneamente los ejes del brazo. Está previsto abordar en una segunda fase una aplicación informática que permita al operador generar de forma sencilla la trayectoria 3D de inspección deseada, comunicándose al mismo tiempo con el controlador in a friendly way.

Dada la flexibilidad de este equipo, se espera poder inspeccionar la mayor parte de las soldaduras situadas por debajo de la placa soporte, como



Rafael ALBERDI es Ingeniero Industrial por la Universidad de Navarra. Desde 1995 trabaja en el diseño de nuevos equipos de inspección. Es el responsable de los proyectos de Investigación y desarrollo de los proyectos TEIDE.



Emilio GONZÁLEZ es Ingeniero Industrial por la Universidad de Madrid. Desde 1980 trabaja en Tecnatom en temas relacionados con la inspección en servicio. Ha desempeñado varias misiones internacionales como experto en temas de inspección por la Agencia Internacional de Energía Atómica de Viena. Actualmente es responsable de los servicios de inspección de Tecnatom.