

Ejemplo de un proyecto de desarrollo mecánico: Manipulador RPV ID de inspección de vasijas BWR por el interior

Jaime Carretero y Diego Molpeceres

El equipo RPV-ID es la respuesta de General Electric y Tecnatom a la necesidad de un examen no intrusivo de las soldaduras de la vasija. Está concebido para ser colocado y operar en zonas de accesibilidad muy limitada, gracias a su sorprendentemente bajo perfil (del orden de 64mm).

El equipo, bautizado como *Water Bug*, consiste en un carro prismático con cuatro ruedas que se pega y desplaza por la pared de la vasija, y que lleva en su extremo delantero un brazo transversal que mueve el bloque con los sensores perpendicularmente a la trayectoria del equipo.

El *Water Bug* está diseñado para trabajar bajo agua (opera a más de 20m de profundidad) e incorpora a bordo sensores electrónicos que permiten conocer la posición y orientación del equipo a través del sistema de control.

Una vez colocado en la vasija, está diseñado para no necesitar ningún apoyo desde la plataforma de recarga. La instalación inicial puede realizarse usando un submarino de control remoto (ROV) o mediante pértigas.

El *Water Bug* puede seguir trayectorias sobre la vasija tanto horizontales (examinando las soldaduras circunferenciales) como verticales (soldaduras verticales), y es capaz de girar sobre si mismo para cambiar de una orientación a otra sin ningún apoyo externo.

El equipo se pega a la pared de la vasija mediante la fuerza ejercida por dos *thrusters*, que propulsan con sus hélices el equipo contra la pared. Las dos ruedas de cada lado del equipo están unidas mecánicamente consiguiéndose los movimientos de desplazamiento y giro operando independiente o simultáneamente los motores que mueven las ruedas de cada lado.

El movimiento del carro principal se combina con el movimiento transversal del brazo para conseguir el patrón de movimientos que requiere para la inspección.

El equipo RPV-ID en su conjunto ha realizado su primera inspección satisfactoria en la C.N. Fitzpatrick en EE.UU., completando el examen de cuatro soldaduras verticales.

The RPV IV Scanner is the response of General Electric and Tecnatom to the need of a non-intrusive examination of RPV welds. It is conceived to be delivered and operate in areas of the RPV of very limited accessibility, due to its extremely low profile (in the range of 2,5").

The RPV IV Scanner is integrated by a carriage type body that attaches to the RPV wall and moves upon it and a transverse arm that displaces the sensor package normally to the trajectory followed by the carriage.

The RPV IV Scanner is designed to work underwater, and incorporates navigation built-in electronics to report to the motion controller and data acquisition system its location in overall depth and inclination.

The RPV IV Scanner is designed to be autonomous from any support from the refuelling floor once it is initially deployed to the RPV wall. Initial deployment may be carried out by a remotely operated vehicle (ROV) or manually by means of poles.

The system is capable to follow both an horizontal path (examination of circumferential welds) or vertical path (longitudinal welds) upon the RPV wall where it attaches.

The mechanical scanner fixes to the RPV wall by two thrusters units, that generate attraction against the wall when operated. The motion of the body is achieved by operation of two sets of rubber wheels independently powered by two motors at either sides of the carriage, so to provide steering capability upon the RPV ID surface.

The motion of the main carriage is combined with the motion of the transverse arm to produce the required scan pattern of the transducer package, capable to carry 9 probes. This fact enables examination of welds in one single pass according to PDI qualified Inspection Procedure.

The complete RPV ID inspection system has carried out the first field successful application at Fitzpatrick NPP (USA), completing the examination of four vertical welds.

EL PROYECTO

Este proyecto ha requerido un especial esfuerzo de coordinación entre los técnicos participantes de TECNATOM y General Electric. El posicionador ha sido diseñado íntegramente por TE y el controlador de movimientos y el equipo de adquisición de datos ultrasónicos y técnicas de inspección ha sido aportado por GE, realizando la integración física del sistema solo en los períodos de colaboración presencial programados, mientras que durante el resto del proyecto se ha mantenido una fluida línea de comunicación.

El proceso total ha supuesto un periodo total aproximado de dos años y ha requerido una serie de iteraciones de la configuración del manipulador, utilizando tanto herramientas informáticas de diseño gráfico 3D y simulación sobre modelos virtuales de vasijas BWR, como por medio de ensayos reales de prototipos de alcance parcial, para evaluar las capacidades de componentes aislados, y también de alcance total. En concreto la unidad utilizada en la primera inspección en campo es el tercer prototipo completo de equipo, fabricado y probado.

Este artículo presenta el proceso seguido por TECNATOM en colaboración con GENERAL ELECTRIC para el desarrollo del posicionador mecánico *Water Bug*, desde la fase inicial de determinación de criterios básicos de diseño hasta su primera aplicación del sistema en una inspección real.

EL PROCESO

El proyecto se lanzó en agosto de 2004, con la emisión por parte de GE de una *especificación funcional* de diseño. Este documento estaba basado en la experiencia previa adquirida en la ejecución de inspecciones de vasijas tipo BRW por el interior así como en los requisitos ambientales, funcionales y de operación impuestos por la industria para la realización de este tipo de exámenes. Todas estas condiciones de contorno, (*critical to quality o CTQ's*) determinaban las cuestiones a las que el diseño a realizar debía dar respuesta. Después de un proceso de discusión técnica con participación de especialistas en todas las disciplinas implicadas (diseño mecánico, instrumentación y control, técnicas y END e ingenieros de campo) por ambas partes, se acordó una versión definitiva de especificación.

Completado lo anterior, se pasó a la fase de *diseño conceptual* del equipo. En esta etapa de todo proyecto de desarrollo, es crítico llegar a un equilibrio entre una solución que "se separe" lo suficiente del los equipos similares existentes asegurando por un lado la viabilidad técnica de la solución y por otro asegurando

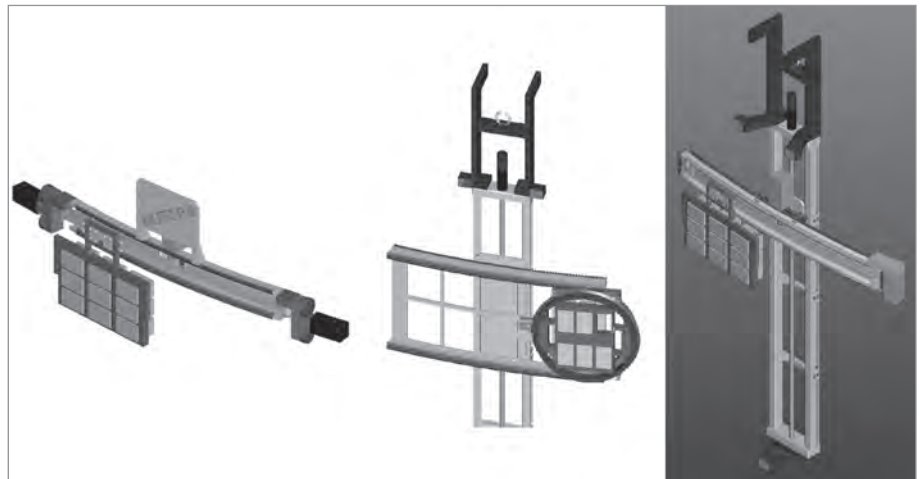


Figura 1. Conceptos descartados.

una respuesta completa y satisfactoria a los requisitos especificados inicialmente. Se presentaron diversos conceptos basados en diferentes aproximaciones, evaluando la capacidad de cada uno para proporcionar respuestas satisfactorias a los requisitos establecidos en la especificación inicial, hasta seleccionar la línea de diseño que proporcionase un grado de cumplimiento más elevado.

En la figura 1 se muestran modelos CAD de algunos de los conceptos presentados y descartados.

La conclusión del análisis fue que la línea más adecuada consistía en un equipo: compacto; de bajo perfil para poder evolucionar en áreas de acceso reducido y con autonomía para seguir cualquier trayectoria vertical u horizontal sobre la superficie interior de la pared de la vasija. Se en la figura 2 una imagen del concepto seleccionado:

Dado lo novedoso del diseño y la poca experiencia previa en este tipo de componentes, y con el objetivo de realizar una *prueba de concepto* del diseño propuesto antes de cerrar la fase de definición del mismo. Se diseñó y fabricó un

primer prototipo simplificado a escala 1:1, para probar la viabilidad técnica del diseño en condiciones aproximadas a las reales de funcionamiento. Las dos imágenes que de la figura 3 muestran de este primer prototipo.

Se preparó una cuba de inmersión partiendo de un sector real de pared de vasija y se reprodujeron las dimensiones, pesos bajo agua y condiciones de funcionamiento de un propulsor submarino comercial. Este último tendría que ser sustituido en la versión definitiva por un modelo específico, para asegurar un perfil del equipo por debajo de 70 mm.

Los resultados de las pruebas proporcionaron información para orientar la decisión sobre el método a emplear para asegurar la adherencia del equipo sobre la pared y generar la tracción necesaria para dotar de autonomía al manipulador definitivo: imanes permanentes, una pareja de propulsores submarinos, o una solución combinada de ambas.

Completado este periodo, se cerró la fase conceptual, con una sesión de

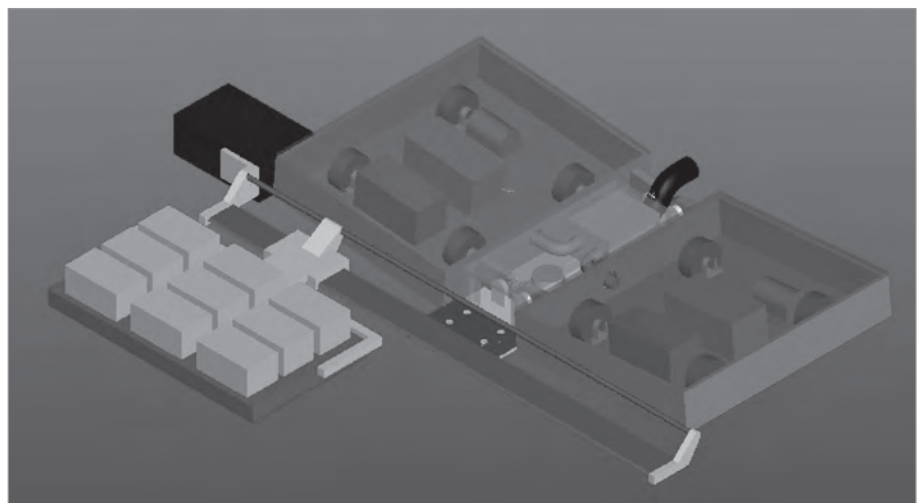


Figura 2. Concepto de Water Bug seleccionado.

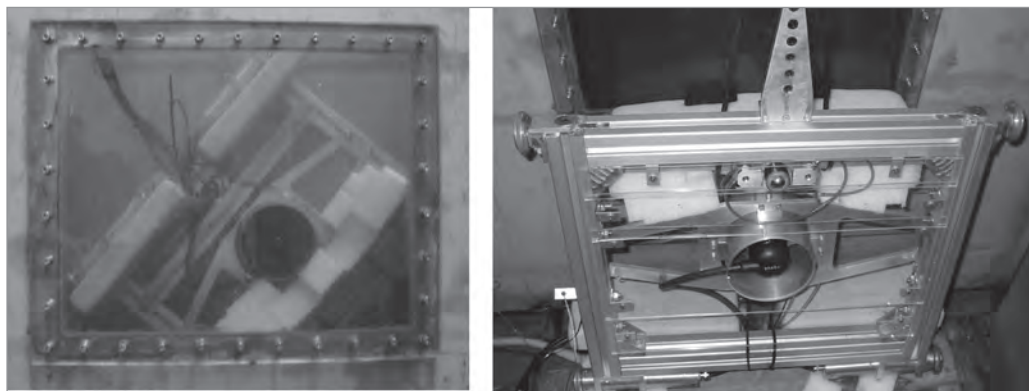


Figura 3. Prototipo simplificado

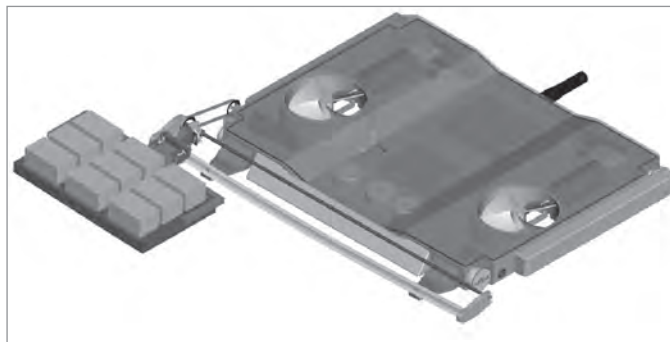


Figura 4. Concepto avanzado del Water Bug.

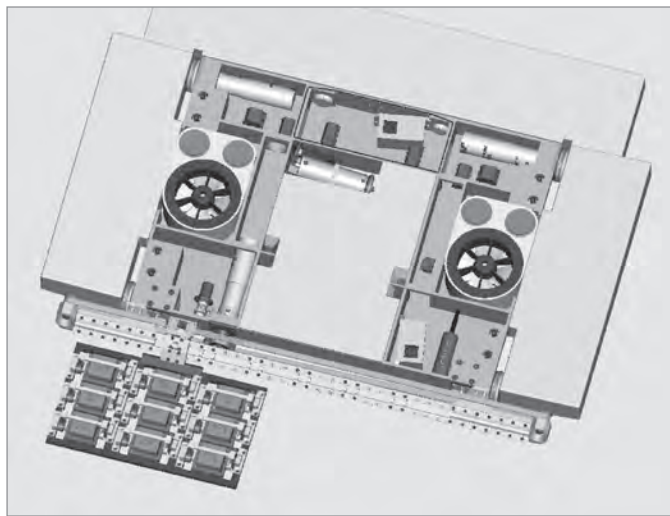


Figura 5. Primer Diseño final.

revisión del diseño conceptual para confirmar que el diseño propuesto respondía satisfactoriamente a todos los requisitos establecidos en la especificación inicial, como transición entre la fase conceptual y la de diseño de detalle. (ver figura 4).

Una vez cerrado el concepto y características principales que el equipo a diseñar debía incorporar, se inició la fase de *Diseño de Detalle*. Esta etapa del proyecto requirió un profundo estudio de las dimensiones de los componentes objetivo de las inspecciones que se realizarían con el equipo final, incluyendo: la curvatura interior de la vasija, espacio de paso entre ésta y los diferentes componentes existentes en la región del

annulus (bombas de chorro, líneas de instrumentación, barras de guiado, etc). Este primer estudio definió las dimensiones máximas totales del equipo para asegurar su acceso (y por tanto capacidad de inspección) al mayor porcentaje posible de soldaduras en todo el parque de vasijas, que serían objetivo potencial para el equipo a desarrollar. Otra tarea clave a destacar en esta fase, fue la búsqueda y preselección de los elementos comerciales necesarios para proporcionar las funcionalidades requeridas al equipo. En concreto, fue especialmente novedoso dotar al manipulador de la capacidad de adherirse a una pared vertical metálica, en condiciones submarinas añan-

diendo la capacidad de desplazarse sobre dicha pared en vertical, horizontal o en giro. La solución propuesta estaba basada en la inclusión de un juego de propulsores submarinos en combinación con el montaje de una serie de imanes permanentes que asegurasen la atracción hacia la pared metálica incluso a través de la capa de plaqueado, que recubre la cara interior de las vasijas. La siguiente figura incluye un concepto avanzado, a partir del diseño preliminar de la figura 2.

El proceso de *diseño de detalle*, incluyó el cálculo y selección de todos los elementos comerciales necesarios para incorporar las capacidades requeridas (un sistema preciso de posicionamiento y orientación del equipo; maniobrabilidad bajo el agua y un mecanismo independiente de movimiento del conjunto de palpadores de ultrasonidos para realizar la inspección), así como un diseño detallado de todas las piezas que integrarían la versión final del manipulador.

La fase final del diseño de detalle consistió en la generación de la documentación necesaria para la fabricación y montaje del sistema mecánico.

Concluido el montaje de la primera versión final del equipo, se acometió la fase de *Integración* entre el subsistema mecánico desarrollado por TECNATOM y el controlador y sistema de adquisición de datos proporcionados por GENERAL ELECTRIC. En la figura 6 se presenta una imagen de esta fase de integración y la configuración de la primera versión final.

Con posterioridad a la integración, se procedió con la fase de *Pruebas funcionales* del sistema. Como resultado de estas, se constató la necesidad de replantear ciertos aspectos del equipo, para posibilitar la reducción de sus dimensiones en plano, así como su peso bajo agua, ya que la maniobrabilidad demostrada durante las pruebas no era suficiente para asegurar un examen óptimo en todas las condiciones. El replanteamiento de la configuración del sistema mecánico supuso un rediseño profundo, realizado en un tiempo muy limitado, menos de dos semanas, por parte de un equipo de diseñadores mecánicos desplazados a las instalaciones de GENERAL ELECTRIC NUCLEAR, con el objetivo de fabricar, ensamblar y probar la versión evolucionada del equipo en cuanto esta fase fuese completada. Las figuras 7 y 8 muestran

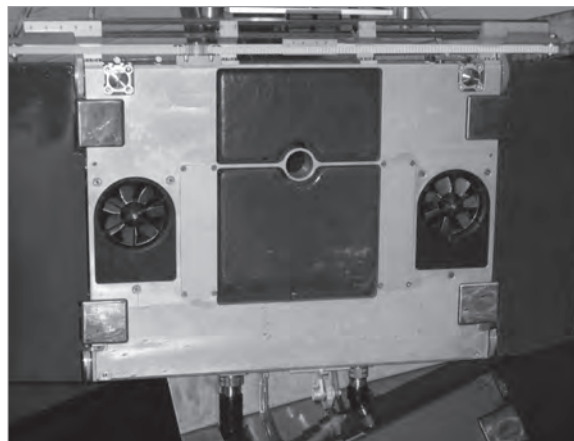


Figura 6. Primera versión final durante pruebas en GE Huntersville

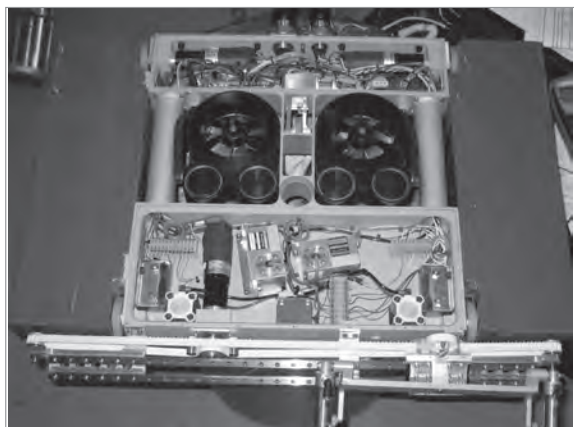


Figura 7. Segunda versión final.



Figura 8. Prueba de conjunto en inmersión.

el equipo, en su segunda configuración final y durante los ensayos de conjunto.

Terminada la segunda parte de pruebas funcionales posterior al rediseño, el sistema se trasladó a las instalaciones del Centro de Entrenamiento en San José (SJTC) de GENERAL ELECTRIC, para ensayar el sistema en condiciones lo más próximas a las reales, utilizando la instalación que reproduce una vasija BRW a escala real, en una última fase de *Ensayos de conjunto y pruebas de aceptación*.

Pese a haber superado sin mayores problemas los criterios establecidos de funcionalidad, precisión y repetibilidad establecidos en el programa de pruebas generado a partir de los requisitos de la especificación inicial, se detectó que los propulsores submarinos generaban una interferencia eléctrica en las señales captadas por los palpadores de ultrasonidos. Dicha distorsión, afectaba a la calidad de los registros obtenidos y quedó solventada finalmente modificando los circuitos de alimentación de los propulsores. Este cambio no afectó al diseño del manipulador, ya que se limitó a los componentes asociados al equipo de control. Resuelto este último contratiempo se repitieron las pruebas de aceptación del sistema, obteniendo esta vez sí, resultados totalmente satisfactorios (figura 9).

Si bien el equipo entregado cumplía satisfactoriamente los requisitos estableci-

dos, en los meses posteriores a su entrega, se entró en una última fase previa al primer uso del equipo de *depuración del diseño*, introduciendo pequeñas mejoras incrementales. Una de las más significativas fue la sustitución de los propulsores submarinos basados en hélice seleccionados desde el principio, por unos dispositivos que generan adherencia del equipo sobre la pared por aplicación de efecto vórtice. Esta última evolución se ensayó una vez más, para comprobar la ganancia respecto de la configuración anterior, obteniendo un rendimiento significativamente mayor.

También, dentro de esta fase final, se acometió un rediseño del brazo de inspección para robustecerlo y simplificar su funcionamiento.

Así, tras unas primeras pruebas de conjunto en mayo de 2006 y la fabricación de los nuevos elementos, en julio se volvió al Training Center de GE para realizar las últimas pruebas y mostrar a los potenciales clientes las funcionalidades del nuevo equipo. Las siguientes imágenes corresponden a las pruebas de la configuración definitiva en San José (figura 10).

Finalmente, tras dos años de desarrollo y continuas mejoras, en octubre de 2006 el equipo completó la inspección de 4 soldaduras verticales en la 17 parada de la C.N. James A. Fitzpatrick, en el estado de Nueva York, EE.UU.



Diego Molpeceres Prieto, ingeniero industrial, rama Mecánica (Máquinas) por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid, es actualmente responsable de la unidad de Ingeniería de Equipos, dentro de la dirección de Servicios de Inspección de Tecnatom, S.A. Trabaja en TECNATOM desde 1994, anteriormente como ingeniero de diseño mecánico y jefe de proyectos, siempre en el campo del desarrollo de sistemas de inspección para el campo nuclear.

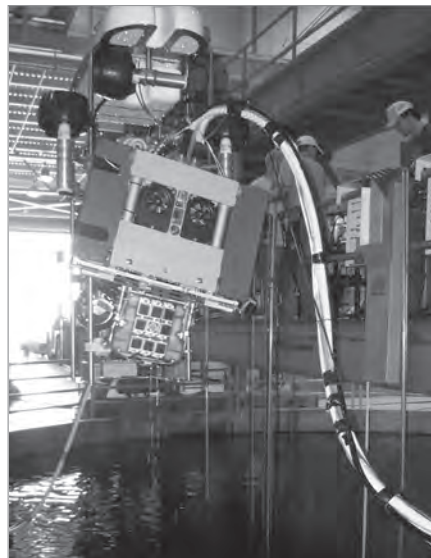


Figura 9. Pruebas de la versión definitiva en el SJ Training Center de GENERAL ELECTRIC

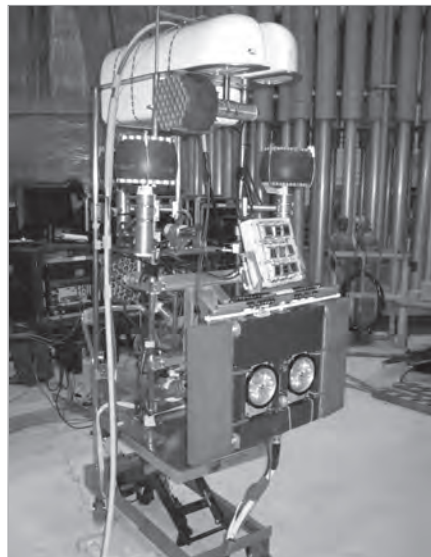


Figura 10.



Jaime Carretero Rodríguez, ingeniero Industrial por la Escuela Técnica Superior ICAI de la Universidad Pontificia de Comillas en 2003, es actualmente ingeniero de diseño en Tecnatom S.A. Desde su incorporación en 2004 ha participado en el desarrollo de varios equipos de inspección para centrales nucleares BWR y PWR.