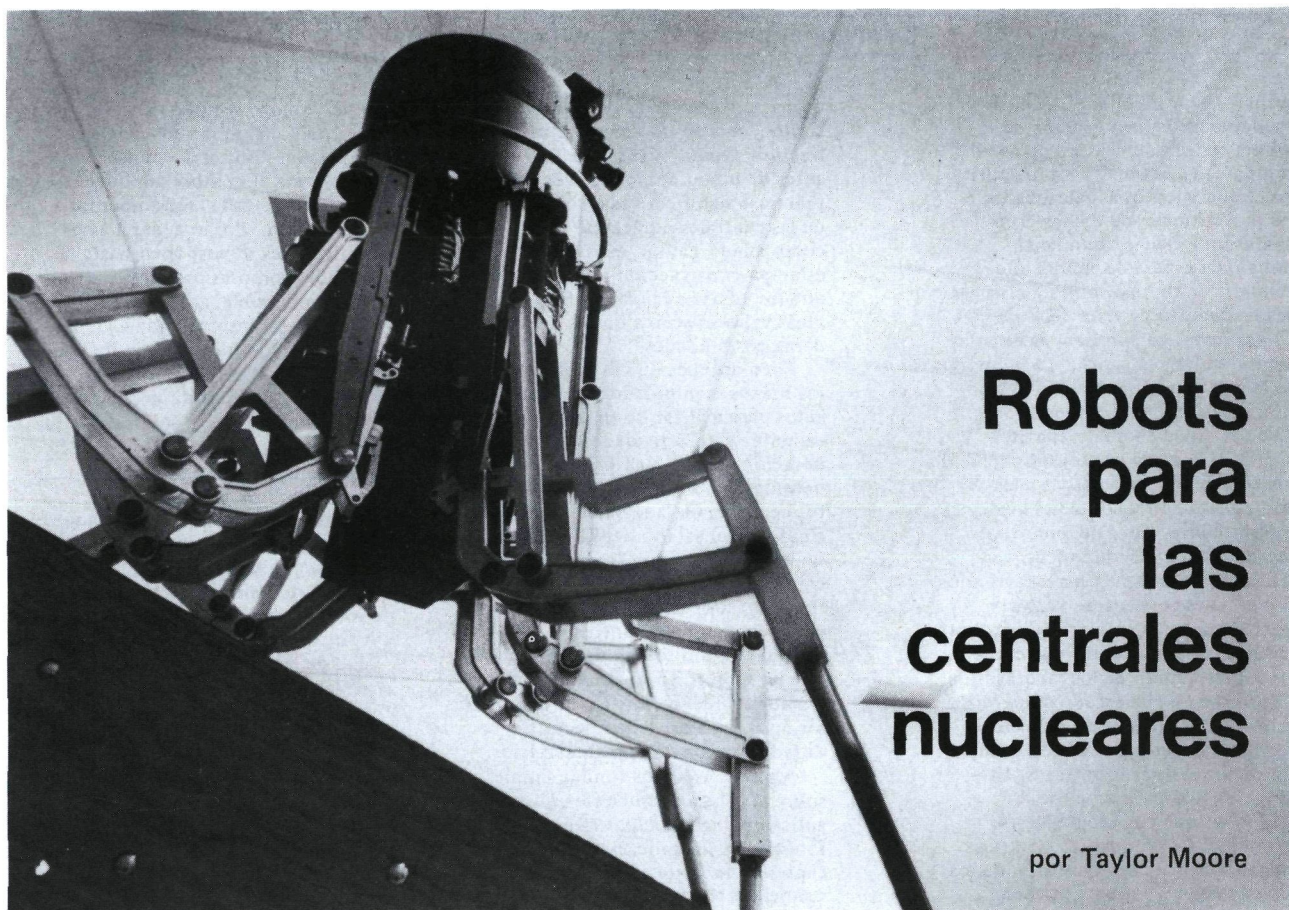




Robots para las centrales nucleares

por Taylor Moore

Odex, un robot móvil con potencial para usos múltiples. (Cortesía de Odetics)

En los Estados Unidos de América, la tecnología de los robots utilizada en las operaciones de limpieza de TMI-2 y otras centrales nucleares ha suscitado interés y ha orientado las investigaciones sobre la forma en que mejor se podrían utilizar los robots

Limitados en el pasado a las páginas de la ciencia ficción, en los últimos años los robots han atraído de forma espectacular la atención del público y de la comunidad comercial industrial. Muchos observadores consideran que constituyen el sello de la neo-industrialización, al imprimir un renovado vigor económico y carácter competitivo a industrias deprimidas mediante el aumento de la productividad y la reducción del costo de la mano de obra.

Sin embargo, al mismo tiempo los trabajadores suelen reaccionar con recelo ante la imagen mental de un robot capaz de realizar una tarea que antes requería un ser humano. Sin duda, las repercusiones sociales de la robotización de la industria norteamericana serán motivo de mayores inquietudes para los trabajadores, administradores y dirigentes por igual a medida que un mayor número de robots irrumpen en las industrias.

Según la Robotics Industries Association, a fines de 1983 sólo se habían distribuido en los Estados Unidos 6300 robots de los cuales la mayoría se había instalado desde

1976. Pero la fuerza de los cambios tecnológicos y la presión de la competencia económica internacional prometen un acelerado ritmo de despliegue de robots para los años venideros. Algunos expertos predicen que para 1990 este país puede llegar a tener 100 000 robots en funcionamiento —una décima parte del total programado a nivel mundial.

En la mayoría de las industrias en que se han introducido o se espera introducir robots en cantidades significativas, tales como la producción de automóviles, la metalurgia y la fabricación de maquinaria, los incentivos de la introducción de robots se relacionan directamente con la preservación o recuperación de ventajas competitivas mediante la reducción de los costos unitarios de producción y el mejoramiento de la calidad de los productos. Pero para algunas industrias, el atractivo de los robots radica en la posibilidad que tienen de trabajar en medios peligrosos, reduciendo así los riesgos asociados al trabajo a que se expone el hombre.

Este es el caso de la industria de generación de electricidad. Aunque la mayoría de los fabricantes de

robots industriales no consideran que las compañías eléctricas sean un mercado potencial importante, se están fabricando robots de aplicaciones especiales para que realicen actividades de inspección y mantenimiento dentro de las centrales nucleoelectricas, donde los niveles de radiación, el calor y la humedad impiden la presencia de trabajadores o limitan seriamente sus posibilidades de trabajo. Sería muy conveniente añadir robots al personal de una central nuclear para que realizaran muchas de estas tareas, ya que eximiría al hombre de algunas de las labores más onerosas y molestas y, posiblemente, permitiría realizar determinadas tareas con la central en línea, evitándose así costosas paradas de la central para actividades de inspección y mantenimiento.

Algunos de los robots en construcción para aplicaciones en las compañías eléctricas representan el estado actual de los conocimientos en ingeniería de la robótica, y los esfuerzos de investigación afines podrían producir novedades de amplia aplicación en otras industrias. En la actualidad el EPRI tiene algunos proyectos encaminados a

El Sr. Moore es miembro del personal del *EPRI Journal*, de donde se tomó este artículo para su reimpresión. El EPRI es el Electric Power Research Institute, de los EE.UU., P.O. Box 10412, Palo Alto, California 94303. Los colaboradores técnicos del EPRI en la preparación de este artículo fueron Floyd Gelhaus, Michael Kolar, Thomas Law, Adrian Roberts y R.K. Winkleblack.

evaluar las posibilidades técnicas y económicas de la aplicación de robots en las operaciones de las compañías eléctricas y a transmitir los conocimientos así alcanzados a los profesionales de dichas compañías, que tienen abundante trabajo en espera de robots que demuestren ser confiables y eficaces desde el punto de vista del costo.

Esa investigación tiene necesariamente un largo alcance. La industria de la robótica, que según la definición más amplia tiene menos de 20 años, sigue en una etapa incipiente a la espera de mejoras técnicas sustanciales en sistemas visuales, miniaturización y controles mediante computadora, antes de que robots verdaderamente económicos, versátiles y potentes pasen a ser artículos comerciales corrientes. Pero el éxito de la I y D en materia de robots en años recientes indica que esas máquinas saldrán de los laboratorios y entrarán en el mercado comercial antes de que finalice este decenio. Las investigaciones del EPRI sobre aplicaciones de la robótica están dirigidas, al menos en parte, a garantizar que cuando llegue ese momento, las compañías eléctricas tengan una clara comprensión de los servicios que los robots pueden prestarles y puedan determinar si su empleo tiene sentido desde el punto de vista económico.

Robots para centrales nucleares

No es nuevo el empleo de equipos teledirigidos y similares a los robots para proteger a los trabajadores en las zonas de alta radiación de las centrales nucleares. John Taylor, uno de los vicepresidentes del EPRI y director de la División de Energía Nucleoelectrónica, divide el equipo robótico para aplicaciones nucleares en dos categorías amplias: los dispositivos para un fin determinado con capacidad limitada para realizar diferentes operaciones, y los robots reprogramables y de uso general con cierto grado de inteligencia artificial basada en computadoras.

"Creo que la primera categoría ha alcanzado un nivel de madurez razonable", dice Taylor. En el Non-destructive Evaluation (NDE) Center del EPRI y entre los fabricantes de reactores, los contratistas de servicios nucleares y algunas compañías eléctricas, los dispositivos de este tipo se emplean en la actualidad para tareas como corte de tuberías, soldadura, inspección y reparación de los tubos del generador de vapor, así como en la exploración ultrasónica de secciones de las tuberías para detectar fisuras. Taylor añade: "Estos dispositivos han demostrado ser absolutamente esenciales; hay algunos trabajos que simplemente no podríamos hacer sin ellos."

Los robots de la segunda categoría, los que tienen suficiente inteligencia basada en computa-

doras para apoyar diversas aplicaciones, "tienen que recorrer un largo trecho", según palabras de Taylor, antes de poder demostrar ventajas prácticas significativas en las labores de las centrales nucleares. Pero, como añade Taylor, esos robots están en construcción y se espera que los ensayos iniciales ofrezcan ideas valiosas acerca de sus verdaderas posibilidades.

Poco después que se fabricaron los brazos manipuladores teledirigidos para utilizarlos en células calientes y en actividades de reelección de combustible, en el decenio de 1950 se presentó por primera vez, en la instalación nuclear Hanford del estado de Washington, un brazo fijado a un transportador con cámaras y luces. El vehículo transportador teledirigido, fabricado por Westinghouse Hanford Co., recibió el nombre de Louie después que un técnico garabateó el apodo en el brazo del robot. Louie demostró ser un trabajador tenaz, versátil y duradero y todavía presta servicios.

Algunos aspectos fundamentales sobre la forma en que este equipo se aplica distinguen a los equipos robóticos para aplicaciones en las centrales nucleares de los ya muy conocidos robots industriales —esos dispositivos fijos que habitualmente se utilizan para operaciones de selección y colocación u otras tareas muy reiterativas.

Muchas de las aplicaciones industriales de los robots persiguen el objetivo de sustituir a los trabajadores con máquinas que son más productivas, eficaces y exactas. Pero en el caso de las aplicaciones nucleares, el objetivo no es tanto sustituir a los trabajadores como extender su presencia —por ejemplo, proyectar su alcance hasta las zonas de una central nuclear en las que el medio térmico o radiactivo prohíbe o limita la presencia del hombre.

R.K. Winkleblack, un director de proyectos del EPRI de la División de Energía Nucleoelectrónica expresa: "En contraste con la mayoría de las aplicaciones de la robótica, queremos mantener al hombre en los circuitos en vez de sustituirlo, para que observe el trabajo, adopte decisiones y controle al robot. "Para hablar con propiedad", añade Winkleblack, "los dispositivos que procuramos son equipos controlados a distancia y no verdaderos robots".

Aumento de la disponibilidad

La motivación económica del empleo de robots para la inspección y el mantenimiento de las centrales nucleares se centra en sus posibilidades para aumentar la disponibilidad de la central; otra razón es su posibilidad de reducir la exposición profesional a las radiaciones (EPR) del personal de la central.

Muchas de las actividades de inspección y mantenimiento sólo pueden realizarse cuando el reactor

está parado, porque mientras está en funcionamiento los niveles de radiación resultarían demasiado altos para el hombre aunque estuviera provisto de toda la indumentaria protectora. Por lo general estas actividades se posponen hasta las paradas forzadas previstas para carga de combustible, a fin de reducir al mínimo las interrupciones de la central. Por consiguiente, pueden formar parte de la vía crítica de actividad que resulta necesaria para volver a poner en funcionamiento la central.

Las demoras son críticas para la disponibilidad de la central y, además, costosas. La energía que se compra para sustituir la producción de un reactor de 1000 MW(e) cuesta diariamente un promedio de 500 000 dólares. Los robots podrían contribuir a aumentar la disponibilidad de la central al evitar demoras en las paradas forzadas previstas y realizar algunas tareas mientras el reactor está en funcionamiento.

En la actualidad el reglamento federal limita a los operarios de la esfera nuclear a no más de 3 rem por trimestre o a un total anual de 5 rem*. Esto significa que para muchos trabajos habituales se debe asignar a un gran número de operarios una pequeña parte del trabajo, ya que cada uno alcanzará rápidamente el límite de EPR tras lo cual deben quedar limitados a zonas exentas de radiación hasta el siguiente trimestre. Por consiguiente, las compañías de electricidad se ven obligadas a emplear cantidades significativas de operarios temporeros, o a los llamados móviles, a saber, el personal que pasa a otro trabajo después que ha recibido el límite de EPR.

Conforme a una estimación de la Nuclear Regulatory Commission (NRC), cada hombre-rem de exposición del personal tiene un valor de 1000 dólares para las compañías eléctricas, aunque algunas asignan un valor de por lo menos 5000 dólares a un hombre-rem. Algunos tipos de trabajos, como los estudios sobre la protección radiológica y la inspección de sistemas de refrigeración primarios del reactor pueden estar asociados a campos de radiación de varios cientos de rads por hora.

En el futuro, las compañías eléctricas quizá tengan que enfrentar límites de EPR aún más adversos. Además de las directrices que exigen a las compañías mantener los niveles de EPR "dentro de los límites más bajos que razonablemente se puedan conseguir", durante algunos años la NRC ha estudiado propuestas para reducir las normas de EPR; ese hecho

* En la práctica internacional, el rem ha sido reemplazado por el sievert de conformidad con las recomendaciones de la Organización Internacional de Normalización. Un sievert corresponde a 100 rem.

podría tener una repercusión multiplicativa en los gastos de las compañías eléctricas por concepto de exposición del personal.

Análisis de la viabilidad

El EPRI y la NRC han patrocinado evaluaciones preliminares de las posibles aplicaciones de la robótica en las centrales nucleoelectrificadas. La NRC, motivada fundamentalmente por el objetivo de reducir las dosis de radiación del personal, examinó ante todo las tareas de vigilancia y supervisión en un estudio que realizó la Remote Technology Group. El análisis del EPRI, que llevó a cabo Battelle, Columbus Laboratories, se centró en las actividades de mantenimiento y trató de determinar posibles mejoras de la disponibilidad así como oportunidades de reducir la exposición a las radiaciones.

En cada estudio se intentó cuantificar el costo en EPR y horas-hombre de diversos trabajos que un sistema de robot podría ser capaz de realizar; después se compararon los costos con los del robot y sus sistemas auxiliares y personal de apoyo conexos.

Las tareas de vigilancia e inspección evaluadas en el estudio de la NRC abarcan desde la detección de fugas de vapor o agua, la verificación de las posiciones de las válvulas y la lectura de calibradores hasta la medición de los niveles de radiación en los componentes y diversos métodos de muestreo para detectar la contaminación. En el estudio del EPRI se examinaron 22 tareas que se realizan habitualmente o durante la recarga de combustible, incluidos el mantenimiento del mecanismo de impulsión de las barras de control, la reparación de los tubos del generador de vapor, y la reparación o sustitución de varias bombas y válvulas.

Aunque el alcance de las actividades analizadas era diferente, en ambos estudios se concluyó que había beneficios económicos netos positivos y potencialmente importantes en la aplicación de robots en las centrales nucleares. En el estudio de la NRC, basado en la aplicación de una metodología costo-beneficio en dos centrales existentes, se concluyó que la tecnología de la robótica disponible en el mercado puede adaptarse a las centrales existentes y reducirá tanto la exposición de los trabajadores a las radiaciones como los costos de funcionamiento de la central.

Sin embargo, en el estudio de la NRC se advirtió que los beneficios pueden variar significativamente de una central a otra debido a diferencias en los factores del diseño y en el historial de explotación. En el informe se alienta a las compañías eléctricas a que realicen análisis de costo-beneficio específicos para

cada central, incluido el examen de todos los costos de la entrada de personal en las zonas de radiación, a fin de determinar si las aplicaciones de la robótica para ese tipo de inspecciones son económicas.

En el estudio de Battelle para el EPRI se exploraron las posibles aplicaciones en el mantenimiento a fin de seleccionar tareas determinadas que fueran comunes a muchas centrales nucleares, constituyeran una parte importante de los costos de mantenimiento y fueran realizables dentro de los límites de la tecnología de robots existente. Se hicieron análisis complementarios de costo-beneficio en relación con el empleo de robots en la limpieza de la cavidad del reactor, la vigilancia con fines de protección radiológica y el desatornillado y fijación de aletas. A pesar de la aplicabilidad de la tecnología de robots existente a estas tareas, se concluyó que ninguna de ellas podría realizarse con robots sin antes perfeccionar la tecnología.

Aplicando el método del valor neto actual, los investigadores de Battelle hallaron que el costo del empleo de robots en la limpieza de la cavidad del reactor y en el atornillado de mantenimiento se amortizaría en menos de un año, y que los costos de su aplicación a la vigilancia con fines de protección radiológica se amortizarían en unos tres años. Luego se comprobaron los resultados empleando una escala de valores para los costos por tiempo de parada forzosa y por exposición a las radiaciones.

Hasta con los valores más bajos (700 dólares por exposición rem/hombre y 300 000 dólares por cada día de parada forzosa), la robotización del atornillado de mantenimiento se amortizaría en poco más de un año, mientras que los costos de las actividades de vigilancia con fines de protección radiológica requerirían, según el estudio, menos de cuatro años. En total, el estudio indicó ahorros fluctuantes entre 100 000 y un millón de dólares por robot en valor neto actual, con un precio de compra de cada robot proyectado en menos de 200 000 dólares.

No obstante, los investigadores de Battelle hicieron una importante salvedad, a saber, la limitada disponibilidad de equipos comerciales robóticos diseñados específicamente para aplicaciones nucleares. Como la industria nuclear no ha constituido un mercado importante para los fabricantes de robots, en general se ha dejado este giro a firmas comerciales más pequeñas que pueden adaptar los equipos robóticos a aplicaciones de poco volumen.

Por consiguiente, señala el estudio, la industria nuclear necesita financiar de alguna manera estas innovaciones o atraer a empresarios que estén

dispuestos a dar respaldo financiero a la tecnología durante su fase de demostración. Esto contrasta con la situación del Japón, donde las relaciones de cooperación entre las empresas eléctricas y los vendedores han permitido lograr un enfoque más unificado.

Desarrollo de prototipos

Lo más importante de las investigaciones del EPRI en robótica es su participación en el desarrollo y ensayo de varios prototipos de sistemas de robots que podrían ser precursores de máquinas disponibles a escala comercial. Algunos de estos robots podrían usarse como vehículos de acarreo para transportar a zonas de alta radiación otros equipos robóticos tales como un desatornillador de aletas o un reparador de los tubos del generador de vapor, poner a funcionar el dispositivo más pequeño y vigilar su actividad. Por otra parte, algunos robots menos capaces para trabajos complicados podrían usarse como maestros inteligentes para controlar el trabajo de los autómatas más fuertes.

Algunos prototipos de robots se están empleando por primera vez en la recuperación y limpieza de la unidad 2 dañada de la central nuclear de Three Mile Island, Pensilvania, emplazamiento donde en marzo de 1979 ocurrió un accidente con pérdida de refrigerante que destruyó gran parte del núcleo del reactor y bloqueó el acceso de seres humanos a grandes zonas del edificio de contención del reactor. La inspección a distancia ha demostrado que existen campos radiactivos de hasta 3000 rad/h en algunas zonas de contención*.

Según Adrian Roberts, director principal de programas de la División de Energía Nuclear del EPRI y director de su programa de información y examen de TMI-2, las actividades de limpieza de TMI se han convertido en un acicate muy fuerte para el desarrollo de equipos robóticos. "En TMI tenemos un reto para la robótica, que es real y de actualidad; algunos de los trabajos simplemente no pueden hacerse más que a distancia. Y como no podemos esperar por el robot perfecto, estamos aprovechando la labor realizada en varias esferas para crear robots que lo hagan. Si se demuestra que los robots sirven para determinados trabajos en TMI, podrán emplearse en otras centrales nucleares."

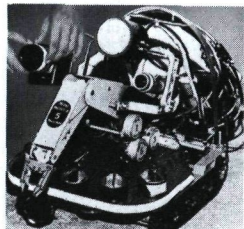
De hecho, en TMI se han realizado varios ensayos con robots desde que ocurrió el accidente. En agosto de 1982, se utilizó un vehículo tipo tanque con orugas dirigido a distancia, de 25 libras (11 kg), suministrado

* En la práctica internacional, el rad ha sido reemplazado por el gray. Un gray corresponde a 100 rad.

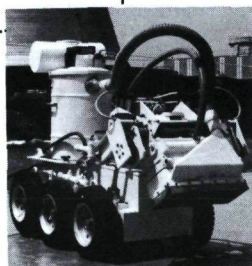
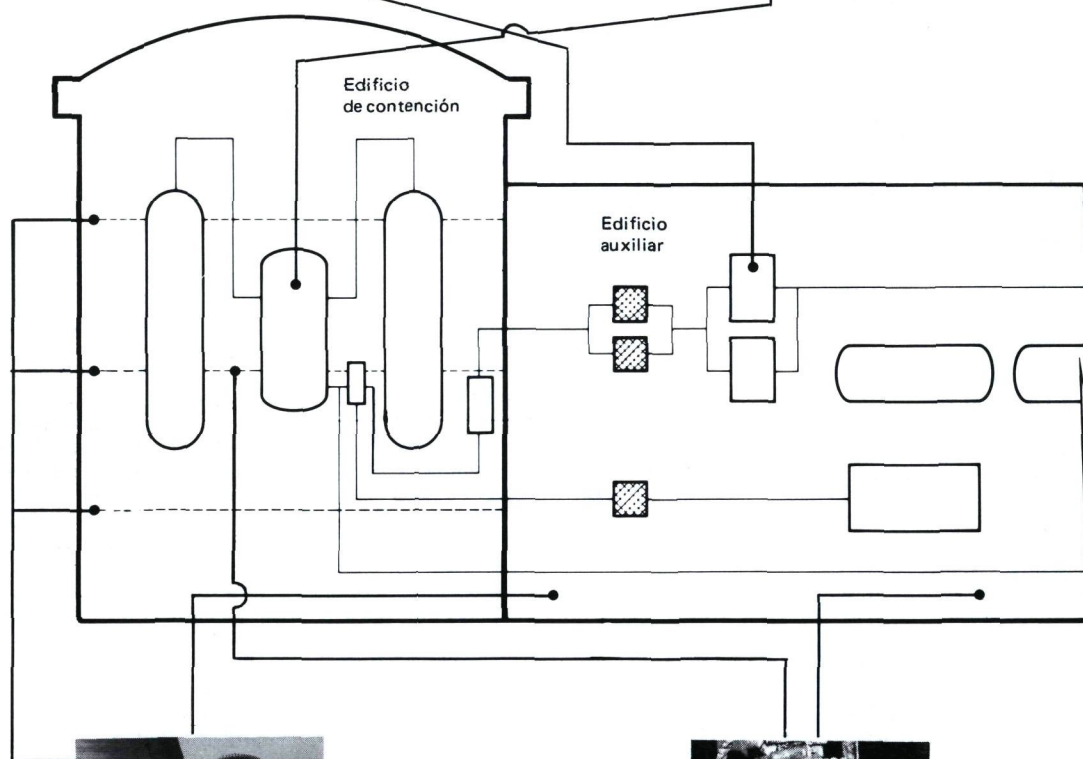
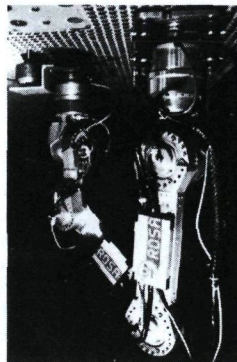
Robots en TMI-2

Las labores de limpieza y recuperación del reactor dañado de TMI-2 en Pensilvania constituye un reto singular para la aplicación de la tecnología de los robots. Dos manipuladores teledirigidos llamados Fred y SISI han prestado ya servicio en actividades de vigilancia y descontaminación. Al RRV, apodado Rover, se le ha asignado la tarea de inspeccionar el sótano contaminado del edificio de contención del reactor. Se ha creado una máquina teledirigida de desbastamiento para eliminar las capas contaminadas de los pisos de hormigón. Se ha confiado a Louie, modificado especialmente para el trabajo en TMI, la vigilancia de los niveles de radiación a medida que se descontamina el tanque de desmineralización de la central. Se ha propuesto que Rosa, un versátil brazo manipulador teledirigido, ayude en la descarga de combustible del núcleo del reactor de TMI-2.

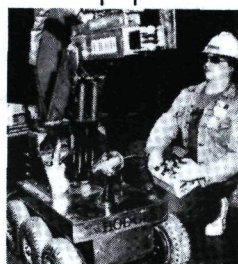
SISI
(vigilancia por control remoto)



Rosa
(extracción de combustible del núcleo)



Desbastadora teledirigida
(descontaminación)



Fred
(descontaminación)

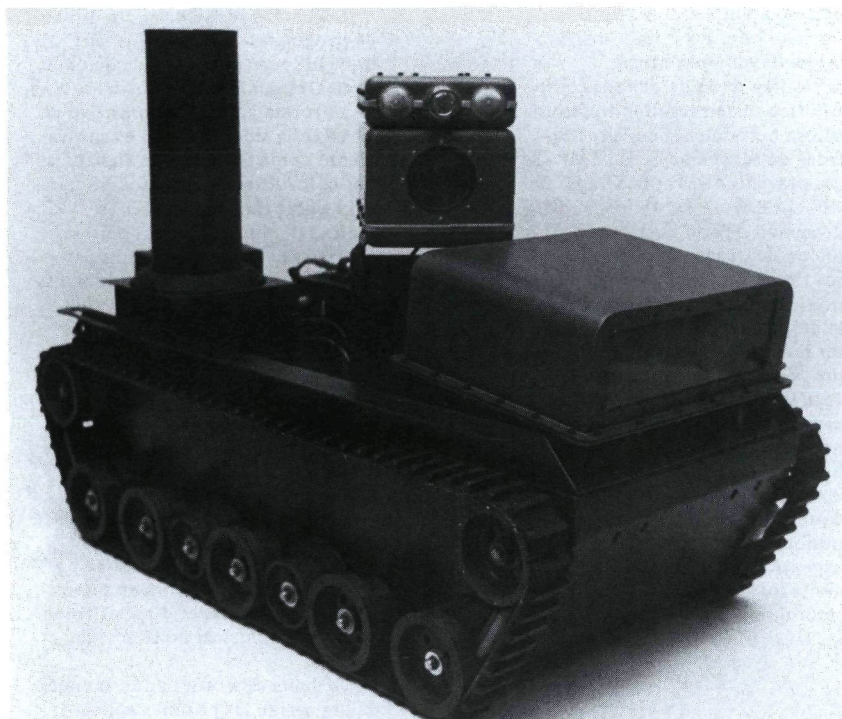
por el DOE y llamado SISI (sistema de inspección en servicio) para fotografiar y obtener lecturas de la radiación en zonas aledañas al sistema de agua de reposición y purificación del agua de la central. Los filtros del sistema de agua están muy contaminados con materiales de fisión procedentes del sistema de enfriamiento primario del núcleo. En la primavera siguiente se instaló un pulverizador de agua a alta presión en un dispositivo dirigido a distancia de seis ruedas, apodado Fred, y se usó para descontaminar las paredes y el piso de un cubículo de bombeo situado en el sótano del edificio auxiliar. Fred pesa 400 libras (181 kg); su brazo mecánico puede levantar 150 libras (68 kg) y extenderse hasta una altura de 6 pies (1,8 m).

El venerable Louie, de la Westinghouse Hanford, fue llevado a TMI para realizar una caracterización radiológica durante la descontaminación del sistema de purificación del agua. Louie, conocido oficialmente como vehículo de transporte teledirigido, se usará para vigilar los niveles de radiación a medida que se eliminen del sistema de agua las resinas del desmineralizador. Aunque para esta operación no se necesitará la fuerza de sustentación de aproximadamente 1000 libras (454 kg) del robot, sus cámaras de televisión protegidas contra la radiación pasarán una dura prueba cerca del tanque desmineralizador, cuya lectura por contacto es de 3000 rad/h.

Quizás el empeño más ambicioso hasta ahora en la aplicación de la robótica a las operaciones de limpieza de TMI haya sido el desarrollo por el Civil Engineering and Construction Robotics Laboratory de la Carnegie-Mellon University (CMU), con el apoyo del EPRI, del vehículo de reconocimiento a distancia (RRV) para explorar el sótano del edificio de contención del reactor. El sótano, al que ningún ser humano ha entrado desde hace más de cinco años, sigue estando muy contaminado por el fango radiactivo que dejaron aproximadamente 600 000 galones (2270 m³) de agua, incluida el agua primaria de enfriamiento, la mayor parte de la cual se ha extraído ya por bombeo.

Al RRV, apodado Rover por la Corporación Nuclear GPU, compañía de electricidad que funciona en TMI, se le ha asignado la tarea de entrar en el oscuro y húmedo sótano mediante una grúa de izaje, inspeccionar el lugar con sus tres cámaras de televisión y hacer un reconocimiento radiológico del área con varios instrumentos de detección que lleva a bordo.

El RRV, de seis ruedas y 1000 lb (454 kg) de peso, fue construido en un esfuerzo conjunto del EPRI, CMU, GPU Nuclear, DOE y la Ben



IRIS —Sistema de inspección industrial teledirigido— es un robot de uso general que se utiliza en medios riesgosos. (Cortesía de EPRI)

Franklin Partnership, de Pensilvania, y diseñado por William Whittaker, profesor auxiliar de ingeniería civil y director del laboratorio de robótica de la CMU. Se caracteriza por llevar a bordo un innovador sistema de cable umbilical bobinado diseñado para que el vehículo pueda sortear los obstáculos sin trabar el cable. Un armazón de acero inoxidable fijado en la base del transportador soporta el carrete del cable, las cámaras, los instrumentos de vigilancia y los sistemas de control. El diseño del vehículo también permite someterlo a una rápida descontaminación por nebulización con agua después que abandona las zonas de trabajo.

Un equipo de dos personas controla el RRV desde un tablero provisto de monitores de televisión y emplazado a una distancia prudente de la zona de riesgo (en TMI, esta distancia es mayor de 500 pies, o 150 m); una persona dirige el equipo y manipula las cámaras mientras que la otra opera el carrete del cable. Varios grupos de operadores hicieron prácticas de maniobras con el RRV durante algunos meses por un recorrido improvisado con obstáculos en el edificio de turbinas anexo (zona de estacionamiento para gran parte del trabajo de limpieza) a modo de preparación para hacer descender el vehículo al sótano de contención.

El RRV es el primero de tres vehículos teleguiados similares que se construirán en el marco del programa conjunto de recuperación

de TMI. Una característica importante del diseño es que el armazón fijado sobre el chasis se puede desmontar para colocar otro equipo en el transportador. El segundo vehículo de base RRV ha sido modificado por Pentek, Inc., contratista de obras del EPRI en TMI, y está dotado de una desbastadora neumática y un sistema de vacío para eliminar de los pisos la capa superior de concreto contaminada en algunas partes del edificio del reactor.

Un tercer RRV permanece en el laboratorio de robótica de la CMU en espera de innovaciones ulteriores. Entre otras tareas para las que se propone efectuar modificaciones futuras al prototipo de RRV figuran la recogida de muestras de líquido y fango del sótano de contención, recogida de muestras de concreto del piso y las paredes del núcleo y el desmantelamiento de algunas estructuras menores.

“En TMI se necesita disponer de vehículos de trabajo que sean muy potentes, fiables y tengan una gran movilidad”, explica Whittaker, el diseñador del RRV. “Los problemas existentes en TMI son muy físicos y activos, y para resolverlos se necesitan equipos igualmente físicos y activos. Ahora bien, es seguro que ninguna máquina podrá hacerlo todo, por eso nos proponemos crear una familia de estos artefactos. Uno de los módulos podría ser un RRV plenamente configurado para supervisar la actividad de un robot auxiliar que solamente portaría herramientas.

Otra posibilidad es una versión en miniatura del RRV radiodirigido desde un vehículo madre."

No hay duda de que los equipos robóticos están resultando ser una valiosa herramienta en las actividades de recuperación de TMI. Se han previsto otras aplicaciones de robots en el emplazamiento. Para el vaciado de combustible del núcleo del reactor de TMI, planificado, en principio, para el año próximo, se ha propuesto el empleo de un brazo manipulador construido por la Westinghouse Electric Co. que se conoce por el nombre de Rosa (siglas en inglés de brazo de servicio dirigido a distancia). Rosa, que también puede funcionar debajo del agua, es ya conocido en algunas compañías de electricidad que explotan reactores de agua a presión, por su capacidad para inspeccionar y reparar automáticamente los tubos del generador de vapor después de instalado en éste por el personal de servicio.

En espera de los acontecimientos

Además de los robots que se han desplegado en TMI, el EPRI está evaluando otros dos prototipos que podrían resultar útiles en las centrales nucleares. Estas máquinas podrían convertirse en parientes cercanas de las máquinas de la familia de robots de TMI que Whittaker tiene en proyecto.

Una de ellas, fabricada por Advanced Resource Development (ARD) Corp., se conoce como sistema de inspección industrial teledirigido (IRIS). El IRIS, diseñado como un robot multipropósito de vigilancia e inspección para medios riesgosos, es un transportador montado en orugas, relativamente pequeño (en comparación con el RRV), y accionado por baterías, en el que se pueden instalar sensores ópticos, de audio y ambientales, manipuladores y subsistemas de comunicaciones y control.

El IRIS pesa 200 libras (91 kg) y está dotado de un singular sistema de radiocomunicación de alta frecuencia diseñado especialmente para funcionar en un medio lleno de barreras físicas e interferencia de señales, lo cual le brinda más movilidad y alcance que la mayoría de los demás robots construidos hasta ahora. Un brazo extensible y un sistema de televisión tridimensional con lente de foco regulable y micrófonos instalados en un soporte inclinable reducen la carga útil a 70 libras (32 kg). Con el tiempo, el IRIS contendrá algunos elementos limitados de inteligencia que le permitirán rehacer su recorrido a la inversa incluso si las señales de control normales se perdieran o estuvieran bloqueadas por interferencia.

Según Floyd Gelhaus, un director de programas del EPRI que está evaluando las posibles aplicaciones nucleares del IRIS y de otros robots, en su forma actual el dispositivo de la ARD ha sido diseñado exclusivamente como vehículo de vigilancia por control remoto. "Su capacidad para hacer trabajos fuertes es limitada", dijo Gelhaus, "pero la movilidad y la configuración autónoma del transportador, unidas a su capacidad para transportar varias cargas útiles, lo convierten en un valioso miembro del personal robótico".

Según los planes de Gelhaus, los técnicos del NDE Center del EPRI pondrán a prueba el robot antes de llevarlo a un medio no radiactivo en una central recién construida. Duke Power Co. ha convenido en que los ensayos se realicen en su nueva central nuclear de Catawba. La última fase consistirá en poner a prueba y evaluar el dispositivo en una central nuclear en funcionamiento.

Gelhaus está estudiando también cuáles serían las posibles aplicaciones del que probablemente sea el robot más avanzado de los construidos hasta el presente: una máquina de seis extremidades que puede caminar libremente, conocida por Odex. Gelhaus observa que el prototipo del Odex, construido por Odetics, Inc., "representa un notable adelanto en su relación peso-potencia", ya que puede levantar más de cinco veces y media sus 370 libras (168 kg) de peso. Casi todos los demás robots pueden levantar poco más de la vigésima parte de su peso. Y, añadió Gelhaus, "Con esa potencia podría tener numerosas aplicaciones". Odetics ha exhibido a Odex en cinta de video por todo el país, incluidas escenas donde se le ve levantando la parte posterior de una camioneta.

Debido a que cada uno de los articuladores, o extremidades, de Odex tiene su propia microprocesadora y a que una séptima computadora coordina el movimiento general, se pueden realizar complejas maniobras dirigidas por un operador o por una computadora a distancia. La máquina puede hacer un giro de 360° mientras se desplaza en cualquier dirección. Sus extremidades articuladas le permiten adoptar seis perfiles diferentes, desde una configuración erecta y angosta para pasar por puertas estrechas hasta una baja y aplanada. El Odex está equipado con cámaras de TV gemelas para la transmisión visual.

"El Odex constituye un paso de avance en el estado actual de los conocimientos", dice Gelhaus, "pero habrá que hacer cuidadosas investigaciones para determinar sus aplicaciones en una central nuclear". La labor del EPRI con Odetics ha dado lugar a modificaciones conceptuales en materia de diseño que

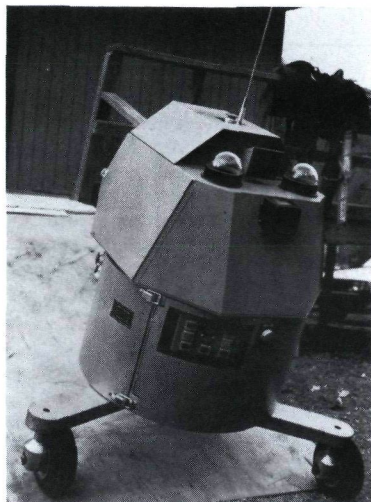
permitirán al Odex salvar los obstáculos que encuentre en el interior de una central energética.

Desarrollo futuro

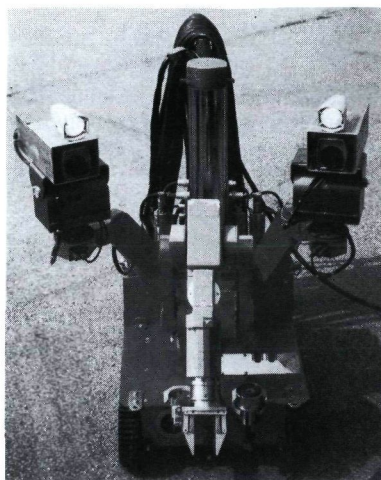
Desde el punto de vista tecnológico, puede que el Odex esté cerca del robot inteligente y completamente autónomo que según los investigadores representaría la unión definitiva de la automatización de la máquina y la esfera en desarrollo de la inteligencia artificial. La capacidad para maniobrar alrededor o por encima de los obstáculos bajo la dirección a distancia de un operador se aproxima al nivel de integración del control por computadora que se necesitará para que un robot sea capaz de responder de manera autónoma a un conjunto de instrucciones programadas remitiéndose a una base de datos independiente para su ubicación, destino, recorrido y tareas.

Sin embargo, consumir la unión entre los robots y la inteligencia artificial es un objetivo de investigación de largo alcance, porque entre otras dificultades están ampliando las fronteras del modelado de la geometría tridimensional de las computadoras y estructurar grandes cantidades de datos de computadora para el acceso lógico del robot. Varios programas de investigación, militares y no militares, en todo el país se están centrando en los aspectos de las matemáticas y la ciencia de las computadoras que a la larga se aplicarán en este desafío. La Oficina de Investigaciones Navales y la Agencia de Proyectos de Investigaciones Avanzadas para la Defensa proporcionan la mayor parte de los recursos de los programas militares. Otros programas, incluidos los de Stanford University, Purdue University, University of Michigan, Massachusetts Institute of Technology y CMU, incluyen I y D tanto con fines militares como no militares.

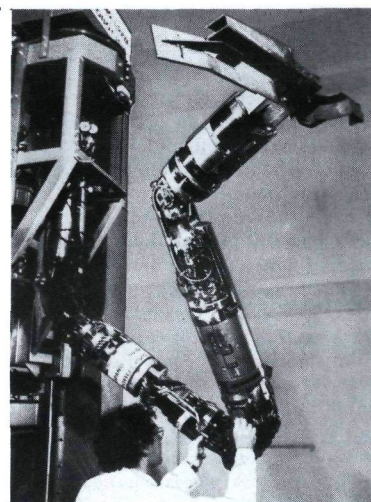
Irving Oppenheim, profesor auxiliar de ingeniería civil de la CMU, está trabajando con el EPRI en un proyecto de investigaciones que incluye algunos aspectos del problema y tiene por objeto la posibilidad de aplicar la inteligencia artificial en robots para trabajos de construcción y mantenimiento. Ya los japoneses están utilizando ampliamente dispositivos automáticos para diversas tareas en la construcción, pero, en general, no son dispositivos inteligentes. Según Oppenheim se necesitan dos elementos para que los robots sean autónomos: capacidad para detectar y evitar los obstáculos de manera lógica y una forma de modelar el ámbito tridimensional de trabajo del robot para que su "mapa mundi" pueda referenciarse a medida que ejecuta la tarea asignada.



Este robot controlado por radio, llamado "Kluge", se diseñó con fines de vigilancia y para transportar diferentes tipos de equipos. (Cortesía de Cybernation Inc.)



"Herman" es un manipulador móvil que se utiliza en la central Y-12 de Oak Ridge, Tennessee, como sistema de reserva para trabajar en medios tóxicos o radiactivos. (Cortesía de Martin Marietta Energy System, Inc.)



ISIS, diseñado por Hispano Suiza, se emplea en el reactor Chinon A3 en Francia para realizar reparaciones. (Cortesía de Hispano Suiza)

Evolución de la robótica

Aunque la industria de la robótica como tal surgió hace menos de dos decenios, su tecnología puede exhibir amplios antecedentes antiguos y remotos —desde figurillas musicales hasta manipuladores mecánicos y máquinas programables— en todo el mundo.

Por ejemplo, los antiguos griegos, egipcios, etíopes y chinos crearon una variedad de figuras móviles accionadas por agua y vapor. Más tarde, en el siglo XVIII e inicios del XIX, los artesanos suizos idearon "autómatas" animados que podían escribir, dibujar y tocar instrumentos musicales, y los franceses crearon telares mecánicos controlados mediante tarjetas perforadas, introduciendo así la primera máquina programable.

Sin embargo, el término "robot" no se empleó ampliamente hasta 1921, cuando se estrenó en Londres la obra *Rossum's Universal Robots* del dramaturgo checoslovaco Karel Čapek, que popularizó el derivado de la palabra checa *robota* que significa trabajo forzado.

En la actualidad la definición de la palabra "robot" explica los rápidos avances tecnológicos y las expectativas modernas. En los Estados Unidos, la Robotics Industries Association define el robot como un "manipulador multifuncional reprogramable ideado para mover materiales, piezas, instrumentos o dispositivos especializados mediante movimientos variables programados a fin de realizar diversas tareas". En el Japón se utilizan las siguientes clasificaciones: los M1 son manipuladores teledirigidos sencillos; los M2A son dispositivos que pueden programarse para que realicen repeticiones fijas; los M2B son los que pueden realizar repeticiones variables; los M3A son dispositivos de tecnología más avanzada a los que el operador que dirige sus movimientos puede enseñar una secuencia de pasos; los M3B son robots que pueden controlarse numéricamente

con una computadora; y, por último, los M4 son robots con "inteligencia artificial" capaces de funcionar con total autonomía.

Hoy se considera en general que la tecnología se encuentra en la fase M3, y que la investigación y el desarrollo están de lleno en el nivel M4. Las plaquetas (chips) para computadoras, los sensores, las cámaras de televisión y otros dispositivos electrónicos están impulsando la evolución. Sin embargo, los expertos dicen que la economía dictará el alcance de las futuras aplicaciones.

En la industria nuclear, las grúas y los manipuladores mecánicos utilizados en la primera fase del desarrollo se encuentran entre los precursores de los más avanzados sistemas de control remoto y de robótica de la actualidad. En 1958 la Hughes Aircraft creó uno de los primeros robots de uso práctico para manipular materiales radiactivos en las instalaciones nucleares de los Estados Unidos de América.

El año pasado, en un seminario internacional convocado conjuntamente por el OIEA y la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos surgieron algunos indicios de lo mucho que ha avanzado la tecnología en la industria nuclear. Más de 200 participantes intercambiaron información en la que detallaron los avances alcanzados en la electrónica, los sistemas ópticos y visuales así como en la tecnología de materiales, que se han combinado para permitir innovaciones y mejoras. (La publicación *Proceedings of the Seminar on Remote Handling in Nuclear Facilities*, puede obtenerse ya dirigiéndose a OECD, 2 rue André-Pascal, 75775 París, Cedex 16, Francia.)

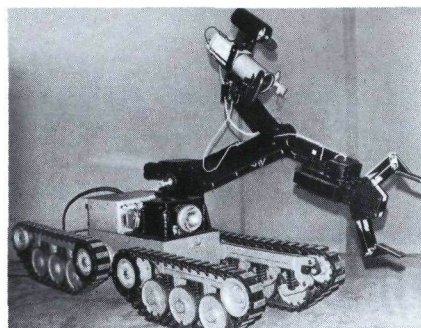
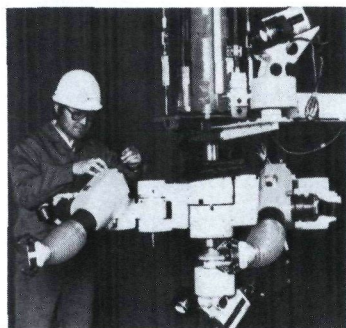
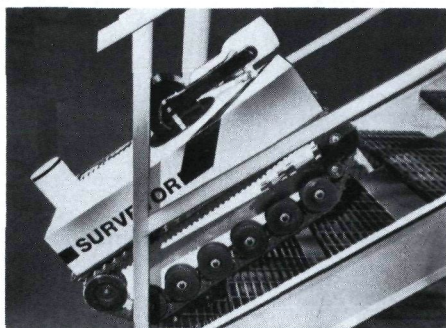
Las fotos que aparecen en estas páginas muestran algunos de los sistemas de robots que se utilizan en la actualidad.

La información para este artículo proviene de "Industrial Robots on the Line", por Robert Ayres y Steve Miller, *Technology Review* (mayo/junio de 1982), y de un artículo de T. Moore publicado en *EPRI Journal* (noviembre de 1984).

Surveyor puede utilizarse para vigilar la radiación, detectar escapes de vapor y leer los calibradores. (Cortesía de Automation Technologies, Inc.)

Un manipulador robótico que se utiliza en las plantas de reelaboración y en las instalaciones de desechos radiactivos del Japón. (Cortesía del PNC, Japón)

El MF3, ideado por CMS Technologies, Inc. en la República Federal de Alemania, se ha utilizado en el último decenio en las centrales nucleares. (Cortesía de EPRI)



Dice Oppenheim: "Se están haciendo intentos para encontrar las matemáticas que permitan a los robots sortear obstáculos, y se está trabajando con los que ya existen, probándolos, descubriendo sus deficiencias y modificándolos para lograr algunos de los objetivos que se han de perseguir con esta capacidad para esquivar los obstáculos. Por ejemplo, estamos comprobando si un algoritmo de control puede resolver la forma de ordenarle a un robot que dé vueltas alrededor de dos tubos, y que después se estire y toque un tercer tubo."

Los progresos en la segunda esfera de investigación —dotar al robot de un modelo tridimensional preciso de su medio de trabajo— podrían conducir a que algún día el robot hiciera uso directo de los planos originales o de los planos definitivos de toda una central nuclear. Oppenheim explica: "Es necesario que haya una estructura de datos, un programa de computadora, que almacene todas las dimensiones de la central, las aberturas en las paredes, las zonas macizas, las tuberías, las intersecciones, etc."

Existen dos métodos para abordar este problema. Uno consiste en construir un robot que tenga sensores por todas partes y sencillamente mantenga ojos y oídos abiertos y no toque nada. El otro consiste en usar de alguna manera todos los datos dimensionales que ya estén registrados y figuren en los planos y en los sistemas de diseño ayudados por computadoras. Estamos explorando el tipo de estructura de datos que mejor se avenga al problema."

Otra esfera en la que el EPRI ha promovido investigaciones es el diseño de centrales nucleares teniendo en cuenta los robots. Muchas de las dificultades que entraña hoy día el uso de robots se derivan del hecho de que las centrales no fueron construidas teniendo en cuenta tales dispositivos; es probable que las modernas centrales de reactores del futuro posean características especiales destinadas concretamente a admitir robots de vigilancia o de mantenimiento.

En virtud de un contrato con el EPRI, la División de Sistemas Energéticos Avanzados de la

Westinghouse estudió la viabilidad de emplear robots en un prototipo de reactor reproductor en gran escala. En el análisis se tuvieron en cuenta distintas tareas de inspección y mantenimiento, de rutina y no habituales, y se esbozaron factores de diseño que podrían mejorar la aplicabilidad de los robots. Entre estos factores figuran zonas de trabajo y acceso adecuadas, toma-corrientes para lámparas y de salida de potencia y la ubicación de equipos y otros obstáculos potenciales.

A medida que se creen más robots de fines especiales para aplicaciones nucleares, aumentará la magnitud de la tarea de evaluar técnicamente esos dispositivos teniendo en consideración los requisitos de las compañías de electricidad. El NDE Center del EPRI puede asumir mayores responsabilidades en este sentido, pues ya participó en la evaluación técnica del IRIS.

Nuevas posibilidades

Los esfuerzos de I y D específicos y la necesidad inmediata de las centrales nucleoelectrónicas de disminuir los costos de mantenimiento y el tiempo de exposición profesional a las radiaciones están abriendo nuevas posibilidades a la aplicación de robots en tareas que la mayoría de la gente preferiría no realizar. Sin embargo, pese a los significativos logros alcanzados hasta la fecha, los investigadores advierten que aún queda mucho por hacer para que pueda considerarse seriamente que los robots son herramientas fiables y económicas. La introducción de robots en las centrales nucleares del país no se producirá de inmediato, pero ya se advierte claramente en el criterio industrial la tendencia a la aplicación de equipos robóticos cuando y donde sea factible.

Michael Kolar, que hasta hace poco fue director superior de programas del EPRI y participó en el estudio realizado por el Instituto sobre las aplicaciones de la robótica desde el comienzo de estas actividades en 1981, refleja algunas opiniones heterogéneas sustentadas por los investigadores en esa esfera.

"Existe alguna tecnología de robots que permite realizar determinados trabajos", dice Kolar, "pero lo que no está nada claro es que esas máquinas se hayan de utilizar ampliamente en un futuro cercano." "Todavía hay que resolver importantes incertidumbres, no sólo relativas a la dotación física y lógica de la tecnología, sino también a otras cuestiones. ¿Será el tiempo requerido para capacitar al personal y ejecutar un trabajo con los robots suficientemente corto para que resulte práctico? Eso todavía no está claro." Quizás la NRC decida reglamentar algunos aspectos del mantenimiento de la central, y todavía no está bien definido el papel de los robots en la concesión de licencias.

"En última instancia todo se reducirá a la cuestión económica: ¿son los robots verdaderamente rentables?", pregunta Kolar. "A menos que disminuyan los costos de los sistemas de robots o que alguien ofrezca proporcionarlos como parte de un conjunto de servicios, no creo que veamos generalizarse en breve el uso de robots avanzados. Para el EPRI, el problema es garantizar que en las centrales entre una buena tecnología. Pero primero, es necesario averiguar lo que son capaces de hacer estas máquinas. Si lo logramos, puede que los robots sean un éxito."

Las compañías de electricidad están demostrando un creciente interés en los robots para aplicaciones en las centrales nucleares, por lo que la comunidad de I y D y la industria de los robots están respondiendo con una gama de dispositivos y máquinas con diversas capacidades. Las actividades en curso constituyen un ejemplo de cooperación en la esfera de la investigación, en el que las compañías grandes y pequeñas, las universidades, los gobiernos y los grupos de investigación industrial trabajan juntos para perfeccionar la tecnología. Si los éxitos recientes son en alguna medida indicio del futuro, la perspectiva de que los robots hagan una contribución importante al mejoramiento de la economía de las centrales es alentadora.

Otras lecturas ...

Evaluation of Robotic Inspection Systems at Nuclear Power Plants, preparado por la Remote Technology Corp. para la Comisión de Reglamentación Nuclear de los Estados Unidos de América, NUREG/CR-3717 (marzo de 1984).

Automated Nuclear Plant Maintenance, informe final para RP2232-1, preparado por Battelle, Columbus Laboratories, 505 King Avenue, Columbus, Ohio 43201 (1985).

"Industrial Remote Inspection System", por E.B. Silverman, *Proceedings of the Robotics and Remote Handling in Hostile Environments, National Topical Meeting*, American Nuclear Society (1984).