



Arriba: Sala de control de la unidad suiza Beznau-1.

Los factores humanos en la explotación de las centrales nucleares

Perfeccionamiento del trabajo hombre-máquina

por E. Swaton,
V. Neboyan y L. Lederman

Abajo: Inspección de equipo en un reactor francés. (Cortesía: Boletín nuclear francés, 1986.)



En sistemas interactivos grandes y complejos, el error humano puede contribuir en gran medida a los fallos de los sistemas. La experiencia operacional obtenida en las centrales nucleoelectricas demuestra que una parte considerable de los incidentes relacionados con la seguridad se debe a errores humanos. Sin embargo, la experiencia demuestra también que la participación humana puede ser muy eficaz si se tiene una comprensión cabal de la situación de la central. Así, una interfaz hombre-máquina eficaz es importante no sólo para prevenir los errores humanos, sino también para ayudar al personal de explotación a hacer frente a sucesos imprevistos.

La fiabilidad humana se puede entender en términos cualitativos y cuantitativos. Desde el punto de vista cualitativo puede describirse como el objetivo de que el hombre realice bien las actividades necesarias para la fiabilidad y la disponibilidad del sistema. Desde el punto de vista cuantitativo se refiere a los datos sobre índices de fallas o probabilidades de error que pueden utilizarse, por ejemplo, en la evaluación probabilista de la seguridad (EPS).

Los Sres. Swaton, Lederman y Neboyan son funcionarios del Departamento de Energía y Seguridad Nucleares.

Educación y capacitación

El personal calificado es un factor clave para garantizar la explotación segura y fiable de una central nucleoelectrónica. La educación permanente del personal es necesaria para alcanzar y mantener los niveles de comportamiento requeridos e incluye la capacitación inicial, la recalificación, la actualización y la ampliación de los conocimientos teóricos y prácticos. Si bien es cierto que cada país ha establecido un sistema de instrucción propio que responde a sus condiciones nacionales, los conocimientos prácticos específicos que necesita el personal de las centrales nucleares son comunes en todas partes, ya que no pueden hacerse concesiones en los que respecta a la explotación segura y fiable de una central nuclear. Por lo tanto, los programas de capacitación en materia de energía nucleoelectrónica tienen que alcanzar el mismo nivel en todos los países.

Una de las aptitudes fundamentales, particularmente en el futuro, será la adaptabilidad, es decir, la capacidad para hacer frente a circunstancias imprevistas. Ello significa la capacidad para encontrar, reconocer y formular un problema, así como para decidir si debe resolverse y cómo hacerlo.

Mientras que la instrucción se refiere fundamentalmente a los estudios académicos y a la competencia permanente, la capacitación se orienta hacia tareas propias del puesto de trabajo. Además de la capacitación en las aulas o en el empleo, la utilización de simuladores a este efecto ha suscitado especial interés. En la mayoría de los países que poseen centrales nucleares existen programas de capacitación con simuladores, por lo general bien formulados, pero su valor puede verse limitado por la antigüedad, el tipo, el tamaño y la capacidad del simulador. No obstante, la capacitación y la recalificación con el simulador son indispensables para mejorar la explotación de una central en condiciones de seguridad y proporcionar los conocimientos teóricos y prácticos necesarios para controlar las condiciones normales y anormales. Además, las ventajas que se derivan de la capacitación con el simulador se pueden apreciar en dos aspectos. Uno se refiere a la EPS, esfera en la que los conocimientos detallados que se adquieren pueden utilizarse en la selección de hipótesis para la capacitación. La experiencia acumulada con la simulación también puede utilizarse para actualizar y mejorar la EPS. El otro aspecto está relacionado con la posibilidad de evaluar las modificaciones de la central desde el punto de vista de los factores humanos. Esas modificaciones incluyen el equipo nuevo, la idoneidad y viabilidad de los procedimientos de operación en condiciones normales y de emergencia, así como el ajuste y la actualización de los programas de capacitación.

Capacitación con simuladores

Los simuladores de tamaño natural, utilizados durante muchos años como instrumento fundamental en la capacitación de los operadores de las centrales nucleares, han alcanzado un alto grado de complejidad. Ahora es posible trabajar con hipótesis de capacitación que no podían abordarse cinco años atrás. ¿Qué haremos con la potencia que tendrán las computadoras dentro de cinco años? Por una parte están los especialistas que estiman necesaria una mayor potencia de cálculo para poder

ampliar la capacitación, pero la opinión general es que la potencia de cálculo actual responde bien a esos fines. Al mismo tiempo se observa una clara tendencia a aumentar la fidelidad de los modelos. Durante los últimos cinco años se ha prestado una atención especial a la alta fidelidad de la simulación en los modelos del núcleo y del sistema de refrigeración de los reactores. Hace falta más reflexión y examen para determinar si el aumento de la fidelidad está justificado. Una cosa es proporcionar una mayor fidelidad, y otra —más importante— es definir si hay que hacerlo porque los modelos actuales no pueden satisfacer los objetivos de la capacitación. En una reciente reunión de especialistas del OIEA sobre los simuladores de capacitación para las centrales nucleares, se observó que algunos diseñadores identificaban las necesidades de capacitación que motivaban el perfeccionamiento de los modelos. Esto es un indicio alentador. El diseño de los simuladores de capacitación debe responder al examen de los objetivos del aprendizaje, lo cual no se ha tenido en cuenta en el pasado.

Un simulador de tamaño natural es un instrumento poderoso, pero debido a su complejidad y costo no siempre puede satisfacer convenientemente todas las necesidades de capacitación. Se estima que es posible proporcionar entre el 75% y el 80% de la capacitación total, representando solamente entre el 25% y el 30% de una sala de mando simulada de tamaño natural.

Para proporcionar una capacitación dirigida especialmente a la comprensión de alguna parte de la central o de determinadas funciones se utilizan simuladores de tareas parciales, que pueden ser bien un analizador de la central, un sistema de microsimulación o un simulador de "función". En estos casos es importante formular un "modelo mental" adecuado del sistema, que permite imaginar toda la operación que se va a realizar al basarse en la capacidad para procesar y utilizar la información especial. Un buen ejemplo es la utilización de una maqueta a escala mediana del sistema de refrigeración de un reactor de agua a presión (PWR) (denominados modelos de vidrio). Aun cuando las presiones que se utilizan no son prototipos, el gran valor didáctico de estos modelos radica en que permiten observar directamente la termodinámica.

En lo que se refiere a los adelantos futuros en la esfera de los simuladores de capacitación, se han señalado los siguientes problemas: los procesos mentales, la forma en que se aprende y cómo abordar el problema de la interfaz hombre-máquina con una mejor comprensión de la capacidad cognoscitiva humana a fin de reducir el volumen de trabajo de los operadores y mejorar el rendimiento.

Al analizar la experiencia adquirida en la capacitación para situaciones de emergencia con el uso de simuladores, se pone de manifiesto que los incidentes significativos para la seguridad suelen enfrentar a los operadores con situaciones cuya evolución y desarrollo difiere bastante de las hipótesis del simulador. Además, como las situaciones de emergencia son poco frecuentes, el pronóstico y el análisis del comportamiento humano plantean algunas dificultades. Sin embargo, se reconoce ampliamente la utilidad e importancia generales de la capacitación con simuladores para enfrentar situaciones graves en la central, en particular si las hipótesis de accidentes se diseñan de modo que permitan comenzar las

secuencias en distintos niveles de energía y llevar la simulación hasta condiciones de degradación del núcleo. Además, si el aprendiz comete un error en una situación determinada, puede detenerse la simulación para señalar y analizar el error. Luego se puede reanudar la situación hipotética, lo que proporciona una valiosa información al instructor y al aprendiz. Se pueden reunir datos regularmente mediante sistemas automáticos de vigilancia del comportamiento del aprendiz, o mediante un plan que refleje los errores para conocimiento del instructor. La EPS utiliza cada vez más los datos sobre el comportamiento humano que se recogen en las sesiones de trabajo con los simuladores.

Reunión de datos sobre errores humanos

El análisis de los sucesos anormales y los conocimientos derivados de la EPS han demostrado que gran parte de los casos se debe a errores en el comportamiento humano. La principal fuente de información sobre la relación entre el comportamiento humano y los errores es la experiencia operacional en las centrales nucleares. Además de las prácticas nacionales de notificación de sucesos relacionados con la seguridad a las autoridades reglamentadoras, existen varios sistemas internacionales de notificación. El Sistema de Notificación de Incidentes (IRS) de la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (AEN/OCDE) reúne ejemplos típicos de Europa occidental, Canadá, Japón y Estados Unidos. El IAEA-IRS es en esencia similar, pero incluye también notificaciones de los países de Europa oriental y de los países en desarrollo. Otro sistema —el Sistema de Notificación de Sucesos Anormales del Centro de Investigaciones Conjuntas de Ispra— reúne la información de algunos sistemas nacionales. Sin embargo, en esos sistemas de notificación no se identifican concretamente los errores humanos, por lo que es preciso elaborar métodos de análisis que permitan definir la contribución del comportamiento humano al accidente. Sólo en contados casos las compañías eléctricas han puesto en marcha sistemas destinados a determinar el papel que desempeñan los errores humanos en los incidentes.

Se han definido algunas situaciones generales, a saber:

- Hay actividades, como las de prueba y mantenimiento, que son causas comunes de errores. La aplicación de procedimientos automáticos pueden atenuar algunos problemas.
- Los errores humanos son más frecuentes en los sistemas que tienen bajos niveles de disponibilidad o redundancia o en los que no están suficientemente automatizados.
- Los errores humanos en situaciones anormales son más frecuentes inmediatamente después que comienzan a funcionar las alarmas.
- Un diseño deficiente (desde el punto de vista de la ingeniería del sistema, la disposición de la sala de mandos y los principios ergonómicos) es una de las principales causas de los errores humanos.
- La transferencia de información durante los cambios de turno del personal es causa general de error.

La EPS proporciona conocimientos valiosos para determinar cuáles son los sistemas de la central que están

sujetos a la interacción humana y para agregar estas interacciones en función de tareas similares o causas comunes. Sin embargo, la falta general de datos reales sobre el comportamiento humano, especialmente en condiciones anormales, impone límites. En esta esfera, las EPS deben considerarse sólo como indicadores de posibles problemas humanos y no como mecanismos para pronosticar el comportamiento humano.

Retroalimentación de datos

El análisis de los accidentes permite comprender en cierta medida los errores humanos. El operador debe recibir retroalimentación, pero la cuestión es cómo establecer las especificaciones para evaluarla.

Para solucionar los problemas relacionados con los errores humanos y las repercusiones de la experiencia operacional, aparentemente algunos países se apoyan en las bases de datos y otros en los simuladores. Ante esta situación cabe preguntar: ¿Qué hacer para recoger la experiencia adquirida por el operador y cómo valorar las diversas ventajas que ofrecen los distintos aspectos? ¿Deben tener los diseñadores una estrategia bien definida? Numerosos expertos* opinan que las investigaciones en esta esfera deben seguir en diferentes direcciones, y que parece necesario establecer una coordinación.

La retroalimentación sobre el papel que desempeñan los factores humanos en sucesos significativos se analiza actualmente en diversos centros de investigación. La Comisión Reguladora Nuclear (CRN) de los Estados Unidos estableció oficialmente el Programa de Investigación de Incidentes (IPP), uno de cuyos objetivos es garantizar el estudio sistemático y técnicamente correcto de los sucesos operacionales. Todas las paradas deben informarse a la CRN y el objetivo del IPP es describir la situación de forma realista.

En el Japón, los incidentes deben notificarse al banco de datos en un plazo de 48 horas y el informe completo debe presentarse en 30 días. El índice de error humano en relación con el número total de incidentes es del 10% aproximadamente. Más de la mitad de los casos (54%) provocaron una parada automática; el 15%, una disminución de la energía de la central, y el 31% no tuvo efecto alguno. La mitad de los errores humanos (el 51%) se debió a un mantenimiento deficiente, y el 29% a una explotación inadecuada.

Según la estimación realizada por un experto belga, de las 40 paradas que sufrieron siete reactores, el 70% estuvo relacionado con factores humanos. Un análisis estadístico a fondo realizado por Electricité de France (EdF) demostró que los errores son relativamente escasos durante la noche, cuando hay poca actividad, y durante la hora de almuerzo. Entre los tipos más comunes de errores se encontraban las omisiones y las operaciones retardadas. En cuanto a los mecanismos de error, los más comunes son el olvido de realizar una operación, la incapacidad para identificar la operación correcta y el diagnóstico deficiente del estado del sistema.

* Esta fue la opinión general en la reunión de especialistas organizada en Roskilde por el OIEA, en mayo de 1987, sobre el tema "Retroalimentación de la información relativa al factor humano en la esfera de la energía nucleoelectrica: repercusión de la experiencia operacional para el análisis y el funcionamiento de sistemas".

La simulación también puede proporcionar retroalimentación eficiente sobre el comportamiento del operador, pero para llevar a cabo una investigación eficaz se necesita gran cantidad de dinero y esfuerzo. Por ejemplo, en Francia se construyó la simulación de tamaño natural de una sala de mando computarizada para obtener rápidamente retroalimentación de la experiencia del operador.

Sistemas de apoyo al operador

Los sistemas de apoyo al operador son un tipo de dispositivos diseñados para añadirlos a la sala de mando de una central nuclear con miras a ayudar al operador a realizar su trabajo y disminuir así la posibilidad de error humano. Estos sistemas incluyen una amplia gama de recursos, desde los más sencillos, como el uso del color para codificar un dispositivo de visualización y diferenciarlo dentro de un grupo de dispositivos similares, hasta los complejos, como la representación en video obtenida por computadora, que reúne varias cifras de indicadores dispersas en diversos lugares de la sala de mando y las proyecta en un dispositivo de visualización conciso situado frente al operador. Se han realizado ingentes esfuerzos para elaborar sistemas computarizados de información y apoyo al operador.

Se han concebido diferentes sistemas con un objetivo definido de antemano. Mientras que los primeros sistemas se dedicaron fundamentalmente a supervisar las funciones críticas de seguridad y a detectar y localizar las alteraciones, los sistemas posteriores trascendieron este marco limitado al suministrar además información sobre la configuración normal de la central como una función de la modalidad de funcionamiento y de su comportamiento previsto.

La creciente dependencia de los sistemas computarizados de apoyo al operador debe examinarse a la luz de las tareas que se han de realizar, lo que destaca las ventajas relativas de los seres humanos y las computadoras.

Identificación. Si bien las computadoras son eficientes para reconocer estructuras definidas de antemano, el hombre es superior para reconocer cualquier estructura que pueda surgir y también es capaz de manejar una información incompleta. La ventaja de las computadoras radica en la lectura y la validación de las mediciones y en la solución de cálculos complejos. Para la identificación, depende fundamentalmente de procesos deductivos basados en reglas determinadas.

Análisis e interpretación. Las computadoras pueden resolver operaciones algorítmicas complejas con suma rapidez y fiabilidad, pero tienen capacidad limitada para aplicar operaciones heurísticas. El hombre, por el contrario, puede generalizar a partir de un conjunto de muestras utilizando el criterio, la experiencia y el conocimiento implícito.

Comparaciones. Una evidente ventaja de las computadoras es su capacidad para procesar y recoger un gran volumen de datos precisos y compararlos atendiendo a reglas definidas de antemano. Ahora bien, el hombre es capaz de utilizar datos provenientes de diversas fuentes y en diferentes formatos para compararlos, y descansa más en la experiencia que en deducciones precisas.

Planificación. La potencia de cálculo es, sin lugar a dudas, una ventaja cuando se presenta la tarea de encontrar una solución óptima a un problema bien definido. Un ligero cambio en el problema revela las posibilidades del hombre, que puede adaptar rápidamente los procedimientos existentes a una situación dada e incluso puede idear nuevos procedimientos si fuera necesario.

En general, las computadoras sólo pueden trabajar con eficiencia y seguridad cuando tratan problemas, instrucciones, reglas o procedimientos que están bien definidos. Los operadores humanos pueden trabajar dadas las mismas condiciones, pero también pueden resolver problemas mal definidos, instrucciones incompletas y reglas o reglamentaciones deficientes. Por lo tanto, el hombre puede todavía controlar el sistema en situaciones que provocarían el fallo de la computadora. En consecuencia, el hecho de que las computadoras puedan realizar mejor algunas tareas no debe ser motivo para sustituir al operador humano.

Información de la EPS para la adopción de decisiones en materia de seguridad

Durante los últimos 15 años la EPS se ha convertido en un instrumento fundamental para evaluar la seguridad de los reactores. Se han realizado más de 30 EPS y los resultados han aportado conocimientos sumamente valiosos para el diseño y la explotación de las centrales. Pese a las posibilidades que ofrecen esos estudios, no se les ha utilizado suficientemente en la adopción de decisiones. Una razón para ello es que en los informes de la EPS se combinan conclusiones útiles con un gran volumen de información técnica que no tiene utilidad para los encargados de adoptar decisiones. Otra razón es que sólo quienes conozcan bien la metodología pueden entender los informes de la EPS.

Hace algunos años se inició un trabajo que permitiría utilizar de modo más rápido e interactivo la información contenida en una EPS. El objetivo que se perseguía era crear un "modelo vivo de la EPS" que siempre estuviera disponible para la gestión de la seguridad operacional.

Durante ese mismo período se desarrollaron considerablemente las computadoras pequeñas, en particular las computadoras personales. Por esa razón muchas ramas de la industria utilizan actualmente computadoras pequeñas a manera de instalaciones independientes o como puestos de trabajo conectados a computadoras mayores.

Asimismo, los sistemas integrados que se han creado para estructurar la información de la EPS utilizan los últimos adelantos de la tecnología de computadoras pequeñas. Por ser altamente interactivos y "cómodos para el usuario", estos sistemas son particularmente convenientes para actualizar la información de la EPS y dar respuesta a las preguntas del tipo "¿qué ocurriría si?".

Las aplicaciones de la información proveniente de la EPS en la gestión de la seguridad operacional se basan en los efectos que pueden tener los cambios en la configuración de la central sobre la seguridad general de ésta. Entre esas aplicaciones figuran el control y la evaluación del estado de los principales sistemas de seguridad; las modificaciones en los procedimientos de operación; los

cambios en las especificaciones técnicas (en particular los relativos a las pruebas, el mantenimiento y los intervalos de paradas forzadas permisibles); la prioridad de los elementos que se han de reparar; la evaluación de los cambios en el diseño teniendo en cuenta las interacciones entre los sistemas de la central; y la prioridad de las actividades de inspección.

Los últimos adelantos están orientados a suministrar información para la adopción de decisiones en condiciones de explotación normal de una central. Los conjuntos de programas de computadora incluyen un modelo de la central basado en los resultados de los análisis de árboles de fallos y de sucesos. El personal de las compañías eléctricas y las entidades reglamentadoras son los principales usuarios de estos conjuntos de programas.

Recientemente se crearon dos sistemas, a saber:

PRISIM (Sistema de gestión de la información probabilista sobre la seguridad). Este es un conjunto de programas para computadoras personales que permite el rápido acceso a la información relacionada con la EPS. La base de datos contiene información tratada de antemano obtenida de los resultados de la EPS de referencia, y un modelo de la seguridad de la central que permite evaluar los cambios ocurridos en esa esfera por haberse modificado las condiciones de la central. Las cuestiones relativas a la seguridad que entrañan variaciones en la configuración de la central pueden manejarse mediante un modelo que permite que el usuario especifique (con arreglo a esquemas o listas de componentes) el nuevo estado de la central y calcule el consiguiente margen de seguridad. Se introducen diversas medidas importantes para clasificar los sistemas de seguridad y las acciones del operador. El código puede también analizar la respuesta de los sistemas de seguridad a determinados fallos. Este análisis puede poner al descubierto defectos del diseño tales como la vulnerabilidad a los fallos del sistema de apoyo. En la información previamente tratada de los resultados de la EPS de referencia figura una descripción de las secuencias de accidentes más importantes; las medidas de restablecimiento que adopta el operador; las interfaces del sistema de apoyo; una biblioteca de especificaciones técnicas, y clasificaciones de la prioridad de los sistemas, subsistemas, componentes y acciones del operador relacionados con la seguridad. La CRN de los Estados Unidos de América encargó la elaboración del PRISIM para brindar ayuda a los inspectores. Actualmente se encuentra instalado en varias centrales nucleares, a saber, la Arkansas Nuclear One (Unidad I), la Peach Bottom-2 y la Surry-1.

ESSM (Vigilancia del estado de los sistemas esenciales). El ESSM es un sistema de programas de compu-

tadora basado en técnicas de análisis de árboles de fallos, que proporciona servicios en línea a los operadores de las centrales y les permite realizar rápidamente determinadas evaluaciones probabilistas de los sistemas de las centrales en un medio interactivo. Se utilizan teclados y monitores de representación visual situados en la sala central de mando para introducir y presentar a la observación el estado y la configuración actuales de los elementos de la central. En cualquier momento el operador puede solicitar al ESSM que evalúe la disponibilidad general de los sistemas esenciales. El ESSM analizará los árboles de fallos complejos del sistema (que modelan la redundancia y las interacciones complejas del sistema) teniendo en cuenta el efecto de las paradas y las configuraciones actuales de la central. Posteriormente muestra al operador el estado de disponibilidad de los sistemas esenciales que se han determinado utilizando los criterios probabilistas. Al mismo tiempo, el ESSM comprueba las reglas de explotación deterministas. Si las violaciones de una regla requieren una medida correctiva, toda la información pertinente se presenta al operador. Además de estos servicios de evaluación, el ESSM brinda al operador recomendaciones para un mantenimiento urgente así como un servicio de planificación del mantenimiento. El ESSM se estableció recientemente en la central nuclear Heysham-II del Reino Unido.

Cooperación internacional

Existen muchas posibilidades para mejorar el factor humano en la explotación de las centrales nucleares. Este objetivo se puede lograr mediante medidas técnicas para perfeccionar los equipos o medidas para mejorar el comportamiento del operador. Sin embargo, al parecer no existe ningún acuerdo respecto de las medidas que se deben adoptar y los aspectos que se deben priorizar. Por esta razón, entre otras, el OIEA convocó la Conferencia Internacional sobre la interfaz hombre-máquina en la industria nuclear (control e instrumentación, robótica e inteligencia artificial)* que fue acogida por el Gobierno del Japón y se celebró en Tokio del 15 al 19 de febrero de 1988. La Conferencia fue organizada con la colaboración de la AEN/OCDE y la Comisión de las Comunidades Europeas. Entre los temas analizados figuraron los análisis del comportamiento humano en la explotación de las centrales, reseñas de las medidas en la esfera de la ingeniería humana para mejorar el comportamiento humano y la importancia de suministrar al operador más y mejor información.

* Próximamente el OIEA publicará las actas.

