

Director del capítulo  
*Michael Crane*

# 76

## Sumario

Perfil general <i>Michael Crane</i> . . . . .	76.2
Generación de energía hidroeléctrica <i>Neil McManus</i> . . . . .	76.2
Generación de energía a partir de combustibles fósiles <i>Anthony W. Jackson</i> . . . . .	76.3
Generación de energía nuclear <i>W.G. Morison</i> . . . . .	76.8
Seguridad en la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica: un ejemplo de Estados Unidos <i>Janet Fox</i> . . . . .	76.15
Riesgos <i>Michael Crane</i> . . . . .	76.17
Problemas para la salud pública y el medio ambiente <i>Alexander C. Pittman, Jr.</i> . . . . .	76.17

## ● PERFIL GENERAL

*Michael Crane*

En 1993, la producción mundial de electricidad alcanzó los 12,3 trillones de kilovatios-hora (Naciones Unidas 1995). (Un kilovatio-hora es la cantidad de electricidad necesaria para encender diez bombillas de 100 vatios durante 1 hora.) Los datos de Estados Unidos, país que produjo por sí solo el 25 % de la energía total, nos dan la medida de este esfuerzo. La industria eléctrica norteamericana, que combina entidades de propiedad pública y privada, generó 3,1 trillones de kilovatios-hora en 1993 a partir de más de 10.000 generadores (Departamento de Energía de EE.UU., 1995). La parte de esta industria que está en manos de inversores privados emplea a 430.000 personas en operaciones eléctricas y de mantenimiento, con unos ingresos anuales de 200 billones de dólares.

La electricidad se genera en centrales que utilizan combustibles fósiles (petróleo, gas natural o carbón), energía nuclear o energía hidráulica. En 1990, por ejemplo, el 75 % de la energía eléctrica de Francia se obtuvo de centrales nucleares. En 1993, el 62 % de la electricidad generada en todo el mundo procedió de combustibles fósiles, el 19 % de la energía hidráulica y el 18 % de la energía nuclear. Otras energías renovables, como la eólica, la solar, la geotérmica o la biomasa, representan sólo una pequeña parte de la producción eléctrica mundial. Desde las centrales que la generan, la electricidad se transmite a través de redes interconectadas a los sistemas locales de distribución y, de ahí, a los consumidores.

Los trabajadores que hacen posible todo esto son principalmente varones y poseen un alto grado de cualificación técnica y de conocimiento del "sistema". Las tareas que desempeñan son bastante variadas y presentan elementos en común con la construcción, la fabricación, la manipulación de materiales, el transporte y las comunicaciones. En los artículos siguientes se describen con detalle algunas de estas operaciones. En los artículos dedicados a las normas de mantenimiento eléctrico y a los problemas ambientales se destacan también importantes iniciativas normativas del Gobierno norteamericano que afectan a la industria eléctrica.

## ● GENERACION DE ENERGIA HIDROELECTRICA

*Neil McManus*

Los seres humanos aprendieron a aprovechar la energía del agua corriente hace muchos milenios. Durante más de un siglo, la electricidad se ha generado utilizando la energía hidráulica. La mayoría de la gente asocia el aprovechamiento de la energía hidráulica al represado de ríos, pero también puede generarse energía hidroeléctrica aprovechando las mareas.

Las operaciones de generación de energía hidroeléctrica cubren una extensión inmensa y muchos climas, desde el permafrost ártico hasta los bosques pluviales ecuatoriales. La ubicación geográfica de las centrales eléctricas influye en las situaciones peligrosas que puedan darse, ya que riesgos laborales como insectos o animales agresivos o incluso plantas venenosas varían dependiendo del lugar.

Una central hidroeléctrica consta generalmente de una *presa* que almacena una gran cantidad de agua, un *aliviadero* que libera el agua sobrante de forma controlada y una *casa de máquinas*. La central hidroeléctrica también puede contar con *diques* y otras estructuras de control y contención del agua, que no participan

directamente en la generación de electricidad. La casa de máquinas contiene canales de conducción que hacen pasar el agua a través de unas turbinas que convierten el caudal lineal en caudal rotativo. El agua cae por las palas de la turbina o fluye horizontalmente a través de ellas. La turbina y el generador están interconectados. De este modo, la rotación de la turbina hace girar el rotor del generador.

El potencial de energía eléctrica del caudal de agua es el producto de la masa de agua por la altura de caída y la aceleración gravitatoria. La masa depende de la cantidad de agua disponible y de su caudal. El diseño de la central eléctrica determina la altura de caída. En la mayoría de los diseños se introduce el agua desde un punto situado cerca de la parte superior de la presa y se descarga por la parte inferior al cauce fluvial existente aguas abajo. De este modo, se optimiza la altura mientras se mantiene un caudal razonable y controlable.

En la mayoría de las centrales hidroeléctricas modernas, los turbogeneradores están orientados verticalmente (son las conocidas estructuras que sobresalen del piso principal de las centrales). Sin embargo, casi toda la estructura está situada por debajo de lo que puede verse en el piso principal. Se trata del foso del generador y, por debajo de éste, del foso de la turbina y las tuberías de alimentación y descarga. A estas estructuras y a los canales de conducción de agua sólo se entra ocasionalmente.

En las centrales más antiguas, el turbogenerador es de orientación horizontal. El eje de la turbina sobresale de una pared hacia el interior de la casa de máquinas, donde se conecta al generador. Este último se parece a un enorme y anticuado motor eléctrico de carcasa abierta. Como testimonio de la calidad de diseño y construcción de estos equipos, algunas instalaciones de fin de siglo todavía continúan en funcionamiento. En ciertas centrales modernas se han incorporado versiones actualizadas de los diseños antiguos. En ellas, el canal de agua rodea completamente el turbogenerador y el acceso tiene lugar a través de una camisa tubular que atraviesa el canal.

En los devanados del rotor del generador se genera un campo magnético. La energía de este campo procede de baterías ácidas de plomo o alcalinas de níquel cadmio. El movimiento del rotor y el campo magnético presente en sus devanados inducen un campo electromagnético en los devanados del estator. El campo electromagnético inducido crea la energía eléctrica que se suministra a la red. La tensión eléctrica es la presión eléctrica originada por el caudal de agua. Para mantener la presión eléctrica —es decir, la tensión— a un nivel constante, hay que modificar el caudal de agua que pasa por la turbina en función de la demanda o de cambio de condiciones.

El flujo de electricidad puede producir un chisporroteo, por ejemplo en el conjunto excitador del rotor, que puede generar ozono, el cual, incluso a niveles bajos, resulta perjudicial para la goma de las mangueras contra incendios y otros materiales.

Los generadores de energía hidroeléctrica producen altas tensiones e intensidades muy altas. Los conductores de los generadores se conectan al transformador de la unidad y desde éste a un transformador de potencia. El transformador de potencia incrementa la tensión y reduce la intensidad para su transmisión a larga distancia. Una baja intensidad minimiza la pérdida de energía por calentamiento durante la transmisión. En algunos sistemas se emplea como aislante el gas hexafluoruro de azufre en lugar de los aceites convencionales. El chisporroteo eléctrico puede descomponer este aislante en productos notablemente más peligrosos que el compuesto original.

Los circuitos eléctricos contienen disyuntores que pueden desconectar el generador de la red eléctrica de forma rápida e impredecible. En algunas unidades se emplea un chorro de aire comprimido para romper la conexión. Cuando actúa una unidad de este tipo, se produce un altísimo ruido de impacto.

### Administración y operaciones de la central

La mayoría de la gente está familiarizada con los aspectos administrativos y operativos de la generación de energía hidroeléctrica, que suelen dar el perfil público de la organización. La administración de la central eléctrica trabaja para garantizar la prestación de un servicio fiable. Entre el personal administrativo se encuentran los empleados de oficina, que desempeñan funciones comerciales y técnicas, y la dirección. Entre el personal de operaciones se cuentan los gerentes y supervisores de planta y los operadores de proceso.

La generación de energía hidroeléctrica es una operación de proceso pero, a diferencia de otras, como las existentes en la industria química, muchas centrales hidroeléctricas carecen de personal de operaciones. Los equipos se manejan por control remoto, a veces a gran distancia. Casi toda la actividad laboral se centra en el mantenimiento, reparación, modificación y mejora de la central y los equipos. Esta forma de funcionamiento exige sistemas eficaces que permitan pasar el control de producción a mantenimiento para evitar una puesta en marcha inesperada.

### Riesgos y estructura de gestión

Las compañías eléctricas se han dirigido tradicionalmente como organizaciones jerárquicas de "ascenso". Es decir, la estructura organizativa ha creado tradicionalmente una vía de movilidad ascendente que comienza en los puestos de acceso y conduce a la alta dirección. Son relativamente pocas las personas que acceden a la organización lateralmente. Esto significa que muy probablemente los supervisores y directivos de una compañía eléctrica han experimentado las mismas condiciones de trabajo que las personas que ocupan actualmente los puestos de acceso. Este tipo de estructura puede repercutir en la posible exposición de los trabajadores a los agentes peligrosos, especialmente a los que tienen efectos acumulativos crónicos. Por ejemplo, analicemos el ruido. Los empleados que actualmente ocupan cargos de dirección pueden haber sufrido graves pérdidas auditivas cuando ocupaban puestos de trabajo expuestos a ruido. Estas pérdidas podrían pasar inadvertidas para los programas de pruebas audiométricas de la empresa, ya que este tipo de programas sólo se aplica en general a empleados actualmente expuestos a elevados niveles de ruido en el trabajo.

### Mantenimiento de los equipos generadores

El mantenimiento de los equipos generadores se divide en dos tipos principales de actividad: el mantenimiento eléctrico y el mantenimiento mecánico. Aunque ambos tipos de trabajos pueden realizarse simultáneamente y uno junto a otro, los conocimientos y tareas necesarios son completamente diferentes.

Para realizar tareas de mantenimiento puede ser necesario parar y dismantelar una unidad. El caudal de agua se controla mediante compuertas, es decir, estructuras de acero que permiten bloquear el canal de alimentación para desaguar los canales interiores. El nivel de agua en reposo a la salida de la turbina (tubo de aspiración) está por debajo del nivel del caracol y de las palas del rodete de la turbina, lo que permite acceder a estas estructuras. El caracol es una estructura cónica con forma de espiral que distribuye el caudal de agua por el rodete de la turbina de modo uniforme. El agua pasa desde el caracol a través de paletas fijas que dirigen la corriente de agua, y de paletas móviles (compuertas de mariposa) que regulan su volumen.

Si es necesario, es posible dismantelar la turbina y el generador de su ubicación normal para colocarlos en el piso principal de la casa de máquinas, por ejemplo para repintar o desengrasar y para reparar y sustituir devanados, rodamientos, frenos o sistemas hidráulicos.

A veces, las palas del rodete, así como las compuertas de mariposa, las paletas fijas y las estructuras de conducción de agua del caracol y del tubo de aspiración, sufren daños debidos a la cavitación. La cavitación se produce cuando la presión del agua es inferior a la presión de su vapor. Cuando esto ocurre, se forman burbujas de gas y la turbulencia provocada por éstas erosiona los materiales que entran en contacto con el agua. Puede ser necesario reparar los materiales deteriorados por medio de soldaduras o mediante reparación y reaplicación de los revestimientos de las superficies de acero y hormigón.

Si las estructuras de acero sufren corrosión también puede ser necesaria su reparación y la reaplicación de los revestimientos.

### Riesgos

Hay varios riesgos asociados a la generación de energía hidroeléctrica. Algunos de ellos son compartidos por todos los empleados que trabajan en la industria, mientras que otros sólo afectan a los que participan en actividades de mantenimiento eléctrico o mecánico. La mayoría de los riesgos que pueden producirse se resumen en las Tablas 76.1 y 76.2, donde también se indican las precauciones que deben tomarse.

### Efectos medioambientales

La generación de energía hidroeléctrica está considerada respetuosa con el medio ambiente. Por supuesto, las ventajas que ofrece a la sociedad en términos de suministro de energía y estabilización de los caudales de agua son muy importantes. Pero no deja de tener un coste ecológico, que en los últimos años ha sido objeto de un reconocimiento y una atención cada vez mayores por parte de la opinión pública. Por ejemplo, ahora se sabe que la inundación de grandes áreas de tierra y roca con agua ácida produce la lixiviación de los metales contenidos en las mismas. Se ha observado bioacumulación de mercurio en los peces capturados en aguas de estas áreas inundadas.

La inundación también modifica los patrones de turbulencia del agua así como el nivel de oxigenación. Ambas cosas pueden tener graves efectos ecológicos. Por ejemplo, en los ríos represados no puede tener lugar la migración de los salmones. Esta desaparición se debe, en parte, a que los peces no pueden localizar o atravesar el camino al nivel de agua superior. Además, el agua se parece más a la de un lago que a la de un río, y el agua estancada de un lago no es compatible con la migración del salmón.

La inundación también destruye el hábitat de los peces y puede dismantelar las zonas de cría de los insectos que sirven de alimento a los peces y otros organismos. En algunos casos, la inundación anega productivos terrenos agrícolas y forestales. La inundación de grandes áreas también ha provocado inquietud por el cambio climático y otros cambios del equilibrio ecológico. La retención de agua dulce cuyo destino era mezclarse con una masa de agua salada también plantea el problema de los posibles cambios de salinidad.

## GENERACION DE ENERGIA A PARTIR DE COMBUSTIBLES FOSILES

*Anthony W. Jackson*

El funcionamiento de las centrales termoeléctricas alimentadas con carbón comprende una serie de operaciones que pueden exponer a los trabajadores a lesiones traumáticas y a peligrosos agentes físicos y químicos. Es posible controlar estos riesgos con un buen diseño, una buena información de los trabajadores y la planificación del trabajo. Un buen diseño es la garantía de que

Tabla 76.1 • Control de las exposiciones a determinados riesgos químicos y biológicos en la generación de energía hidroeléctrica.

Exposición	Dónde puede producirse	Trabajadores afectados	Control
Polvo abrasivo (chorreo)	El polvo puede contener material de chorreo y polvo de pintura. La pintura aplicada antes de 1971 puede contener PCB.	Trabajadores de mantenimiento mecánico	Sistema de control del polvo Equipos de protección personal Protección respiratoria Medidas de higiene personal Vigilancia médica (según las circunstancias)
Amianto	Puede haber amianto en los frenos de los generadores, en los aislantes de tuberías y materiales eléctricos, revestimientos aplicables por rociado, cemento amiantado y otros productos; la exposición depende de la friabilidad y la proximidad de la fuente.	Trabajadores de mantenimiento eléctrico, trabajadores de mantenimiento mecánico	Adoptar las mejores prácticas actuales para tareas que requieran la utilización de productos con amianto. Equipos de protección personal Protección respiratoria Medidas de higiene personal Vigilancia médica (según las circunstancias)
Productos susceptibles de explosión en baterías	Un cortocircuito en los bornes de los bancos de baterías puede provocar explosión e incendio y exposición al líquido y los aerosoles del electrolito.	Trabajadores de mantenimiento eléctrico	Blindaje de los bornes de las baterías y de los conductores no aislados Prácticas y procedimientos que garanticen unas condiciones de trabajo seguras en torno a estos equipos
Productos de descomposición de revestimientos	Pueden producirse emisiones de: monóxido de carbono, pigmentos inorgánicos que contengan plomo y otros cromatos y productos de descomposición de las resinas de pintura. Los PCB se utilizaban como plastificantes antes de 1971. Los PCB pueden formar furanos y dioxinas, si se calientan.	Trabajadores de mantenimiento mecánico	Ventilación de extracción localizada Protección respiratoria Medidas de higiene personal Vigilancia médica (según la composición del revestimiento)
Cloro	Puede producirse exposición al cloro durante la conexión/desconexión de los cilindros de cloro de sistemas de tratamiento de aguas y aguas residuales.	Operadores	Seguir las directrices de la industria del cloro durante el trabajo con cilindros de cloro Mascarilla para escapes
Disolventes desengrasantes	El desengrase de los equipos eléctricos requiere disolventes con propiedades específicas de inflamabilidad, disolución y evaporación rápida sin dejar residuos; los disolventes con esas características son volátiles y pueden crear riesgos de inhalación.	Trabajadores de mantenimiento eléctrico	Ventilación de extracción localizada Equipos de protección personal Protección respiratoria
Humos de motores diesel	Se trata principalmente de emisiones de: dióxido de nitrógeno, óxido nítrico, monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxido de azufre y partículas que contienen hidrocarburos policíclicos (PAH) de los vehículos o motores que trabajan en la casa de máquinas.	Todos los trabajadores	Prohibir la circulación de automóviles y camiones en las naves. Sistema de extracción localizada para aspirar los humos en origen Convertidores catalíticos en los sistemas de escape
Restos de insectos	En las rápidas aguas que rodean la central se crían algunos insectos; tras el acoplamiento, los adultos mueren y los cadáveres se corrompen y secan; algunas personas desarrollan sensibilidad respiratoria alérgica a las sustancias que contiene el polvo.  Tras el desagüe, las larvas de insectos que viven en los canales de agua pueden intentar asentarse en el agua restante bajando por una especie de hilo que producen; algunas personas pueden desarrollar sensibilidad respiratoria alérgica al polvo resultante de la desecación de estos materiales.	Todos los trabajadores  Trabajadores de mantenimiento	Los insectos que pasan parte de su vida en aguas rápidas pierden su hábitat como consecuencia de la construcción de la central hidroeléctrica. Estos organismos pueden utilizar los canales de agua de la central como hábitat sustitutivo. El polvo de los restos secos puede provocar sensibilización alérgica. Entre las medidas de control cabría citar: Iluminación que no atraiga a insectos voladores Pantallas en ventanas, puertas y aberturas de la envolvente del edificio Limpieza por aspiración para eliminar los cadáveres
Aceites y lubricantes	Los devanados del rotor y del estator están cubiertos por aceites y fluidos hidráulicos; la descomposición de los hidrocarburos en contacto con superficies calientes puede producir hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH). La exposición puede producirse por inhalación y contacto cutáneo. Este último puede provocar dermatitis.	Trabajadores de mantenimiento eléctrico, trabajadores de mantenimiento mecánico	Equipos de protección personal (según las circunstancias)
Ozono	El ozono generado por chisporroteo en el rotor y otros equipos eléctricos puede plantear un problema de exposición dependiendo de la proximidad de la fuente.	Todos los trabajadores	Evitar el chisporroteo de los equipos eléctricos con un correcto mantenimiento.

Continúa en la página siguiente.

Figura 76.1 Control de las exposiciones a determinados riesgos químicos y biológicos en la generación de energía hidroeléctrica.

Continuación.

Exposición	Dónde puede producirse	Trabajadores afectados	Control
Vapores de las pinturas	Los aerosoles de pintura contienen pintura y diluyente pulverizados; el disolvente que contienen las gotitas y el vapor puede formar una mezcla inflamable; el sistema de resinas puede incluir isocianatos, epóxidos, aminas, peróxidos y otros intermediarios reactivos.  Existencia de vapores de disolventes en los almacenes y áreas de mezcla de pinturas, y en la cabina de pintura; durante la pulverización pueden producirse mezclas inflamables en el interior de espacios cerrados.	Personas asistentes, pintores	Cabina de pulverización de pintura Equipos de protección personal Protección respiratoria Medidas de higiene personal Vigilancia médica (según las circunstancias)
Difenilos policlorados (PCB)	Los PCB se utilizaron en los fluidos aislantes eléctricos hasta principios del decenio de 1970; todavía se encuentran los fluidos originales o sus residuos en cables, condensadores, transformadores u otros equipos; la exposición puede producirse por inhalación o contacto cutáneo. El fuego o el calor extremo durante el servicio pueden convertir los PCB en furanos y dioxinas.	Trabajadores de mantenimiento eléctrico	Equipos de protección personal Protección respiratoria Vigilancia médica (según las circunstancias)
Hexafluoruro de azufre y productos de descomposición	El hexafluoruro de azufre descompuesto por chisporroteo eléctrico da lugar a sustancias sólidas y gaseosas de toxicidad considerablemente superior.  La liberación de grandes cantidades de hexafluoruro de azufre en espacios del subsuelo puede crear una deficiencia de oxígeno al desplazar su atmósfera.	Trabajadores de mantenimiento eléctrico	Ventilación de extracción localizada Equipos de protección personal Protección respiratoria Vigilancia médica (según las circunstancias)
Vapores de soldadura	Cadmio, plomo y plata en la aleación de soldadura  Se trabaja principalmente con aceros al carbono y aceros inoxidable; también puede darse la soldadura de aluminio. Se requiere soldadura de recrecimiento para reparar la erosión provocada por la cavitación.  Las emisiones incluyen: gases de protección y fundentes, vapores metálicos, ozono, dióxido de nitrógeno, energía visible y ultravioleta.	Trabajadores de mantenimiento eléctrico  Trabajadores de mantenimiento mecánico	Ventilación de extracción localizada Equipos de protección personal Protección respiratoria Medidas de higiene personal Vigilancia médica (según la composición del metal base y del metal del hilo o varilla)

todos los componentes cumplen las normativas pertinentes de integridad y seguridad de funcionamiento. También de que la distribución de los equipos permite un manejo y mantenimiento de los mismos con seguridad gracias a un fácil acceso. Unos trabajadores bien informados son conscientes de los riesgos que pueden correr en el lugar de trabajo, lo que les permite elaborar planes para atajar los riesgos efectivamente encontrados. Dichos planes comprenden la identificación de los riesgos y la aplicación de los controles convenientes, que pueden consistir en una combinación de cortes de corriente, barreras físicas y equipos de protección personal. El análisis de la experiencia adquirida en materia de accidentes demuestra que las centrales modernas tienen un funcionamiento seguro en comparación con otras industrias mecánicas pesadas. Del personal que trabaja en las centrales, los empleados que sufren el mayor número de accidentes con baja laboral son los operarios de mantenimiento. Entre las lesiones más frecuentes se encuentran los esguinces y torceduras de los tejidos blandos del cuerpo, siendo las lesiones de espalda las más corrientes. También se observan enfermedades laborales asociadas a la exposición crónica al ruido y, ocasionalmente, al amianto.

El funcionamiento de una central eléctrica moderna puede dividirse en una serie de operaciones.

### Manipulación del carbón

Comprende la recepción del carbón (por transporte ferroviario o acuático) y su almacenamiento y posterior recuperación para alimentar los turbogeneradores. Para compactar las pilas de almacenamiento, operación necesaria para evitar incendios por combustión espontánea, se utiliza maquinaria pesada (traillas mecánicas y explanadoras). La manipulación posterior se realiza por medio de cintas transportadoras que van hasta la casa de máquinas. La exposición al polvo de carbón (que puede provocar neumoconiosis) se controla pulverizando agua sobre la pila de carbón y utilizando cabinas de control cerradas provistas de filtros para el polvo. Ciertas tareas en que se producen altos niveles de polvo de carbón requieren el uso de protección respiratoria de gran eficacia en la absorción de partículas. La mayoría de los trabajadores de este ámbito laboral se ven expuestos a niveles de ruido superiores a 85 dBA (capaces de provocar pérdidas auditivas), que deben controlarse con orejeras y tapones para los oídos y aplicando un programa de conservación de la capacidad auditiva.

En esta parte de la planta se producen varios riesgos convencionales en materia de seguridad. El trabajo cerca del agua exige una cuidadosa atención a los procedimientos y el empleo de chalecos salvavidas. La conducción nocturna de maquinaria

Tabla 76.2 • Control de las exposiciones a determinados riesgos físicos y en materia de seguridad en la generación de energía hidroeléctrica.

Exposición	Dónde puede producirse	Trabajadores afectados	Control
Posturas de trabajo incómodas	El trabajo prolongado en una postura incómoda puede provocar lesiones musculoesqueléticas. Hay peligro de caída alrededor de fosos y aberturas en estructuras.	Todos los trabajadores	Equipos diseñados de acuerdo con principios ergonómicos Formación en acondicionamiento muscular, levantamiento de pesos y atención lumbar Elección de prácticas laborales que minimicen la incidencia de las lesiones musculoesqueléticas
Espacios confinados	La presa, las estructuras de control, las compuertas de control, los canales de conducción de aguas y la maquinaria de turbinas y generadores contienen muchos fosos, sumideros, tanques y otros espacios parcialmente cerrados que pueden tener deficiencia de oxígeno, encerrar ambientes peligrosos, o crear otras condiciones peligrosas.	Todos los trabajadores	Sistemas analizadores del aire Sistemas de ventilación portátiles Equipos de protección personal Protección respiratoria
Ahogamiento	Pueden producirse ahogamientos por caída a las rápidas aguas del depósito de carga (zona de admisión) o del canal de desagüe (zona de descarga) u otra zona. En las latitudes más altas el agua está extremadamente fría durante los meses de primavera, otoño e invierno.	Todos los trabajadores	Barreras de seguridad personal Sistemas anticaídas Chalecos salvavidas
Electrocución	Ciertas zonas de la central contienen conductores con tensión y sin aislar; los equipos que contienen conductores aislados pueden activarse al quitar el aislamiento. La entrada deliberada en zonas no autorizadas o el fallo accidental de los sistemas de protección conlleva un riesgo de electrocución.	Todos los trabajadores	Adoptar prácticas y procedimientos que garanticen determinadas condiciones de seguridad en el trabajo con equipos eléctricos.
Campos electromagnéticos (incluidas radiofrecuencias)	Los generadores y otros equipos eléctricos producen campos de C.A. de 60 Hz (o más) y C.C.; la exposición depende de la proximidad de la fuente y del aislamiento que ofrezcan las estructuras. Los campos magnéticos son especialmente difíciles de atenuar con aislamiento. Todavía no se ha establecido la importancia de la exposición.  Radiofrecuencias: no se han establecido plenamente sus efectos sobre los seres humanos.	Todos los trabajadores	No se ha determinado el riesgo por debajo de los límites actuales
Calor	Los generadores producen un calor considerable; los generadores e intercambiadores de calor pueden descargar el aire caliente a la casa de máquinas; la estructura de la casa de máquinas puede absorber e irradiar la energía solar al interior del edificio; pueden producirse lesiones por calor durante los meses más cálidos, en función del clima y del esfuerzo realizado.	Trabajadores de interiores	Desvío del aire caliente hacia el techo, aislamiento, controles técnicos Bebidas de reposición del electrolito Equipos de protección personal
Ruido	El ruido constante de los generadores y otros equipos y actividades puede rebasar los límites legales; los disyuntores de aire comprimido producen muy altos niveles de ruido de impacto y pueden descargar en cualquier momento.	Todos los trabajadores	Aplicar tecnologías de control del ruido. Protección auditiva personal
Turnos de trabajo	El trabajo por turnos puede provocar estrés fisiológico y psicosocial; éste último puede ser especialmente grave para las pequeñas plantillas empleadas en las comunidades pequeñas y aisladas donde tienden a ubicarse estas operaciones.	Operadores	Adoptar planes de trabajo que reflejen los conocimientos actuales sobre los ritmos circadianos.
Vibración, manos y brazos	La vibración producida por las herramientas mecánicas de mano y las máquinas portátiles se transmite a través de las empuñaduras.	Trabajadores de mantenimiento eléctrico, trabajadores de mantenimiento mecánico	Utilizar herramientas que cumplan las normas vigentes sobre vibración en manos y brazos. Guantes antivibración.
Vibración, todo el cuerpo	La vibración soportada por las estructuras y originada por el movimiento giratorio de los generadores y la turbulencia de las aguas se transmite a través de paredes y suelos.	Todos los trabajadores	Supervisar y mantener los equipos giratorios para minimizar la vibración.
Aparatos de visualización	La eficacia de los puestos de trabajo informatizados depende de la aplicación de principios ergonómicos visuales y ofimáticos.	Trabajadores de oficinas (personal directivo, administrativo y técnico)	Aplicar los principios ergonómicos ofimáticos a la selección y utilización de los aparatos de vídeo
Problemas relacionados con el clima	La energía ultravioleta puede provocar quemaduras solares, cáncer de piel y cataratas. El frío puede producir estrés por frío y congelación. El calor puede producir estrés por calor.	Trabajadores al aire libre	Ropa de trabajo que proteja contra el frío Ropa de trabajo que proteja contra la radiación solar Protección ocular contra la radiación solar Liciones de protección solar (bajo asesoramiento médico para uso prolongado)

pesada por encima de pilas de almacenamiento irregulares requiere un buen alumbrado, mientras que la mejor manera de controlar los riesgos derivados de las tareas manuales de despeje de las rampas de carbón (que tienden a bloquearse, especialmente en inviernos duros) es instalar cubiertas desmontables en las rampas, que permiten un fácil acceso. El manejo y mantenimiento de amplios sistemas transportadores exige la instalación de defensas en las poleas motrices y poleas de retorno, tensores y otros puntos donde es fácil engancharse.

### Funcionamiento de una turbina-caldera

El funcionamiento de una turbina-caldera de alta presión requiere una rigurosa serie de controles que garanticen la seguridad de su manejo. Dichos controles abarcan la integridad física del equipo y la habilidad, conocimientos y experiencia de los operarios. Para asegurar la integridad de los componentes de alta presión se combinan las especificaciones de las modernas normas técnicas con inspecciones rutinarias de las juntas soldadas por medio de técnicas visuales y técnicas no destructivas de formación de imágenes (rayos X y métodos fluoroscópicos). Además, las válvulas de seguridad, que se comprueban regularmente, impiden la acumulación de un exceso de presión en la caldera. Para proporcionar al personal los conocimientos y cualificaciones necesarios puede establecerse un proceso interno de formación, unido a la acreditación gubernativa, a lo largo de varios años.

El entorno de la casa de máquinas consiste en un conjunto de complejos sistemas diseñados técnicamente para transportar combustible, aire de combustión, agua de calderas desmineralizada y agua de enfriamiento para la caldera. Además de los riesgos derivados del vapor a alta presión, existen otros riesgos convencionales y físicos/químicos que deben conocerse y controlarse. Durante el funcionamiento, el riesgo más generalizado es el ruido. Los estudios demuestran que todo el personal de operación y mantenimiento soporta una exposición media ponderada en el tiempo de más de 85 dBA, que requiere el empleo de protecciones auditivas (tapones u orejeras) en gran parte de la casa de máquinas y la realización de exámenes audiométricos periódicos para evitar el deterioro del oído. Entre las principales fuentes de ruido cabe citar los pulverizadores de carbón, el turbogenerador y los compresores de aire para servicio de la central. Los niveles de polvo existentes en la casa de máquinas durante el funcionamiento dependen del estado de conservación del aislamiento térmico. Esto es especialmente importante por cuanto los aislantes antiguos contienen altos niveles de amianto. Con un cuidadoso mantenimiento de los controles (principalmente mediante encolado y retención del aislamiento deteriorado) se consigue que las concentraciones de amianto en el aire sean indetectables ( $<0,01$  fibras/cm<sup>3</sup>).

La fase final del proceso operativo que crea posibles riesgos es la recogida y manipulación de las cenizas. Para recoger las cenizas se utilizan grandes precipitadores electrostáticos, habitualmente situados fuera de la casa de máquinas, aunque en los últimos años cada vez se utilizan más los filtros textiles. En ambos casos, las cenizas se extraen de los gases de combustión y se conservan en silos de almacenamiento. El polvo es inherente a todos los procesos de manipulación posteriores, a pesar de los esfuerzos de diseño técnico realizados para controlar su nivel. Este tipo de ceniza (que son cenizas volantes, frente a las cenizas de sedimentación acumuladas en el fondo de la caldera) contiene una parte significativa (entre un 30 y un 50 %) de partículas respirables y constituye por tanto un posible problema por sus efectos para la salud de los trabajadores expuestos. Dos de los componentes de estas cenizas pueden ser relevantes: la sílice cristalina, asociada a la silicosis y posiblemente al cáncer de pulmón, y el arsénico, asociado al cáncer de piel y de pulmón. En ambos casos es necesario realizar evaluaciones de exposición

para determinar si se sobrepasan los límites normativos y si se precisan programas de control específicos. Dichas evaluaciones, que incluirán la realización de estudios con muestreos personales, deberán abarcar a todos los trabajadores que puedan verse afectados, incluidos los que queden expuestos durante las inspecciones de los sistemas de acumulación de polvo y de las superficies de rectificado y calentamiento de la caldera, donde es sabido que se deposita arsénico. Los programas de control, en caso necesario, deberán comprender la información a los trabajadores sobre la importancia de evitar la ingestión de cenizas (no comer, beber ni fumar en las zonas de manipulación de cenizas) y la necesidad de lavarse minuciosamente después de estar en contacto con ellas. Los niveles de polvo encontrados en estos estudios suelen indicar la existencia de unas buenas prácticas de seguridad y de un programa de control respiratorio de la exposición al polvo peligroso. Por ejemplo, la base de datos de mortalidad laboral que mantiene el Instituto Nacional para la Salud y la Seguridad en el Trabajo (NIOSH) no tiene registrados fallecimientos imputables a la exposición a sílice o arsénico en la industria eléctrica norteamericana.

### Mantenimiento

Durante la fase de mantenimiento es cuando se produce la máxima exposición a los agentes convencionales y físicos/químicos. Dada la complejidad de las modernas centrales eléctricas, es crucial disponer de un proceso eficaz de aislamiento de los equipos, de modo que no reciban corriente eléctrica mientras se estén realizando reparaciones. Normalmente, se aplica un sistema controlado de bloqueos y etiquetas identificativas.

Durante el mantenimiento puede producirse un amplio abanico de riesgos convencionales, entre los que cabe citar:

- trabajos de altura (protección anticaídas);
- estrés térmico;
- grúas y aparejos (seguridad de carga);
- trabajo en espacios confinados (riesgos ambientales y convencionales);
- excavaciones (desplome de zanjas);
- trabajos/levantamiento de objetos en lugares estrechos (esguinces y torceduras).

En todos los casos, es posible controlar los riesgos aplicando un proceso de análisis gradual que identifique los mismos y los controles correspondientes.

En las actividades rutinarias de mantenimiento se utilizan muchos productos comerciales peligrosos. El amianto es corriente, pues ha sido muy utilizado como aislante térmico y es un componente de numerosos productos comerciales. Hay que implantar procesos de control que garanticen una correcta identificación de todos los materiales que incorporen amianto por medio de un análisis microscópico (la posibilidad de efectuar este análisis en el propio lugar mejora enormemente el tiempo de respuesta). Los métodos específicos de control utilizados para este fin dependerán de la escala de la actividad. En operaciones a gran escala, será necesario construir recintos de trabajo a presión ligeramente reducida (para evitar fugas), equipar a los trabajadores con protecciones respiratorias y seguir cuidadosos procedimientos que eviten la contaminación exterior. En todos los casos, los materiales que contengan amianto deberán mojarse por completo e introducirse en bolsas etiquetadas para su eliminación. Hay que realizar atentas inspecciones para eliminar todo el amianto antes de seguir adelante. Deberán registrarse las exposiciones de los trabajadores y se realizarán radiografías pectorales periódicas junto con pruebas de capacidad pulmonar para detectar el inicio de cualquier enfermedad. Si los exámenes dan positivo, el trabajador deberá ser inmediatamente apartado de nuevas exposiciones. Las prácticas actuales

reflejan una gran preocupación por la exposición al amianto en la industria eléctrica.

Con respecto a la gran mayoría de los demás materiales peligrosos que se utilizan en el lugar de trabajo, las cantidades presentes son pequeñas y su uso infrecuente, de modo que su repercusión total es insignificante. Las exposiciones más importantes a materiales peligrosos se asocian más a operaciones concretas que a productos determinados.

Por ejemplo, la soldadura es una actividad corriente que puede dar lugar a una serie de posibles efectos perjudiciales para la salud. La exposición a la luz ultravioleta del arco provoca ceguera temporal y grave irritación ocular ("ojo de arco"); la inhalación de vapores de óxidos metálicos puede causar la "fiebre de los vapores metálicos"; y los óxidos de nitrógeno y el ozono formados a las altas temperaturas del arco pueden ocasionar neumonía química y posibles problemas respiratorios crónicos. Entre los controles aplicables cabe citar las viseras de protección contra la luz dispersa para los trabajadores que se encuentren en las proximidades, la ventilación de extracción localizada o la protección respiratoria (por medio de una mascarilla con filtro de aire).

Una actividad corriente parecida es el rectificado y el chorreo abrasivo, donde lo preocupante es la inhalación de óxido metálico respirable y de partículas abrasivas. Tal posibilidad suele controlarse mediante la elección del agente abrasivo (actualmente se ha abandonado la arena en favor de agentes más benignos, como las cáscaras vegetales) y la instalación de una ventilación de extracción localizada de la potencia adecuada.

Otra actividad que da lugar a exposiciones significativas es la aplicación de revestimientos protectores a superficies metálicas. Dichos revestimientos pueden contener disolventes que se liberan a la atmósfera de trabajo. La exposición de los trabajadores puede controlarse por medio de una ventilación de extracción localizada o bien, si eso no fuera práctico, por medio de una protección respiratoria.

## ● GENERACION DE ENERGIA NUCLEAR

*W.G. Morison*

En todos los reactores nucleares, la energía se libera por fisión de los núcleos de los átomos del combustible en una reacción en cadena. El combustible nuclear más habitual es el uranio 235. Cada átomo de combustible fisionado da lugar a dos nuevos átomos —productos de fisión— y los neutrones expulsados de su núcleo provocan nuevas fisiones de átomos. Los productos de fisión transportan la mayor parte de la energía liberada por ésta, que se transforma a su vez en energía térmica cuando los átomos de combustible adyacentes reducen la gran velocidad de los productos de fisión y absorben su radiación. Los neutrones transportan alrededor del 3 % de la energía de fisión.

Para evitar que el núcleo del reactor se caliente demasiado, se utiliza un refrigerante líquido o gaseoso, que también produce el vapor (ya sea directa o indirectamente) que impulsa la turbina. A fin de mantener la reacción de fisión a la velocidad deseada por el operador de la central eléctrica, se insertan en el núcleo del reactor barras de control fabricadas con materiales capaces de absorber neutrones. En los reactores de agua a presión, los materiales absorbentes pueden colocarse disueltos en el refrigerante.

La mayoría de los productos de fisión son inestables y, por consiguiente, radiactivos. Estos productos se desintegran, liberando una radiación a una velocidad característica del elemento de cada producto de fisión, así como un nuevo producto que también puede ser radiactivo. Esta secuencia de desintegración

continúa hasta que se liberan productos estables (no radiactivos). En el reactor se forman otros productos radiactivos por absorción de neutrones en el núcleo de los átomos de materiales no fisibles, como el uranio 238, y materiales estructurales, como guías, soportes y camisas de combustible.

En reactores que han estado en funcionamiento durante cierto tiempo, la desintegración de los productos de fisión y la creación de nuevos productos de fisión alcanza un cuasiequilibrio. En este punto, la radiación y la producción de energía resultante de la desintegración de los productos radiactivos es casi una décima parte de toda la que se produce en el reactor.

De esta gran cantidad de material radiactivo se derivan los riesgos específicos de las centrales nucleares. En condiciones de funcionamiento, la mayoría de los materiales radiactivos se comportan como sólidos, pero algunos lo hacen como gases, o se volatilizan a la alta temperatura del reactor. Así, podrían ser fácilmente absorbidos por los organismos vivos y afectar a sus procesos biológicos. Son peligrosos, por tanto, si se liberan o se dispersan en el medio ambiente.

### Tipos de centrales nucleares y características

Los reactores térmicos utilizan materiales llamados *moderadores* para controlar la producción rápida de neutrones producidos por la fisión, de modo que puedan ser capturados más fácilmente por los átomos del uranio 235. El moderador más utilizado es el agua normal. Otros son el grafito y el deuterio, un isótopo del hidrógeno, que se emplea en forma de óxido de deuterio, también llamado agua pesada. El principal componente del agua normal es óxido de hidrógeno y contiene una pequeña proporción (0,015 %) de agua pesada.

El combustible se enfría por medio de un refrigerante, que directa o indirectamente produce el vapor que impulsa la turbina y controla además la temperatura del núcleo del reactor, evitando que se caliente en exceso y se deteriore el combustible o los materiales estructurales. Entre los refrigerantes de uso corriente en los reactores térmicos cabe citar el agua normal, el agua pesada y el dióxido de carbono. El agua tiene buenas características de transferencia térmica (alto calor específico, baja viscosidad, fácil bombeo) y es el refrigerante más utilizado en las centrales nucleares. La refrigeración de un reactor con agua a presión o en ebullición permite alcanzar importantes densidades de energía en el núcleo, de modo que pueden construirse grandes unidades de potencia en reactores de vasija relativamente pequeña. Sin embargo, si el sistema refrigerante del reactor utiliza agua, debe funcionar a alta presión para que el vapor alcance presiones y temperaturas útiles para el eficiente funcionamiento del turbogenerador de vapor. Por consiguiente, la integridad del contorno del sistema refrigerante del reactor es muy importante en todas las centrales nucleares refrigeradas con agua, ya que constituye una barrera de seguridad que protege a los trabajadores, a la población y al medio ambiente.

El combustible utilizado en todos los reactores refrigerados por agua, y en la mayoría de los demás, es dióxido de uranio cerámico con camisa metálica (de acero inoxidable o de una aleación de zirconio). El dióxido de uranio sinterizado es un combustible ininflamable que puede rendir durante largos períodos de tiempo y conservar sus productos de fisión a altas temperaturas sin deformarse significativamente ni romperse. Los únicos reactores térmicos operativos que utilizan un combustible distinto del dióxido de uranio son las centrales Magnox (refrigeradas con dióxido de carbono), y están siendo gradualmente retiradas de servicio a medida que alcanzan el final de su vida útil.

Los materiales absorbentes de neutrones (como el boro, el cadmio, el hafnio y el gadolinio) utilizados en varias formas, como barras de control con camisa de acero o disueltos en los



refrigerantes o moderadores, pueden introducirse y retirarse del núcleo del reactor para controlar la velocidad de la reacción de fisión. Contrariamente a lo que ocurre con la generación de energía a partir de combustibles fósiles, no es necesario aumentar la cantidad de combustible para aumentar la energía producida en una reacción de fisión en cadena.

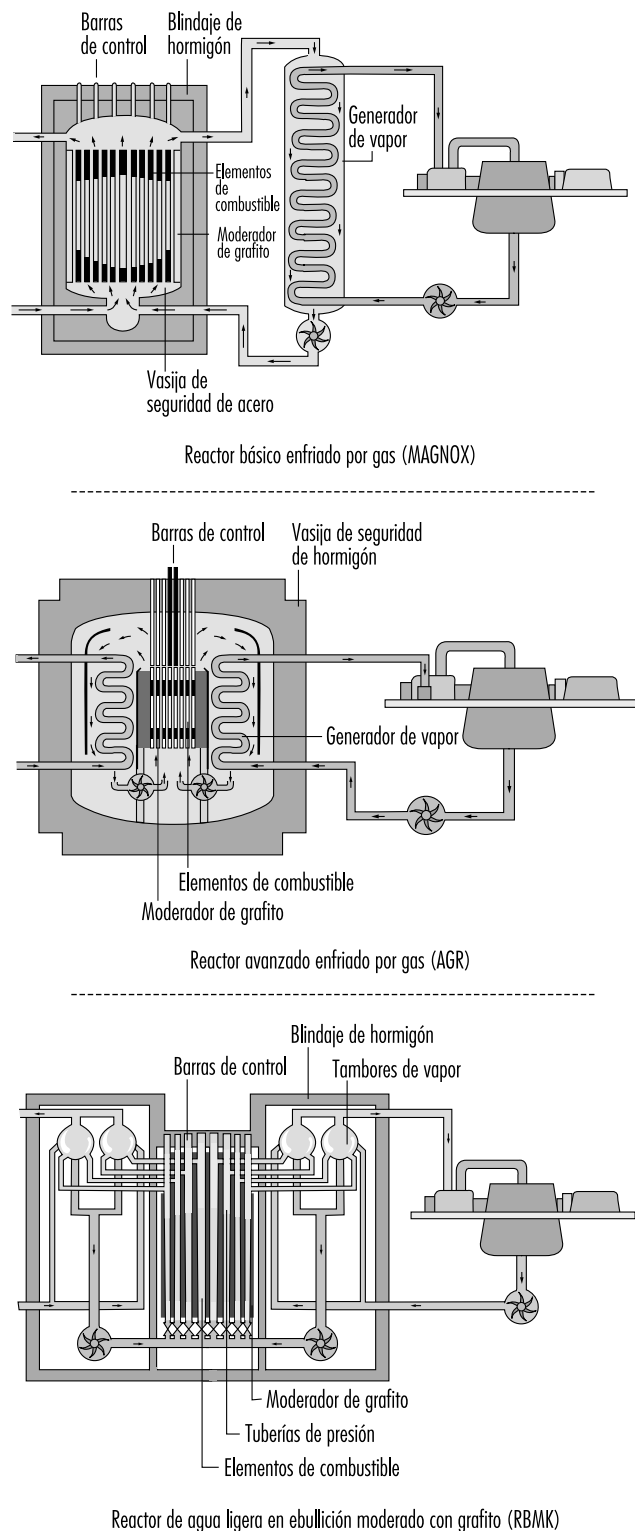
Una vez iniciado un aumento en el ritmo de producción de energía por fisión, se mantendrá hasta que se detenga insertando en el núcleo la cantidad apropiada de materiales absorbentes de neutrones y de moderador. Este aumento de potencia se debe a un exceso de neutrones en la reacción de fisión en cadena con respecto a los necesarios para conseguir una reacción en cadena crítica. Por consiguiente, la velocidad de fisión y la consiguiente producción de energía pueden controlarse agregando o retirando cantidades muy pequeñas de materiales absorbentes de neutrones. Si se requiere una reducción brusca de la potencia, se inyecta en el núcleo una cantidad relativamente importante de material absorbente de neutrones. Cada tipo de reactor tiene sus propias características de reactividad, que determinan el diseño de los mecanismos absorbentes de neutrones que permitirán controlar eficazmente la potencia y parar el reactor de forma rápida y segura cuando sea necesario. Sin embargo, los mismos principios básicos de control y seguridad son aplicables a todos ellos.

En la Figura 76.1 se ilustran los tipos de reactores térmicos actualmente en servicio, y en la Tabla 76.3, sus principales características. En las ilustraciones simplificadas de la Figura 76.1, se representan blindajes de hormigón en torno a los reactores y los sistemas refrigerantes primarios. Estos blindajes, que adoptan diversos diseños, protegen de la radiación directa del reactor y también actúan como contención de posibles fugas de los sistemas moderadores o refrigerantes; en general, están diseñados para soportar las elevadas presiones que se generarían si se produjese una avería grave en los sistemas refrigerantes.

En una central nuclear con *reactor de agua a presión (PWR: pressurized water reactor)*, el moderador y el refrigerante primario son el mismo material —agua normal depurada—, que está separada del circuito secundario de vapor/agua de alimentación por un contorno metálico en generadores de vapor (a veces llamados calderas), a través del cual se transfiere el calor por conducción. Por consiguiente, el vapor alimentado al turbogenerador no es radiactivo y el turbogenerador de vapor puede funcionar como una central eléctrica convencional. Como el hidrógeno del agua moderadora/refrigerante primaria absorbe una parte importante de los neutrones, es necesario someter el combustible al proceso denominado enriquecimiento isotópico, que consiste en incrementar el contenido del isótopo fisible (uranio 235) hasta alcanzar entre un 2 % y un 5 %, a fin de mantener una reacción en cadena práctica para la producción de energía a largo plazo.

En todas las centrales nucleares dotadas de *reactores de agua pesada a presión (PHWR: pressurized heavy water reactors)*, el moderador y el refrigerante primario son agua pesada con un contenido isotópico de deuterio muy alto (>99%). En el *PHWR CANDU*, que es prácticamente el único tipo de PHWR en funcionamiento, el moderador está separado del refrigerante primario y se mantiene a una temperatura y presión relativamente bajas, siendo éste un ambiente adecuado para ubicar la instrumentación de control y vigilancia, así como una instalación refrigerante de reserva integrada por si se produce una avería en las tuberías de refrigerante primario. En el CANDU, el combustible y el refrigerante primario circulan por tuberías de presión horizontales en el núcleo del reactor. Al igual que en los PWR, el circuito de refrigerante primario está separado del circuito secundario de vapor/agua de alimentación por un

Figura 76.1 • Tipos de centrales nucleares.



Fuente: Uranium Institute 1988.

contorno metálico en generadores de vapor, a través del cual se transfiere el calor desde el agua pesada primaria al sistema de vapor/agua de alimentación de agua normal. Por consiguiente,

Tabla 76.3 • Características de las centrales nucleares (1997).

Tipo de reactor	Combustible	Moderador	Refrigerante y presión aprox. (en bar)	Generación de vapor	Nº de unidades operativas	Producción neta (MWe)
PWR	Dióxido de uranio enriquecido (2 % a 5 % U 235)	Agua ligera	Agua ligera (160 bar)	Indirecta	251	223.717
PHWR (tipo CANDU)	Dióxido de uranio no enriquecido (0,71 % U 235)	Agua pesada	Agua pesada (90 bar)	Indirecta	34	18.927
BWR	Dióxido de uranio enriquecido (2 % a 3 % U 235)	Agua ligera	El agua ligera hierve en el núcleo (70 bar)	Directa	93	78.549
GCR (tipo MAGNOX)	Metal de uranio no enriquecido (0,71 % U 235)	Grafito	Dióxido de carbono (20 bar)	Indirecta	21	3.519
AGR	Dióxido de uranio enriquecido (2,3 % U 235)	Grafito	Dióxido de carbono (40 bar)	Indirecta	14	8.448
LWGR (tipo RBMK)	Dióxido de uranio enriquecido (2 % a 2,5 % U 235)	Grafito	El agua ligera hierve en el núcleo (70 bar)	Directa	18	13.644
FBR	Oxidos de plutonio	Ninguno	Sodio (10 bar)	Indirecta	3	928

el vapor alimentado al turbogenerador es de agua normal, no radiactivo (excepto por pequeñas fugas) y el turbogenerador puede funcionar como una central térmica convencional. El agua pesada moderadora y refrigerante absorbe sólo una parte muy pequeña de los neutrones generados durante la fisión, lo que permite mantener una reacción en cadena práctica para la producción de energía a largo plazo utilizando uranio natural (0,071 % de uranio 235). Los PHWR existentes pueden funcionar con combustible de uranio 235 ligeramente enriquecido, con lo que se consigue que la energía total extraída del combustible sea proporcionalmente mayor.

En una central nuclear con *reactor de agua en ebullición (BWR: boiling water reactor)*, el agua refrigerante primaria se evapora parcialmente en el propio núcleo del reactor, y el vapor generado se alimenta directamente al turbogenerador. La presión de trabajo en el reactor es inferior a la existente en los PWR, pero la presión del vapor alimentado a la turbina es similar. Este último es ligeramente radiactivo, lo que impone algunas precauciones por la posibilidad de que se produzca una contaminación de bajo nivel en el sistema de agua de alimentación o en la turbina. Sin embargo, no se ha demostrado que sea un factor importante a tener en cuenta en el funcionamiento y el mantenimiento de los BWR. En la potencia de estos reactores influye la cantidad de vapor existente en el núcleo, lo que ha de compensarse mediante un control adecuado del caudal de refrigerante o inserciones de reactividad al modificar el nivel de potencia del reactor.

Los *reactores Magnox*, también conocidos como *reactores refrigerados con gas (GCR: gas cooled reactors)*, son alimentados con uranio natural con camisa de magnesio. Se refrigeran con dióxido de carbono a presión moderada, pero generan vapor a temperatura relativamente alta, con lo que se obtiene una buena eficiencia térmica. Tienen grandes núcleos con baja densidad de energía, de modo que las vasijas, que actúan además como única estructura de seguridad, también son grandes. Las de los primeros reactores Magnox eran de acero; las de los últimos, de hormigón pretensado, y contenían tanto el núcleo del reactor como los intercambiadores de calor generadores de vapor.

Los *reactores avanzados refrigerados con gas (AGR: advanced gas-cooled reactors)* utilizan combustible de óxido de uranio enriquecido

(2,3 % <sup>235</sup>U). Se refrigeran con dióxido de carbono a una presión más elevada que en los reactores Magnox y presentan una eficiencia y transferencia térmica mejores. La mayor densidad de energía en el núcleo de estos reactores en comparación con los Magnox permite que el reactor AGR sea más pequeño y potente. La vasija de hormigón pretensado, que contiene tanto el núcleo del reactor como los intercambiadores de calor que generan el vapor, actúa además como estructura de seguridad.

Los *reactores refrigerados con agua ligera y moderados con grafito (LWGR: light water graphite reactors)* son un híbrido de varios sistemas de energía nuclear. Las únicas centrales eléctricas de este tipo que funcionan en la actualidad son los reactores RBMK ubicados en la antigua Unión Soviética, en concreto en Rusia, Ucrania y Lituania. En los reactores RBMK, el agua refrigerante normal asciende por canales (tuberías) de refrigeración verticales que contienen el combustible y entra en ebullición en el interior del núcleo. El vapor producido en el núcleo se alimenta directamente al turbogenerador, igual que en un BWR. El grafito moderador que rodea los canales de refrigeración se encuentra a una temperatura de trabajo suficientemente superior a la del refrigerante, de modo que el calor generado en el grafito por la moderación de los neutrones es eliminado por los canales de refrigeración. Los reactores RBMK son de gran tamaño y tienen muchos canales de refrigeración (>1.500).

Los *reactores reproductores de neutrones rápidos (FBR: fast-breeder reactors)* necesitan material fisible enriquecido del orden de un 20 % y mantienen la reacción de fisión en cadena principalmente absorbiendo los neutrones rápidos producidos en el proceso de fisión. Estos reactores no necesitan un moderador para lentificar los neutrones y pueden utilizar los neutrones sobrantes para criar plutonio 239, potencialmente útil como combustible para reactores. Pueden producir más combustible del que consumen. Aunque se han construido varios reactores de este tipo para producir electricidad en nueve países de todo el mundo, las dificultades técnicas y prácticas relacionadas con el uso de refrigerantes metálicos líquidos (sodio) y con su altísimo consumo calorífico han provocado una pérdida de interés. Actualmente, sólo hay tres o cuatro *reactores de neutrones rápidos refrigerados con metal líquido (LMFBR: liquid metal fast breeder reactors)* en

funcionamiento en todo el mundo, que producen en total menos de 1.000 megawattios de electricidad (MWe), y que se están poniendo fuera de servicio gradualmente. Sin embargo, el desarrollo de la tecnología de los reactores de neutrones rápidos ha sido considerable y la documentación existente permitiría utilizarlos en el futuro si fuera necesario.

### Los combustibles y su manipulación

El proceso que comienza con la extracción del mineral de uranio y termina con la eliminación final del combustible usado y todos sus residuos se conoce con el nombre de *ciclo de combustible nuclear*. Hay muchas variaciones en los ciclos de combustible dependiendo del tipo de reactor de que se trate y del diseño de las medidas de eliminación del calor en el núcleo.

Los ciclos de combustible básicos de los reactores PWR y BWR son casi idénticos, diferenciándose solamente por los niveles de enriquecimiento y por el diseño detallado de los elementos combustibles. Las etapas que comprende, habitualmente en diferentes lugares e instalaciones, son las siguientes:

- extracción y trituración del uranio para producir un óxido de uranio ( $U_3O_8$ );
- transformación del uranio en hexafluoruro de uranio ( $UF_6$ );
- enriquecimiento;
- fabricación del combustible, que comporta la transformación del uranio en dióxido de uranio ( $UO_2$ ), la producción de gránulos de combustible, la fabricación de barras de combustible de longitud igual a la altura del núcleo del reactor, y la fabricación de montajes de combustible compuestos de unas 200 barras de combustible por montaje dispuestas en cuadro;
- instalación y servicio en una central nuclear;
- reprocesado o almacenamiento temporal;
- envío del combustible usado o de los residuos del enriquecimiento a un depósito federal/centralizado;
- eliminación eventual, que todavía está en fase de desarrollo.

Durante estos procesos hay que tomar precauciones para asegurarse de que la cantidad de combustible enriquecido presente en un determinado lugar sea inferior a la que podría provocar una reacción de fisión en cadena importante, excepto, por supuesto, en el reactor. Esto impone restricciones de espacio para los materiales en las fases de fabricación, expedición y almacenamiento.

En cambio, el reactor CANDU utiliza uranio natural y su ciclo de combustible desde la extracción del mineral hasta la eliminación del combustible es muy sencillo, ya que no incluye fases de enriquecimiento y reprocesado. El combustible para el CANDU se fabrica de forma semiautomática en mazos redondos y de medio metro de largo integrados por 28 ó 37 barras de combustible que contienen gránulos de  $UO_2$ . No hay limitaciones de espacio para la fabricación de combustible de uranio natural ni para el envío o almacenamiento de combustible nuevo o usado. La inmovilización y eliminación de combustible usado del CANDU se está desarrollando desde hace 17 años en Canadá, y en la actualidad se encuentra en fase de aprobación del concepto.

En todos los reactores de potencia operativos, con excepción del Magnox, el componente básico del combustible del reactor es el gránulo cilíndrico de combustible, compuesto de dióxido de uranio ( $UO_2$ ) en polvo compactado y sinterizado para obtener las características cerámicas y de densidad necesarias. Estos gránulos sinterizados, que van sellados en tubos sin costuras de acero inoxidable o de una aleación de zirconio formando los *elementos o barras de combustible*, son químicamente inertes con respecto a su material de encamisado a las temperaturas y presiones normales en el reactor. Aunque la camisa se deteriore

o se raje y el refrigerante entre en contacto con el  $UO_2$ , este material cerámico retendrá la mayoría de los productos de fisión radiactivos y resistirá el deterioro provocado por el agua a elevada temperatura.

Los reactores Magnox utilizan combustible de uranio natural con camisa de magnesio y trabajan perfectamente a temperaturas relativamente altas, porque el refrigerante (dióxido de carbono) no reacciona con estos metales en seco.

El objetivo básico del diseño de las barras de combustible de un reactor nuclear es transferir el calor generado por la fisión al refrigerante, manteniendo al mismo tiempo la integridad de las barras incluso en las condiciones transitorias más severas. La realización de vastas pruebas de laboratorio en materia de transferencia térmica con combustible simulado para aplicaciones en todo tipo de reactores operativos ha demostrado que un combustible de diseño específico y autorizado puede resistir con márgenes de seguridad adecuados a la máximas condiciones previstas de calor transitorio en el reactor.

El combustible nuevo que llega a la central eléctrica procedente de la fábrica productora no es significativamente radiactivo y puede manipularse manualmente o con herramientas de elevación/manipulación de manejo manual, sin necesidad de protección. Un *montaje de combustible* típico para un reactor PWR o BWR consiste en unas 200 barras de combustible dispuestas en cuadro, de unos 4 m de largo, con un peso aproximado de 450 kg. Un reactor PWR o BWR de gran tamaño necesita alrededor de 200 montajes de estos. El combustible se manipula por medio de un puente-grúa y se coloca en estanterías verticales en seco en el almacén de combustible nuevo. Todas las operaciones de instalación de combustible nuevo en un reactor de agua ligera en servicio, como un PWR o BWR, se realizan bajo el agua, a profundidad suficiente para proteger a cualquier persona que pueda encontrarse por encima del reactor. Primero debe quitarse la tapa embreadada de la vasija del reactor y retirar parte del combustible usado (en general, entre un tercio y la mitad del núcleo del reactor) usando el puente-grúa y el montacargas de manipulación de combustible. El combustible usado se deposita en bahías de almacenamiento llenas de agua. Puede ser necesario reorganizar los demás montajes de combustible usado del núcleo (generalmente moviéndolos hacia el centro del núcleo) para conformar la producción de energía en el reactor. Después, se instalan los montajes nuevos en los lugares vacantes. La recarga de un reactor de gran tamaño puede requerir de 2 a 6 semanas, dependiendo de los trabajadores disponibles y de la cantidad de combustible que haya que reemplazar.

El reactor CANDU y algunos reactores refrigerados con gas se recargan en funcionamiento utilizando equipos con control remoto que retiran el combustible usado e introducen los mazos o elementos de combustible nuevo. En el caso del CANDU, el combustible consiste en mazos de barras de combustible de medio metro de largo, aproximadamente 10 cm de diámetro y alrededor de 24 kg de peso. El combustible se recibe de fábrica en cajas de embalaje de cartón y se deposita en el almacén de combustible nuevo, listo para cargarlo al reactor. Los reactores en servicio suelen recargarse diariamente para mantener su reactividad. En un reactor CANDU de gran tamaño, la recarga normal es de 12 mazos diarios. Los mazos se colocan manualmente en un mecanismo de carga de combustible que, a su vez, los introduce en una *máquina de recarga* manejada a distancia desde la sala de control de la central. Para cargar combustible nuevo en el reactor, se maniobran dos máquinas de recarga controladas a distancia y conectadas a los extremos del canal horizontal de combustible que se va a recargar. Las máquinas abren el canal por ambos extremos, con el sistema refrigerante a presión y temperatura de trabajo, e introducen el combustible nuevo por un extremo y retiran el usado por el otro. Una vez

instalados los mazos de combustible necesarios, vuelven a colocar los cierres de los canales y pasan a recargar otro canal o a descargar el combustible usado en la bahía llena de agua.

El combustible usado descargado de todos los reactores operativos es muy radiactivo y precisa refrigeración para no sobrecalentarse y un blindaje que evite la irradiación directa de equipos u organismos vivos sensibles que se encuentren en las proximidades. Lo que suele hacerse es descargar el combustible usado en una piscina de almacenamiento donde el combustible quede cubierto por al menos 4 m de agua. Esto permite observar el combustible a través del agua con total seguridad y acceder al mismo para moverlo bajo el agua hasta un lugar de almacenamiento más duradero.

La radiactividad y el calor total generados por el combustible descargado disminuyen hasta alrededor de un 1 % de su valor inicial en un año, y hasta un 0,1 % en 10. Pasados de 5 a 10 años desde la descarga, la producción de calor habrá disminuido hasta el punto de que podrá retirarse el combustible de la piscina y almacenarse en seco en un contenedor, sólo con la circulación natural de aire alrededor del mismo. Sin embargo, seguirá siendo bastante radiactivo y necesitará un blindaje antiirradiación durante muchos decenios. Habrá que evitar la ingestión del material combustible por parte de organismos vivos durante mucho más tiempo.

La eliminación efectiva del combustible usado de los reactores de potencia todavía se encuentra en fase de desarrollo y aprobación. En varios países se está estudiando activamente su eliminación, pero todavía no se ha aprobado en ninguna parte del mundo. El concepto de almacenamiento subterráneo a gran profundidad en estructuras de roca estable se encuentra en fase de aprobación en Canadá, como método práctico y seguro de deshacerse de forma definitiva de estos residuos radiactivos de alto nivel. Sin embargo, parece que, aun cuando se apruebe este sistema hacia el año 2000, la eliminación real del combustible usado no se producirá hasta alrededor del 2025.

### Operaciones en planta

En los 33 países que tienen programas de energía nuclear, existen organismos reguladores que elaboran y aplican normas de seguridad para el funcionamiento de las instalaciones nucleares. Sin embargo, generalmente se responsabiliza a la compañía eléctrica propietaria y operadora de las instalaciones de la seguridad de funcionamiento de sus centrales nucleares. La función del operador es, en realidad, una tarea directiva de recopilación de información, planificación y toma de decisiones, y sólo incluye un control más activo ocasionalmente, cuando se trastorna el servicio rutinario. El operador no es el principal sistema protector.

Todas las centrales nucleares modernas disponen de sistemas de control y seguridad automáticos muy fiables y sensibles, que protegen constantemente el reactor y demás componentes de la planta, y que generalmente tienen un diseño a prueba de fallos si se produce un corte de corriente. No es de esperar que el operador duplique o sustituya estos sistemas automáticos de control y protección. Sin embargo, sí debe ser capaz de parar el reactor casi instantáneamente si es necesario, así como de reconocer cualquier problema relacionado con el funcionamiento de la planta y responder al mismo, aumentando así la diversidad de la protección. El operador tiene que ser capaz de comprender, diagnosticar y prever la evolución de la situación global a partir de todos los datos suministrados por los sistemas automáticos de información y proceso de datos.

Se espera del operador que:

- comprenda cuáles son las condiciones normales de todos los sistemas importantes para el estado global de la planta;

- reconozca, con ayuda de los sistemas automáticos o de los mecanismos especiales de control, cuándo se dan condiciones anómalas y cuál es su importancia;
- sepa cómo responder correctamente para restaurar el funcionamiento normal de la planta o detener la planta en condiciones de seguridad.

La capacidad del operador para hacer esto dependerá tanto del diseño de la máquina como de su propia competencia y formación.

En todas las centrales nucleares debe haber en todo momento operadores competentes, estables y bien adiestrados en el servicio. Los candidatos a operadores nucleares siguen un completo programa de formación, que suele incluir formación teórica y práctica en ciencia, equipos y sistemas de potencia, protección antiirradiación y políticas y principios de funcionamiento. En las centrales nucleares norteamericanas siempre se utilizan simuladores para proporcionar al operador experiencia práctica en las operaciones de la planta, en situaciones difíciles y condiciones inusuales. El vínculo entre el operador y los sistemas de potencia es el instrumental de la sala de control. Un instrumental bien diseñado puede facilitar la comprensión y la capacidad de respuesta de los operadores.

Es habitual la designación del personal de operación clave de una central nuclear ya durante su construcción, para que pueda aportar asesoramiento desde el punto de vista del funcionamiento y seleccionar al personal que se encargará de la puesta en servicio y el trabajo de la central. También se ocupará de preparar un completo conjunto de procedimientos de operación antes de que la central entre en funcionamiento. Los expertos en materia de diseño y el personal del organismo regulador inspeccionarán dichos procedimientos para garantizar la coherencia del diseño con las prácticas de operación.

Es de esperar que el personal gestione la central sistemáticamente y con rigor, de acuerdo con los procedimientos de operación y autorizaciones de trabajo. El personal de operación trabaja constantemente para garantizar la seguridad pública llevando a cabo un completo programa de pruebas y controles de los sistemas de seguridad y barreras protectoras y manteniendo la capacidad para afrontar cualquier emergencia en la planta. Si los operadores tienen que tomar medidas en respuesta a una alteración en el estado de la planta, disponen de procedimientos sistemáticos escritos que les guiarán y les proporcionarán la información necesaria para controlar la planta. Dichos procedimientos son revisados por los comités de seguridad de la central y del organismo regulador.

Un programa de gestión de seguridad bien elaborado incluye:

- el conocimiento detallado de las áreas cruciales para la seguridad;
- normas y objetivos para un funcionamiento aceptable;
- un programa de control del funcionamiento que responda a los problemas y documente los resultados;
- un programa de estudio de experiencias para establecer tendencias y definir el grado de cumplimiento de las normas y la causa de cualquier funcionamiento inaceptable o degenerativo;
- un medio de evaluación de las repercusiones de los cambios propuestos en los equipos físicos o en los procedimientos de operación y de implantación de cambios coherentes con la norma aceptada.

Además de los procedimientos de operación normal, cada central nuclear dispone de un sistema de notificación de incidentes con el que se investiga y registra cualquier fallo o deterioro de los equipos, deficiencias en el diseño o la construcción y

errores de funcionamiento detectados por los sistemas de vigilancia o por pruebas e inspecciones periódicas. Se determina la causa fundamental de cada incidente de modo que pueda adoptarse una medida preventiva o correctiva apropiada. Los informes de incidentes, incluidos los resultados de los análisis y las recomendaciones, son analizados por la dirección de la central y por expertos en materia de seguridad y factores humanos que no suelen estar radicados en la central.

El sistema de notificación de incidentes del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) funciona en todo el mundo como complemento de los sistemas nacionales para garantizar el intercambio de información entre todos los países participantes. La Asociación Mundial de Operadores Nucleares (WANO, World Association of Nuclear Operators) también facilita el intercambio de información detallada en el plano operativo.

Los reactores nucleares y todos los sistemas auxiliares y relacionados con la seguridad se mantienen y se prueban periódicamente obedeciendo a unos requisitos de garantía de calidad con el fin de asegurar su fiabilidad durante toda su vida de servicio. Además de la vigilancia automática, se realizan pruebas e investigaciones manuales sistemáticas en busca de evidencias de deterioros o fallos. Entre ellas cabe citar una vigilancia de campo constante, el mantenimiento preventivo, las pruebas periódicas y el estudio de los cambios registrados en las condiciones de la planta.

Se establecen objetivos de funcionamiento muy exigentes para los sistemas de proceso y seguridad a fin de que el riesgo para el personal y la población se mantenga dentro de unos límites aceptablemente reducidos. Para los sistemas de proceso, que funcionan activamente mientras se genera electricidad, los porcentajes de fallo se comparan con los objetivos de funcionamiento y, si éste se encuentra por debajo de lo exigido, se pueden introducir cambios en el diseño. Para los sistemas de seguridad el planteamiento es diferente, ya que sólo entran en funcionamiento si fallan los sistemas de proceso. Se controlan por medio de completos programas de pruebas, y los resultados se utilizan para determinar cuánto tiempo podría quedar fuera de servicio cada uno de ellos. El tiempo total calculado se compara con una norma de funcionamiento muy exigente. Si se detecta una deficiencia en un sistema de seguridad se corrige inmediatamente o se para el reactor.

También se aplican vastos programas de pruebas y mantenimiento durante las paradas periódicas programadas. Por ejemplo, todas las vasijas y componentes a presión y sus soldaduras se inspeccionan sistemáticamente con métodos no destructivos y siguiendo las normas de seguridad.

### Principios de seguridad y características de diseño relacionadas con la seguridad

Hay cuatro aspectos de la reacción de fisión en cadena que pueden resultar peligrosos y que no es posible separar del aprovechamiento de la energía nuclear para la producción de electricidad, lo que hace necesario la adopción de medidas de seguridad:

1. la fisión produce radiación ionizante, que impone una protección frente a la exposición directa a la radiación;
2. se crean productos de fisión altamente radiactivos, que requieren recintos estancos para evitar la contaminación del medio ambiente exterior y una posible ingestión;
3. la reacción de fisión en cadena es un proceso dinámico que requiere un control constante;
4. la producción de calor no puede detenerse instantáneamente, ya que la desintegración radiactiva continúa produciendo

calor una vez terminada la reacción de fisión en cadena, por lo que se requiere una refrigeración de larga duración.

Los requisitos de seguridad derivados de estas características marcan las principales diferencias en cuanto a equipos de seguridad y estrategia de funcionamiento entre una central nuclear y las centrales eléctricas que utilizan combustibles fósiles. Su cumplimiento es diferente en los distintos tipos de centrales nucleares, pero los principios fundamentales de seguridad son los mismos en todas ellas.

Durante el procedimiento de concesión de licencias, cada instalación nuclear debe demostrar que la liberación de radiactividad será inferior a los límites reglamentados, tanto en condiciones normales de servicio como en caso de avería o accidente. La prioridad es evitar los fallos y no limitarse a mitigar sus consecuencias, pero el diseño tiene que ser capaz de resolver los fallos si llegan a producirse a pesar de todas las precauciones. Ello exige la aplicación del más alto grado de control y de garantía de calidad a todos los equipos, funciones de construcción y operaciones. Las características de seguridad inherentes y las medidas técnicas de seguridad están diseñadas para evitar y controlar los accidentes y contener y minimizar la liberación de materiales radiactivos.

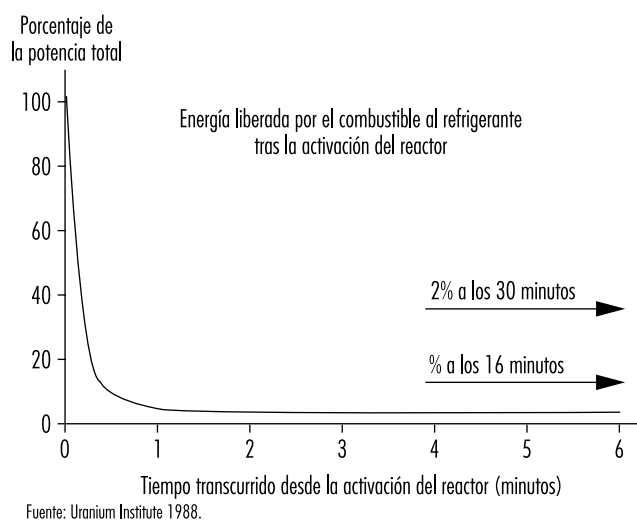
En especial, la generación de calor y la capacidad de enfriamiento deben corresponderse en todo momento. En funcionamiento, el reactor se enfría bombeando refrigerante a través de unas tuberías conectadas al mismo, que lo hacen circular por la superficie de la camisa del combustible. Si se corta la corriente de las bombas o se produce una avería repentina en las tuberías de conexión, se interrumpirá el enfriamiento del combustible, lo que podría dar lugar a un rápido aumento de la temperatura del combustible, un posible fallo de la camisa del combustible y el escape de material radiactivo del combustible a la vasija del reactor. Una rápida parada de la reacción de fisión en cadena, junto con la posible activación de sistemas de refrigeración auxiliares o de emergencia, evitará que se deteriore el combustible. Estas medidas de seguridad existen en todas las centrales nucleares.

Aun cuando se pare el reactor, la pérdida de la refrigeración y una avería en la instalación de refrigeración auxiliar o de emergencia podrían provocar el sobrecalentamiento del combustible debido a la producción constante de calor ocasionada por la desintegración de los productos de fisión en el combustible, como se indica en la Figura 76.2. Aunque el calor de desintegración es sólo del 1 % o el 2 % de la producción de calor a plena potencia, si no se elimina, la temperatura del combustible puede alcanzar niveles de fallo en cuestión de minutos desde el momento de la pérdida total de la refrigeración. El principio de seguridad en materia de diseño de centrales nucleares exige que se evalúen minuciosamente todas las circunstancias que puedan provocar sobrecalentamiento y deterioro del combustible y la liberación de materiales radiactivos del mismo y que se eviten por medio de sistemas técnicos de control y protección.

Para proteger una central nuclear, hay tres tipos de sistemas de seguridad: las características inherentes, los sistemas pasivos y los sistemas activos, que se utilizan en distintas combinaciones en las centrales nucleares operativas.

Las *características de seguridad inherentes* se basan en las leyes de la naturaleza para mantener la seguridad en la central eléctrica. Hay características de seguridad inherentes a ciertos combustibles nucleares, de modo que, a medida que se eleva su temperatura, disminuye la velocidad de la reacción de fisión en cadena. Hay características de seguridad inherentes a algunos diseños de sistemas refrigerantes, por las que el refrigerante circula sobre el combustible de forma natural para eliminar adecuadamente el calor de la desintegración sin necesidad de bombeo. Hay

Figura 76.2 • Descenso del calor tras la parada del reactor.



características de seguridad inherentes a la mayoría de las estructuras metálicas, de modo que bajo una carga fuerte reaccionan con elasticidad o estiramiento en lugar de con rotura o reventazón.

Las *características de seguridad pasivas* incluyen el levantamiento de válvulas de seguridad de contrapeso (gravedad) por la presión del líquido que descargan, o el uso de energía almacenada en sistemas de inyección de refrigerante de emergencia, o algunas vasijas de seguridad diseñadas para amortiguar la energía liberada por la avería de las tuberías y el consiguiente calor por desintegración.

Los *sistemas de seguridad activos* comprenden todos los sistemas que precisan señales de activación y una alimentación eléctrica de algún tipo. Los sistemas activos suelen controlar un mayor abanico de circunstancias que los sistemas inherentes y pasivos, y pueden comprobarse sin restricciones durante el funcionamiento del reactor.

La seguridad de diseño de las centrales nucleares se basa en la elección de una combinación de sistemas inherentes, pasivos y activos para cumplir los requisitos legales de seguridad de la jurisdicción en que esté ubicada la central. Se necesita un alto grado de automatización de los sistemas de seguridad para evitar en la medida de lo posible que el personal de operaciones tenga que tomar decisiones y medidas rápidas bajo tensión. Los sistemas de los reactores nucleares están diseñados para adaptarse automáticamente a los cambios en la demanda de potencia, que generalmente son graduales. Es especialmente importante que los sistemas relacionados con la seguridad estén en condiciones de responder en todo momento de forma inmediata, efectiva y fiable. Para alcanzar ese elevado nivel de rendimiento, deben cumplir los más estrictos criterios de garantía de calidad y diseñarse siguiendo principios reconocidos de seguridad en el diseño, como son la redundancia, la diversidad y la separación física.

La *redundancia* es la instalación de más componentes o subsistemas de los estrictamente necesarios para que el sistema funcione: por ejemplo, instalar tres o cuatro componentes donde sólo se necesitan dos para que el sistema funcione correctamente.

La *diversidad* es la instalación de dos o más sistemas basados en principios funcionales o de diseño diferentes para desempeñar una misma función de seguridad.

La *separación física* de componentes o sistemas diseñados para desempeñar la misma función de seguridad, protege de daños locales que de otro modo podrían afectar al funcionamiento de los sistemas de seguridad.

Un buen ejemplo de aplicación de estos principios de seguridad en el diseño es la alimentación eléctrica de las centrales nucleares, que consta de más de una conexión al sistema de alimentación principal, con el apoyo in situ de varios motores diesel de arranque automático y/o turbinas de combustión y de bancos de baterías y grupos electrógenos que garantizan la fiabilidad del suministro eléctrico a los sistemas vitales en materia de seguridad.

La medida preventiva básica contra la liberación de materiales radiactivos es muy sencilla en principio: instalar una serie de barreras estancas entre los materiales radiactivos y el medio ambiente para conseguir protección contra la radiación directa y contención de los materiales radiactivos. La primera barrera interna es el propio combustible cerámico o metálico, que aglomera la mayoría de los materiales radiactivos dentro de la matriz. La segunda barrera es la camisa estanca y resistente a la corrosión. La tercera es el contorno a presión del sistema refrigerante primario. Finalmente, la mayoría de los sistemas de energía nuclear están encerrados en una estructura de contención resistente a la presión y diseñada para resistir el fallo de las tuberías mayores del interior y contener la liberación de materiales radiactivos al medio ambiente.

El objetivo básico del diseño de seguridad de una central nuclear es mantener la integridad de estas barreras aplicando un enfoque de defensa en profundidad, que puede caracterizarse por tres niveles de medidas de seguridad: preventivas, protectoras y atenuantes.

Entre las *medidas preventivas* cabe citar: alcanzar el máximo nivel de garantía de calidad durante el diseño, la construcción y el funcionamiento; emplear operadores con un alto nivel de formación que se sometan a un readiestramiento periódico; utilizar características de seguridad inherentes; crear márgenes de diseño apropiados; llevar a cabo un cuidadoso mantenimiento preventivo, pruebas e inspecciones constantes y corrección de deficiencias; vigilancia constante; evaluaciones y reevaluaciones de seguridad minuciosas cuando sea necesario; y evaluación y análisis causal de incidentes y averías, introduciendo las modificaciones pertinentes.

Las *medidas de protección* incluyen: sistemas de parada de acción rápida; sistemas/válvulas de seguridad sensibles y automáticas; circuitos de bloqueo como protección contra un falso accionamiento; control automático de las funciones vitales de seguridad; y medición y control constante de los niveles de radiactividad y de la radiactividad efluente de modo que no se rebasen los límites admisibles.

Entre las *medidas atenuantes* cabe citar: los sistemas refrigerantes de emergencia; sistemas de agua de alimentación altamente fiables; sistemas de alimentación de emergencia diversos y redundantes; contención para evitar cualquier fuga de materiales radiactivos de la central, diseñada para soportar diversas tensiones naturales y artificiales, como terremotos, fuertes vientos, inundaciones o impactos de aeronaves; y, finalmente, la planificación de emergencias y el tratamiento de accidentes, que incluye la vigilancia de la radiación, la información a las autoridades competentes en materia de seguridad y los avisos públicos, el control de la contaminación y la distribución de materiales atenuantes.

La seguridad nuclear no sólo depende de factores técnicos y científicos; el factor humano desempeña un papel muy importante. El control normativo aporta una comprobación independiente de todos los aspectos de seguridad de las centrales nucleares. Ahora bien, la seguridad nuclear no se garantiza

principalmente con leyes y reglamentos, sino con un diseño, un funcionamiento y una gestión responsables por parte de las compañías eléctricas, que deberán aplicar las revisiones y autorizaciones pertinentes de quienes tienen los conocimientos y la autoridad.

El único accidente nuclear que ha tenido consecuencias muy graves para la población se produjo durante una prueba de refrigeración en una configuración inusual de una central nuclear RBMK en Chernobil, Ucrania, en 1986. En este grave accidente, el reactor quedó destruido y gran cantidad de materiales radiactivos escaparon al medio ambiente. Después se descubrió que el reactor no disponía de un sistema de parada adecuado y que era inestable a baja potencia. Las deficiencias de diseño, el error humano y la falta de una gestión apropiada confluyeron para que se produjese el accidente. En los reactores RBMK todavía en servicio se han realizado modificaciones para eliminar graves deficiencias de diseño y se han mejorado las instrucciones de operación para evitar que se repita un incidente tan lamentable.

Se ha aprendido mucho del accidente del RBMK, de otros accidentes nucleares menos graves (como el acaecido en Three Mile Island en Estados Unidos en 1978) y de muchos accidentes e incidentes menores durante más de 30 años de funcionamiento de las centrales nucleares. El objetivo de la comunidad nuclear es garantizar que ningún accidente nuclear ponga en peligro a los trabajadores, la población o el medio ambiente. La estrecha cooperación entre programas, como los sistemas de notificación de incidentes de la OIEA y la WANO, las investigaciones de las agencias reguladoras y de grupos industriales y la vigilancia de los propietarios y operadores de las centrales nucleares, aumentan las posibilidades de que pueda cumplirse este objetivo.

## ● SEGURIDAD EN LA GENERACION, TRANSMISION Y DISTRIBUCION DE ENERGIA ELECTRICA: UN EJEMPLO DE ESTADOS UNIDOS

*Janet Fox*

### Generación, transmisión y distribución

El suministro de energía eléctrica consta de tres fases: generación, transmisión y distribución. Cada una de ellas conlleva distintos procesos productivos, actividades laborales y riesgos.

La mayor parte de la electricidad se genera a niveles de 13.200 a 24.000 voltios. Entre los riesgos presentes en el proceso de generación de energía eléctrica se incluyen las explosiones y quemaduras derivadas de averías inesperadas de los equipos. También pueden producirse accidentes por no seguir unos procedimientos apropiados de bloqueo e identificación, que se implantan con el fin de controlar las fuentes de energía. Antes de realizar tareas de mantenimiento en equipos que puedan recibir excitación eléctrica, ponerse en funcionamiento o liberar energía almacenada de forma inesperada y provocar lesiones, deberá procederse a su aislamiento de la fuente de energía y dejarse inoperativos. Si no se aíslan correctamente las fuentes de energía (bloqueo/identificación) pueden producirse graves lesiones o fallecimientos.

Una vez generada, la energía eléctrica se envía a distancia a través de líneas de transmisión tendidas entre subestaciones de transmisión ubicadas en centrales generadoras. La instalación de las líneas puede ir elevada, por medio de torres de sustentación,

o subterránea. Las líneas de alta tensión transmiten grandes cantidades de energía eléctrica y se despliegan a lo largo de distancias considerables. Cuando la electricidad sale de una central generadora, la subestación de transmisión allí ubicada aumenta la tensión hasta niveles de 138.000 a 765.000 voltios. Dentro del área operativa, las subestaciones de transmisión reducen la tensión transmitida a niveles de 34.500 a 138.000 voltios. Esta energía se transporta después a través de líneas a los sistemas de distribución situados en el territorio de servicio local. Los principales riesgos presentes durante el proceso de transmisión son eléctricos. Si no se mantienen las distancias de seguridad apropiadas o no se utilizan equipos de protección adecuados (guantes y manguitos de goma) pueden producirse graves lesiones o fallecimientos. Las caídas también dan lugar a accidentes graves durante la realización de trabajos de mantenimiento en líneas elevadas y mientras se trabaja desde postes o camiones de cangilón.

El sistema de distribución conecta el sistema de transmisión al equipo del cliente. La subestación distribuidora reduce la tensión eléctrica transmitida a niveles de 2.400 a 19.920 voltios. Un transformador distribuidor reduce todavía más la tensión. Los riesgos relacionados con el trabajo de distribución también son de naturaleza eléctrica. Sin embargo, existe el riesgo adicional de trabajar en espacios cerrados (registros y bóvedas) cuando se trata de sistemas de distribución subterráneos.

En las subestaciones de transmisión y distribución se cambia la tensión, la fase u otras características de la energía eléctrica como parte del proceso de distribución final. La electrocución representa el principal riesgo para la seguridad. Este tipo de accidentes suelen producirse por no mantener las distancias de seguridad con los equipos eléctricos activos o no utilizar equipos de protección personal adecuados, incluidos guantes y manguitos aislantes de goma.

### Riesgos para la seguridad en los procesos de generación, transmisión y distribución

La norma de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, también conocida como norma de mantenimiento eléctrico, codificada como 29 CFR 1910.269, fue promulgada por la Administración para la Salud y la Seguridad en el Trabajo de Estados Unidos (OSHA, US Occupational Safety and Health Administration) el 31 de Enero de 1994. La norma es aplicable a todos los trabajadores de compañías eléctricas que se ocupan del funcionamiento y el mantenimiento de equipos de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica y equipos afines. Además, las disposiciones de la norma 1910.269 también se aplican a los operarios de líneas contratadas, los trabajadores encargados del desramaje de árboles para despejar el paso a las líneas contratadas y los productores de energía independientes. Otros países y regiones tienen normas similares.

Los riesgos que contempla directamente la norma de la OSHA son los de naturaleza eléctrica que pueden provocar electrocución y lesiones por choque eléctrico. Entrar inadvertidamente en contacto con electricidad de alta tensión suele tener como consecuencia la muerte o lesiones graves, como quemaduras de segundo y tercer grado, amputación de miembros, daños en órganos internos y daños neurológicos.

La norma también contempla los fallecimientos y lesiones debidas a otros cuatro tipos de accidentes: golpes; caídas desde escaleras, andamios, postes u otras alturas; aplastamiento por activación accidental de maquinaria durante las tareas rutinarias de mantenimiento; y contacto con temperaturas extremas debido a la liberación inadvertida de vapor a alta presión durante el mantenimiento de las calderas. El Eastern Research Group (ERG), que preparó el estudio de impacto económico para la propuesta de norma de la OSHA, informó que

“se producen más accidentes asociados a las líneas de transmisión y distribución que a las subestaciones o instalaciones de generación de electricidad”. El ERG comunicó que en la categoría de líneas de transmisión y distribución, los operarios, aprendices y supervisores son quienes sufren la mayoría de los accidentes mortales o graves con baja laboral. En la categoría de subestaciones y generación de potencia, los electricistas de las subestaciones y los mecánicos de las compañías eléctricas son quienes sufren la mayoría de los accidentes.

### Reducción de accidentes

La OSHA ha estimado que en Estados Unidos los trabajadores de las compañías de generación, transmisión y distribución de electricidad sufren anualmente una media de 12.976 lesiones con baja, ascendiendo el número de fallecidos a 86. Asimismo, ha calculado que podrían evitarse 1.633 lesiones con baja y 61 accidentes mortales anuales si se cumplieran las disposiciones de la norma y de otras normas mencionadas en la disposición final. La OSHA desglosa dicha reducción en dos categorías. Se espera que las más beneficiadas sean las compañías eléctricas, que representan aproximadamente el 80 % de los accidentes mortales. Los contratistas —incluidos contratistas eléctricos y operarios desramadores— y los establecimientos no relacionados con las compañías eléctricas absorben el 20 % restante. La OSHA también espera que sean las compañías eléctricas quienes experimenten una mayor reducción en la incidencia de las lesiones con baja. La segunda categoría de reducción se relaciona con las referencias que hace la norma 190.269 a otras normas existentes. Por ejemplo, la OSHA espera que los empleadores proporcionen servicios médicos y primeros auxilios con arreglo a la norma 1910.151.

Las operaciones de excavación deben ajustarse a la subsección P de la norma 1926; los equipos de protección personal, a los requisitos de la subsección I de la norma 1910; los equipos anticaídas, a los requisitos de la subsección E de la norma 1926; y las escaleras, a la subsección D de la norma 1910. Son algunos ejemplos del gran número de referencias a otras normas OSHA que se incluyen en la norma de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. La OSHA cree que estas referencias fomentarán un mayor reconocimiento de las distintas normas de seguridad aplicables y, junto con la formación de los empleados y el reconocimiento de los riesgos por medio de sesiones informativas sobre tareas, se evitarán cada año otros 2 accidentes mortales y 1.310 lesiones con baja.

### Disposiciones generales

La norma de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica constituye un enfoque completo del control de los riesgos existentes en la industria eléctrica. Está basada en el funcionamiento, y da al empleador la oportunidad de implantar programas alternativos siempre que demuestre que el nivel de seguridad obtenido es equivalente al especificado por la norma. En sus disposiciones generales se contemplan: requisitos de formación, procedimientos de control (bloqueo/identificación) de energía peligrosa durante la generación, transmisión y distribución de electricidad; procedimientos de entrada en espacios cerrados y de trabajo seguro en instalaciones subterráneas; requisitos para trabajar con o cerca de piezas eléctricamente activas y expuestas; requisitos para trabajar en líneas elevadas; requisitos de toma a tierra; desramaje de árboles para despejar el paso de las líneas; procedimientos para trabajar en subestaciones; y requisitos para herramientas de líneas con tensión, herramientas de mano y portátiles, escaleras y equipos de protección personal. La norma es completa y abarca todos los aspectos del

funcionamiento y el mantenimiento de los equipos de generación, transmisión y distribución de electricidad.

### Disposiciones importantes

Algunas de las disposiciones más importantes de la norma incluyen: requisitos para que los empleados reciban formación en materia de primeros auxilios, sesiones informativas sobre tareas y formación en prácticas laborales relacionadas con la seguridad, procedimientos de seguridad y procedimientos de emergencia, incluidos rescates en registros y en lo alto de postes. También se establecen requisitos específicos sobre la ropa que debe llevarse para trabajar en equipos con tensión eléctrica y los requisitos para entrar en estructuras subterráneas, así como para el control de fuentes de energía peligrosas. Otro elemento importante de la norma exige a los empleadores que certifiquen que los empleados han recibido una formación adecuada y tienen pericia en las prácticas laborales especificadas en la norma. Algunos de estos elementos se comentan a continuación con más detalle.

La OSHA exige que los empleados que realizan trabajos en líneas y equipos expuestos y activos a 50 o más voltios deben recibir formación en primeros auxilios y reanimación cardiopulmonar (RCP). Para trabajos de campo que requieran dos o más empleados en un determinado lugar, se impartirá formación al menos a dos de ellos. En lugares de trabajo fijos, como una central eléctrica, deberá impartirse formación a un número suficiente de trabajadores para asegurar que un trabajador expuesto a un choque eléctrico pueda recibir auxilio en 4 minutos.

El empleado jefe de un grupo de trabajo debe celebrar una *sesión informativa* con los participantes en un trabajo antes de iniciar cada tarea. En dicha sesión se explicarán los riesgos asociados a la tarea, los procedimientos de trabajo necesarios, las precauciones especiales, el control de las fuentes de energía y los equipos de protección personal. Para tareas repetitivas y parecidas se celebrará una sesión informativa antes de iniciar la primera de cada jornada o turno. Si se producen cambios importantes, se celebrará otra sesión. El estudio de la tarea que va a realizarse requiere planificación, lo que contribuye a reducir los accidentes.

La OSHA también exige que el empleador certifique que cada empleado ha recibido la formación necesaria para su cualificación y competencia. La certificación se emitirá cuando el empleado demuestre pericia en las prácticas laborales y se mantendrá durante todo el tiempo que permanezca empleado. La formación por sí sola es inadecuada. Debe demostrarse la pericia, generalmente examinando al empleado de sus conocimientos sobre el tema de que se trate. De este modo se contribuye a asegurar que los equipos eléctricamente activos sólo sean manipulados por trabajadores cualificados.

Hay requisitos en cuanto a la ropa que deben llevar los trabajadores expuestos a riesgos derivados de llamas o arcos eléctricos. En esta sección se exige al empleador que se asegure de que los trabajadores expuestos a estos riesgos no lleven ropa que, en contacto con llamas o arcos eléctricos, puedan aumentar el alcance de una posible lesión. Las ropas de acetato, nailon, poliéster o rayón, solos o mezclados, están prohibidas a menos que el empleador demuestre que han sido tratadas para soportar las condiciones que puedan darse. Los trabajadores pueden elegir entre algodón, lana o ropa ignífuga, pero el empleador deberá determinar, basándose en la exposición, si es aceptable utilizar fibras naturales como el algodón o la lana; estas fibras pueden arder en ciertas circunstancias. Aunque esta sección de la norma ha provocado una gran controversia en la industria, la prohibición del uso de materiales sintéticos es un paso importante para reducir las lesiones que sufren los trabajadores de la industria eléctrica.



## ● RIESGOS

*Michael Crane*

La OSHA, en su preámbulo a la norma de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica (29 CFR parte 1910.269), establece que "el índice de siniestralidad total de la industria de servicios eléctricos (es decir, de la industria suministradora de electricidad, SIC-491) es ligeramente menor que el correspondiente al sector privado en su conjunto" y que "excepto por los riesgos de tipo eléctrico y de caídas, los empleados de las compañías eléctricas afrontan riesgos de naturaleza y grado similar a los que se encuentran en muchas otras industrias" (OSHA 1994). El preámbulo continúa citando los archivos del Departamento de Estadística Laboral de Estados Unidos (BLS), en los que se identifican las principales causas de lesión en las compañías eléctricas:

- caídas;
- sobreesfuerzo;
- golpes, que provocan esguinces y torceduras, cortes, laceraciones y contusiones/magulladuras.

En el preámbulo se indica expresamente que el choque eléctrico no constituye una categoría de lesiones importante (o que se describa con frecuencia). Sin embargo, los archivos laborales, industriales y de la OSHA revelan que los accidentes eléctricos son el tipo más frecuente de lesiones mortales o graves en la industria eléctrica, seguidos de los accidentes de automóvil, las caídas y los "golpes/aplastamientos".

Los trabajadores de las compañías eléctricas afrontan muchos otros peligros para realizar las diversas tareas les corresponden. Los autores de los artículos del presente capítulo abordan muchas de ellas con detalle; yo me limitaré a mencionar algunas de las exposiciones peligrosas.

Las lesiones musculoesqueléticas son las lesiones más habituales de los trabajadores físicamente activos, y comprenden:

- dedos blancos por vibración, debido al uso de martillos neumáticos;
- lesiones de latigazo en el cuello provocadas por accidentes de automóvil;
- distensiones lumbares;
- lesiones en la cabeza;
- traumas en pies y tobillos,
- desgarrar del menisco medial.

Los trabajadores de la industria eléctrica pueden trabajar en muy diversos ambientes: trepan hasta lo más alto de las torres rurales de transmisión y empalman cables en registros situados bajo las ajetreadas calles de las ciudades; sudan a mares en los pisos superiores de las centrales eléctricas en verano y tiritan de frío cuando reparan líneas de distribución elevadas derribadas por un temporal. Las fuerzas físicas a las que se enfrentan son enormes. Una central eléctrica, por ejemplo, impulsa vapor a tal presión que la rotura de una tubería puede escaldarles y sofocarles. Entre los peligros físicos existentes en las centrales, además del calor, cabe citar el ruido, los campos electromagnéticos (CEM), la radiación ionizante de las instalaciones nucleares y la asfixia en espacios cerrados. La exposición al amianto ha sido un motivo importante de morbilidad y polémica, y está surgiendo la preocupación por otros materiales aislantes. Se utilizan mucho productos químicos cáusticos, corrosivos y disolventes. Las centrales también emplean trabajadores para desempeñar tareas especializadas como la extinción de incendios o el buceo (para inspeccionar sistemas de admisión y descarga de agua), que se ven expuestos a riesgos específicos e intrínsecos de dichas tareas.

Aunque las modernas centrales nucleares han reducido la exposición de los trabajadores a la radiación durante los períodos normales de servicio, puede producirse una exposición importante durante las paradas de mantenimiento y recarga. Se precisan excelentes capacidades de control de la radiación para proteger adecuadamente a los trabajadores que acceden a las áreas de radiación durante estos períodos. Como muchos trabajadores contratados pueden entrar en una central nuclear durante una parada y desplazarse después a otra central, es necesario mantener una estrecha coordinación entre las autoridades reguladoras e industriales para controlar la exposición total anual de un trabajador determinado.

Los sistemas de transmisión y distribución comparten algunos de los peligros de la central nuclear, pero se caracterizan además por exposiciones laborales exclusivas. Las enormes tensiones e intensidades intrínsecas del sistema crean una predisposición a choques eléctricos y quemaduras mortales cuando los trabajadores ignoran los procedimientos de seguridad o están inadecuadamente protegidos. Si los transformadores se sobrecalientan, pueden incendiarse y explotar, liberando aceite y posiblemente PCB y sus productos de descomposición.

Las subestaciones eléctricas comparten con las centrales nucleares la posibilidad de una exposición a materiales aislantes, a los CEM y a los riesgos de los espacios cerrados. En el sistema de distribución, las operaciones de corte, quema y empalme de cables eléctricos exponen a los trabajadores al plomo y a otros metales tanto en forma de polvo como de humos. Las estructuras subterráneas que soportan el sistema también deben considerarse espacios cerrados con posibles riesgos. El pentaclofenol, un pesticida utilizado para la conservación de los postes de madera de las líneas eléctricas, representa un riesgo exclusivo del sistema de distribución.

Finalmente, los lectores de contadores y los trabajadores al aire libre pueden verse expuestos a la violencia callejera; este conjunto de trabajadores se han visto afectados por muertes producidas en intentos de robo.

## ● PROBLEMAS PARA LA SALUD PÚBLICA Y EL MEDIO AMBIENTE

*Alexander C. Pittman, Jr.*

Toda actividad humana repercute en el medio ambiente. La magnitud y las consecuencias de tal repercusión son variables y se han creado leyes medioambientales para regularlas y minimizarlas.

La generación de energía eléctrica ocasiona varios riesgos importantes, posibles y reales, para el medio ambiente, incluidas emisiones a la atmósfera y contaminación del agua y del suelo (véase la Tabla 76.4). Las centrales que se alimentan de combustibles fósiles presentan un problema específico por las emisiones atmosféricas de óxidos de nitrógeno (véase "Ozono" más adelante), óxidos de azufre y la cuestión de la "lluvia ácida", dióxido de carbono (véase "Cambio global del clima", más adelante) y partículas, de las que se ha afirmado recientemente que contribuyen a provocar problemas respiratorios.

Las centrales nucleares han despertado preocupación por el almacenamiento a largo plazo de sus residuos y la posibilidad de que se produzcan accidentes catastróficos que acarreen la liberación de contaminantes radiactivos a la atmósfera. El accidente ocurrido en 1986 en Chernobil, Ucrania, es un ejemplo clásico de lo que puede ocurrir si no se toman las precauciones adecuadas en las centrales nucleares.

Tabla 76.4 • Principales riesgos ambientales por la generación de energía.

Tipo de central	Aire	Agua*	Suelo
Combustible fósil	NO <sub>2</sub>	PCB	Cenizas
	SO <sub>2</sub>	Disolventes	Amianto
	Partículas	Metales	PCB
	CO	Aceite	Disolventes
	CO <sub>2</sub>	Ácidos/bases	Metales
	Compuestos orgánicos volátiles	Hidrocarburos	Aceite
			Ácidos/bases Hidrocarburos
Nuclear	Como la anterior más las emisiones radiactivas		
Hidroeléctricas	Principalmente los lixiviados del suelo al agua detrás de las presas		
	Perturbación del hábitat de la fauna		

\* Debe incluir efectos "locales", como aumento de la temperatura de la masa de agua que recibe las descargas de la central y reducción en la población de peces como consecuencia de los efectos mecánicos de los sistemas de alimentación de agua.

Con respecto a las centrales hidroeléctricas, las principales inquietudes han sido la lixiviación de metales y la perturbación de los hábitats de la fauna acuática y terrestre, aspectos que se tratan en el artículo "Generación de energía hidroeléctrica" de este mismo capítulo.

### Campos electromagnéticos

Los esfuerzos de investigación sobre campos electromagnéticos (CEM) se han incrementado en todo el mundo desde que se publicó el estudio de Wertheimer y Leeper en 1979. Dicho estudio sugería la existencia de una relación entre el cáncer infantil y los cables eléctricos situados cerca de las viviendas. Los estudios publicados desde entonces no han sido concluyentes y no han confirmado la causalidad. De hecho, los estudios epidemiológicos posteriores han apuntado posibilidades que requieren más conocimientos y datos para empezar a extraer conclusiones razonables. Algunas de las dificultades encontradas para realizar un buen estudio epidemiológico se deben a los problemas de evaluación (es decir, la medición de la exposición, la caracterización de la fuente y los niveles de los campos magnéticos en las residencias). Aunque el estudio más reciente publicado por el Consejo Nacional de Investigación de la Academia Nacional de Ciencias (1996) determinó que no había suficientes evidencias para considerar que los campos eléctricos y magnéticos puedan suponer una amenaza para la salud humana, es probable que este asunto siga siendo objeto de la atención pública hasta que la ansiedad propagada sea mitigada por futuros estudios e investigaciones que demuestren la ausencia de efecto alguno.

### Cambio global del clima

Durante los últimos años ha aumentado el conocimiento público del impacto de los seres humanos sobre el clima global. Se considera que aproximadamente la mitad de todas las emisiones derivadas de la actividad humana que repercuten en el efecto invernadero son de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Se han realizado y

continúan realizándose muchas investigaciones sobre esta cuestión a escala nacional e internacional. Dado que el funcionamiento de las compañías eléctricas contribuye en gran medida a la liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, toda legislación encaminada a controlar las emisiones de CO<sub>2</sub> puede afectar a la industria de generación de energía de varios modos. El convenio marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático, el plan de acción estadounidense sobre cambio climático y la ley de política energética de 1992 han hecho comprender a la industria energética cuál ha de ser su respuesta a la futura legislación.

En la actualidad, algunos ejemplos de los ámbitos que se están estudiando son: la creación de modelos matemáticos de emisiones, la determinación de los efectos del cambio climático, la determinación de los costes asociados a cualquier plan de tratamiento del cambio climático, beneficios para los seres humanos de la reducción de las emisiones gaseosas que repercuten en el efecto invernadero, y predicción del cambio climático.

Un importante motivo de preocupación sobre el cambio climático es el posible impacto negativo para los sistemas ecológicos. Se cree que los sistemas no ordenados son los más sensibles y tienen más probabilidades de verse afectados de un modo importante a escala global.

### Contaminantes atmosféricos peligrosos

La US Environmental Protection Administration (EPA) ha enviado al Congreso de Estados Unidos un informe provisional sobre contaminantes atmosféricos peligrosos de las compañías eléctricas, tal como exigían las enmiendas de 1990 a la ley de aire limpio. La EPA debía analizar los riesgos de las instalaciones generadoras de electricidad a partir del vapor obtenido de los combustibles fósiles. La conclusión fue que dichas emisiones no constituyen ningún riesgo para la salud pública. Las conclusiones acerca del mercurio se han retrasado en espera de estudios adicionales. Un completo estudio realizado por el Electric Power Research Institute en centrales eléctricas alimentadas por combustibles fósiles indica que más del 99,5 % de las centrales de este tipo no presentan riesgos de cáncer superiores al umbral de 1 caso por millón (Lamarre 1995), en comparación con el riesgo inducido por todas las fuentes de emisión, que se estima en 2.700 casos anuales.

### Ozono

La reducción de los niveles de ozono atmosférico constituye una preocupación importante en muchos países. Los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) producen ozono. Como las centrales eléctricas alimentadas por combustibles fósiles liberan gran parte de todas las emisiones de NO<sub>x</sub> del mundo, son de esperar medidas de control más rigurosas a medida que los países adopten normas medioambientales más exigentes. Así se seguirá hasta que se definan con más precisión los datos de partida para la realización de los modelos de cuadrícula fotoquímica utilizados para modelar el transporte de ozono troposférico.

### Protección del emplazamiento

Las compañías eléctricas se ven obligadas a aceptar los costes de reparación de los emplazamientos en que se asientan las plantas de gas manufacturado (PGM). Dichos emplazamientos se crean originariamente para la producción de gas de carbón, coque o petróleo, lo que dio lugar al vertido en obra de alquitrán de carbón y otros subproductos en grandes lagunas o estanques, o al vertido terrestre fuera de obra. Los vertidos de este tipo pueden contaminar las aguas freáticas y el suelo. Esta cuestión permanecerá sin resolver durante algún tiempo, hasta que se determine el nivel de contaminación de las aguas freáticas y el suelo de estos emplazamientos y los medios para reducirla de manera rentable.

**Referencias**

- Lamarre, L. 1995. Assessing the risks of utility hazardous air pollutants. *EPRI Journal* 20(1):6.
- Naciones Unidas. 1995. *1993 Energy Statistics Yearbook*. Nueva York: Naciones Unidas.
- National Research Council of the National Academy of Sciences. 1996. *Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields*. Washington, DC: National Academy Press.
- Uranium Institute. 1988. *The Safety of Nuclear Power Plants*. Londres: Uranium Institute.
- US Department of Energy. 1995. *Electric Power Annual 1994*. Vol. 1. Washington, DC: US Department of Energy, Energy Information Administration, Office of Coal, Nuclear, Electric and Alternate Fuels.
- US Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration (OSHA). 1994. 29 CFR Part 1910.269, Electric Power Generation, Transmission and Distribution: Electrical Protective Equipment; Final Rule. *Federal Register*, Vol. 59.
- US Environmental Protection Administration (EPA). *Interim Report on Utility Hazardous Air Pollutants*. Washington, DC: EPA.
- Wertheimer, N, E Leeper. 1979. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am J Epidemiol* 109:273-284.

