

# Energía nucleoelectrónica, seguridad nuclear y medio ambiente

por Sigvard Eklund, Director General del OIEA

Las últimas acontecimientos han traído los problemas energéticos al primer plano de la actualidad. La mayoría de los países industrializados necesitan obrar sin demora para prevenir la escasez de energía que se manifestará durante los diez próximos años, pero no está de más estudiar lo que puede ocurrir hasta el final de este siglo e incluso hasta el año 2100. Esto requiere unas cuantas observaciones sobre la demanda y el suministro mundial de energía a largo plazo.

La finalidad de este artículo es dar una perspectiva general de la situación de la energía nuclear en el mundo, así como de los problemas inherentes a esta nueva fuente de energía y de la manera de solucionarlos. Huelga decir que cada país enfoca sus problemas energéticos según los recursos naturales que tenga, según su estado de desarrollo industrial, y según otros factores que no son de aplicación general para todo el mundo.

La población mundial era de 1 600 millones de habitantes en 1900, ahora es de 3 600 millones y se calcula que alcanzará los 6 100 millones al final del siglo. Pero esto no es todo: un estudio que hizo el Banco Mundial en 1970 indica que, aún alcanzando un incremento demográfico cero en los países desarrollados en el año 2000 y en los países en desarrollo en el año 2050, no se estabilizará la situación hasta el año 2120, y éso con una población mundial de 15 000 millones.

No hay duda de que las necesidades de energía son proporcionadas a la población mundial y de que hay una relación entre el nivel de vida y el consumo de energía. Para dar una idea de la variación del consumo de energía, desde el comienzo de la humanidad hasta 1970 se calcula que el consumo total de energía ha sido de 6 Q ( $Q = 10^{18}$  Btu). Solamente en el año 1970, el consumo de energía fue de 0,2 Q y se calcula que para el período 1971 – 2000 será de 13 Q.

Actualmente el consumo de energía per cápita en los Estados Unidos es de 10 kW térmicos. Hacia el final del próximo siglo tendrán que reciclarse gran parte de las

materias primas, el hidrógeno podrá producirse para utilizarlo como agente reductor y para la transferencia de energía, habrá que desalar el agua y tratar las aguas residuales, etc. Habrá que realizar un mayor esfuerzo para extraer materias primas de los yacimientos minerales pobres. Con estas consideraciones es razonable suponer, a efectos de planificación, un consumo per cápita doble. Suponiendo que este consumo per cápita exista en todo el mundo – suposición que cabe discutir pero que forma parte de los objetivos del desarrollo de las naciones no industrializadas – el consumo acumulado de energía para el año 2100 será de 400 Q, cifra realmente muy alta. Es lógico preguntarse qué magnitud tienen los actuales recursos energéticos.

¿Cuál es el potencial de las fuentes energéticas renovables? La energía hidráulica representa 0,2 Q/año, la fotosíntesis la mitad, y las fuentes geotérmicas, la energía de las mareas y la eólica proporcionan de 10 a 1000 veces menos. La radiación solar total representa 3 000 Q/año y la utilización de gradientes térmicos en los mares puede dar 200 Q/año, pero no hay que olvidar que

ignoramos las limitaciones técnicas y económicas que pueden tener estas dos fuentes de energía.

Las fuentes de energía no renovables, carbón y lignito, tal como se conocen actualmente y asignándoles un costo de extracción razonable, representan 200 Q, el petróleo 10 Q y el gas natural 6 Q. La energía geotérmica de las rocas calientes se estima que es de 600 Q y el contenido de energía de las pizarras bituminosas de 4 000 Q. Sin embargo no existen ni se han previsto métodos para utilizar la energía geotérmica en gran escala y el contenido en energía de las pizarras bituminosas probablemente es ficticio, pues habría que desplazar tal volumen de tierra que la utilización de las pizarras en gran escala es comercialmente inaceptable.

De lo anterior se deduce evidentemente que con las hipótesis indicadas — crecimiento demográfico hasta 15 000 millones e incremento del consumo de energía hasta 20 kW térmicos per cápita — los combustibles fósiles no bastarán para responder a las necesidades globales, ni siquiera hasta el final del próximo siglo.

## ENERGIA NUCLEOELECTRICA

¿Y el potencial de la energía nucleoelectrica? El uranio es un elemento muy repartido por la corteza terrestre; su contenido en energía depende de lo que se esté dispuesto a pagar por su extracción. Considerando solamente el uranio barato de hoy — que cuesta de 5 a 10 dólares por libra de óxido de uranio — los recursos conocidos pueden representar 0,9 Q si se utiliza en reactores de agua ligera, o 100 veces más si se utiliza en reactores reproductores. Considerando un uranio más caro — de 30 a 50 dólares por libra de óxido de uranio — su utilización puede representar 5 Q en reactores de agua ligera y 500 Q en reactores reproductores; en el primer caso se añaden un par de milésimas de dólar al coste de un kWh, y en el segundo caso solamente 0,2 milésimas de dólar. El torio representa una reserva del mismo orden de magnitud.

Volviendo a la situación mundial de la energía y a su desarrollo previsto en los 30 próximos años, es muy importante dar por sentado que ningún descubrimiento tecnológico puede tener repercusiones inmediatas sobre la situación, y que sus efectos no se manifestarán hasta por lo menos diez años más tarde. Pueden tomarse medidas para aprovechar mejor el calor disipado en el ciclo térmico y hay que tomar decisiones a nivel oficial para limitar el incremento anual del consumo de energía, que en la actualidad es prácticamente automático; se trata de decisiones graves y cuyas repercusiones sobre la sociedad en conjunto serán casi traumáticas.

La energía nucleoelectrica representa — para los diez próximos años — la única posibilidad tecnológicamente lo bastante avanzada de añadir cantidades importantes de energía nueva al balance energético. Si la energía nucleoelectrica ha de satisfacer necesidades energéticas después de este período, es preciso tomar desde ahora medidas para ello. Habrá que ampliar considerablemente las operaciones de sondeo para la exploración de uranio en algunos países desarrollados, puesto que el rendimiento de las reservas conocidas por metro perforado ha disminuido mucho en los años últimos. En especial deben iniciarse operaciones de exploración y laboreo de los nuevos hallazgos de uranio en los países en desarrollo. Puesto que la mayor cantidad de energía nucleoelectrica de la década la producirán los reactores de agua ligera, debe asegurarse la disponibilidad de uranio enriquecido. Esto significa, por ejemplo, que los Estados Unidos deben aumentar el grado de enriquecimiento y la producción de las plantas existentes, aunque el país se encargue solamente de cubrir cierta fracción de las necesidades mundiales de uranio enriquecido. El resto de la demanda tendrá que cubrirse con otras instalaciones de enriquecimiento — por ejemplo, en la Unión Soviética — o recurriendo a los consorcios cooperativos que se están organizando en Europa.

Aproximadamente en 1985 dispondremos de experiencia sobre reactores reproductores gracias a los prototipos americanos,

ingleses, franceses, alemanes y japoneses. Teniendo en cuenta todos los factores pertinentes, es más seguro partir del supuesto de que no se dispondrá de reactores reproductores comerciales hasta después de 1990 y de que su introducción en el mercado será lenta. Un cálculo optimista es que a principios de los años 90 los reactores reproductores constituirán del 4 al 14 por ciento de la capacidad nuclear.

En cuanto a la fusión, no hay que olvidar que han mediado 25 años entre la primera reacción en cadena en 1942 y la implantación comercial de los primeros reactores nucleares de potencia. A pesar de los enormes progresos realizados, no hemos conseguido todavía el experimento definitivo de fusión que dé una producción de energía superior al consumo. Esto parece indicar que hasta bien entrado el próximo siglo no podrá añadirse la fusión a la lista de recursos energéticos disponibles.

Por todo lo antedicho se ve que la energía nucleoelectrónica de fisión es la única posibilidad actualmente disponible de que el género humano no tenga que enfrentarse con una escasez real de energía en el futuro próximo. Habrá que esperar bastante tiempo hasta conocer los resultados de los programas intensivos de investigación y desarrollo de otras posibilidades que han empezado ya o empezarán en breve. Es posible que durante el período 1980-1990 se materialicen algunos procedimientos técnicos cuyo estudio se inició en la década precedente; entre ellos, por ejemplo la licuefacción o gasificación del carbón, la reapertura de pozos petrolíferos abandonados, el aprovechamiento de la energía solar en regiones adecuadas, la explotación práctica de fuentes geotérmicas y de gradientes oceánicos, y la minería de pizarras bituminosas. No se pecará de pesimismo si, vista la inercia inherente a la industria de los servicios públicos, se supone que las últimas fuentes energéticas mencionadas no aportarán sino una contribución limitada a la solución del problema.

La energía nucleoelectrónica supone actualmente el 3% de la capacidad mundial de

generación eléctrica. Este 3% lo producen 128 reactores de potencia de 16 países que generan unos 35 000 MW(e). Cabe añadir que este año se calcula que habrá en funcionamiento 167 reactores de potencia con una capacidad generadora de 61 000 MW(e), lo que demuestra la rápida expansión de este sector. Se espera que para 1980 la energía nucleoelectrónica represente el 14% de la capacidad total de generación eléctrica, y el 50% al final del siglo. Es interesante señalar que actualmente hay 346 reactores de investigación en 45 países.

## SEGURIDAD NUCLEAR

Durante los últimos años se ha discutido mucho en torno a la seguridad nuclear a pesar de que ninguna otra industria presta tanta atención a las cuestiones de seguridad como la industria nuclear ni ha tenido tan pocos accidentes como ella. En una reciente visita a la planta de Savannah River en los Estados Unidos se me dijo que el número de accidentes de la industria nuclear era 40 veces inferior a los de la industria química. El Organismo Internacional de Energía Atómica publica anualmente una lista de reactores terrestres de potencia y de investigación en sus 104 Estados Miembros, y un informe anual sobre la experiencia adquirida con las centrales nucleares. En 1972 la experiencia acumulada reactores/años de funcionamiento se elevó a 1 004. Durante estos 1 000 años de funcionamiento de reactores no ha habido un solo incidente en que un reactor de potencia haya descargado accidentalmente cantidades perjudiciales de radiactividad en su medio ambiente circundante.

Hace unos 20 años los problemas de seguridad en los reactores nucleares estaban muy mal definidos. Actualmente la situación es diferente y podemos analizar hasta qué punto un cambio de diseño influye en la seguridad del reactor. La energía nucleoelectrónica puede ser tan segura

---

Vista general de la central nuclear de Oskarshamn-I (Suecia). Este reactor de agua hirviente tiene una capacidad de 440 MW(e).  
Fotografía: ASEA-ATOM



como uno quiera, si uno paga el precio necesario. Esta decisión es puramente social y a fin de cuentas son los usuarios quienes han de tomarla, sobre la base de la información proporcionada por los especialistas. No olvidemos que la evaluación de riesgos en tanto que disciplina científica, está aún en sus comienzos. Parece ser que entre riesgos voluntarios y riesgos involuntarios hay una relación de 1 a 1 000, y parece ser también que existe una relación entre beneficios y riesgos previstos. Generalmente, la gente suele ser ilógica en cuanto a los riesgos conocidos o previsibles: por ejemplo, en Suecia mueren anualmente 1 200 personas en accidentes de automóvil y 20 000 resultan gravemente heridas. Esto se acepta como cosa natural y un accidente mortal de automóvil merece solamente unas líneas en los periódicos. Un accidente ferroviario, en cambio, ocupa las primeras páginas aunque no haya víctimas, y un accidente aéreo atrae la máxima atención. La probabilidad de accidente en un reactor nuclear es tan pequeña que es difícil darle una interpretación significativa. El temor natural del hombre a lo desconocido, junto con las ideas asociadas a la bomba atómica, son probablemente muy responsables de la reacción emotiva que despiertan los riesgos de la energía nucleoelectrónica.

Diferentes tipos de reactores presentan problemas diferentes de seguridad. La elevada densidad de energía que existe en el núcleo de un reactor de agua ligera exige que se tomen amplias precauciones para que las consecuencias de un accidente no puedan ser excesivamente graves, considerando tanto la radiactividad como la toxicidad del combustible irradiado. La diferencia entre los reactores de agua ligera con combustible reciclado que contiene plutonio y los reactores reproductores no es muy grande desde este punto de vista.

En este contexto merece la pena recordar que el actual predominio de los reactores de agua ligera no tiene por qué mantenerse siempre. Los reactores de agua pesada y de alta temperatura refrigerados con gas se están implantando en el mercado. Ambos

sistemas son mucho más fáciles de analizar desde el punto de vista de la seguridad que el reactor reproductor, pueden usarse y, en el caso de los reactores de alta temperatura, ofrecen también la posibilidad de aprovechar el calor para procesos industriales. La "estrategia" de las mezclas de sistemas de reactores nucleares de potencia comenzó a debatirse en una reunión de especialistas organizada por el OIEA en noviembre de 1973.

Las discusiones públicas sobre las precauciones necesarias en materia de seguridad han ido, en mi opinión, más allá de lo necesario. ¿Por qué ha de pensar el público en general que los diseñadores e ingenieros nucleares son menos responsables que, por ejemplo, los diseñadores aeronáuticos? ¿Acaso ha pedido la opinión pública alguna vez que se le informe a fondo sobre las condiciones de estabilidad de un avión Jumbo cuando se prepara para aterrizar? Tan difícil es de entender esto como la descripción de un sistema de emergencia para la refrigeración del núcleo. Todos queremos vivir en equilibrio perfecto con la naturaleza pero sin sacrificar los beneficios de la tecnología. El público debe confiar en que los especialistas atómicos son sensibles a este deseo.

Los estrictos requisitos que deben cumplirse también con respecto de la vigilancia física han promovido la idea de construir complejos nucleares en emplazamientos adecuados. Tales complejos constan de cierto número de reactores de potencia grandes, y ocasionalmente una planta de reelaboración junto con instalaciones de almacenamiento para desechos radiactivos. Esta idea, cuando nació en los Estados Unidos, se refería a reactores de 5 000 MW(e). Empleando esta idea, el complejo nuclear podría incluso contener un polígono industrial o agrícola que usase la energía disponible con fines industriales, incluyendo la producción de hidrógeno y la desalación de agua. Semejante complejo podría protegerse más eficazmente y con menos gastos contra sabotajes y accidentes que las centrales individuales diseminadas en diferentes emplazamientos.

En estas condiciones, no podemos descartar la posibilidad de que elementos extraños intenten apoderarse de los materiales fisionables con objeto de usarlos para fines no autorizados. Si consideramos en primer lugar la posibilidad de que se robe material irradiado que contenga plutonio en un estanque de refrigeración donde esté almacenado el material, no debemos olvidar que tal combustible es muy radiactivo y que solo puede transportarse sin consecuencias mortales para los propios delincuentes si disponen de envases pesadísimos y complicadísimos que pueden pesar decenas de toneladas. Para poder aprovechar después el plutonio, habría que tratar el combustible en una planta de reelaboración que difícilmente pasaría inadvertida en los alrededores. En cuanto al lugar donde se almacenan los concentrados de plutonio o el óxido de plutonio, se trata de lugares muy bien protegidos por un sistema de seguros y dispositivos electrónicos que hacen sumamente difícil el acceso de una persona no autorizada. Además, en los países no poseedores de armas nucleares prácticamente todos los materiales fisionables están sometidos a un sistema de salvaguardias proyectado y puesto en ejecución por el Organismo Internacional de Energía Atómica. Los sistemas de registro, información e inspección requeridos por los acuerdos se salvaguardia del OIEA constituyen un control adicional de los materiales fisionables que apenas deja sin contabilizar cantidades mínimas de material. Aunque este sistema no puede por sí mismo evitar desviaciones, sí que disuade de ellas subrayando el riesgo de inmediata detección.

Este sistema internacional de salvaguardias, aplicado ahora en 33 Estados, requirió unas 450 inspecciones en 1972. Muchos Estados han establecido su propio sistema nacional de salvaguardias, que ayuda a contabilizar el material nuclear. Las posibilidades de que se haga desaparecer material fisionable para su uso clandestino con fines no autorizados sin que se descubra la desaparición, son remotas.

Los recintos necesarios en la mayoría de los países como protección contra la difusión de la radiactividad fuera del propio reactor pueden sustituirse, llegado el caso, por emplazamientos subterráneos. Las investigaciones relacionadas con los ensayos subterráneos de armas nucleares han demostrado que la migración de sustancias sólidas en el suelo es muy lenta. El estroncio y el cesio que pueden liberarse en caso de accidente de reactor tardarían, respectivamente, 2 500 y 19 000 años en recorrer un kilómetro. Cada caso debe juzgarse según sus propias circunstancias como es natural, y es necesario un profundo conocimiento de las condiciones geológicas antes de recomendar un emplazamiento subterráneo. Tampoco hay que olvidar el costo.

La conveniencia de elegir emplazamientos lejanos, junto con las grandes necesidades de agua para la refrigeración, ha hecho pensar en la construcción de islas artificiales sobre la plataforma continental, o incluso de islas flotantes. No cabe la menor duda de que esto reduciría al mínimo los efectos térmicos sobre el medio ambiente; en cambio, un accidente nuclear podría ocasionar una descarga de radiactividad en el mar y, por lo tanto, las medidas de precaución que habría que adoptar serían mas estrictas que en otros casos.

Una cuestión que debe tenerse en cuenta respecto al emplazamiento de centrales nucleares es lo que debe hacerse cuando acabe su vida útil, que es de unos 30 años. Con este problema se enfrenta ahora la central de la Eurochemic en Bélgica, en la que los gastos de descontaminación y restauración del emplazamiento para dejarlo tal como estaba se calcula que serán comparables al costo de construcción de la planta. Del proyecto y diseño inicial deben formar parte las medidas racionales para desmantelar y desmontar las centrales nucleares anticuadas. El desmantelamiento requiere no solamente conocimientos especializados, sino también disponer de una serie de recursos que debe tenerse en cuenta desde el principio. A finales de 1973 el OIEA convocó una reunión de un grupo de

especialistas para discutir estas cuestiones y se llegó a un acuerdo para establecer un grupo internacional de trabajo que coordinase las futuras actividades en esta esfera.

El mantenimiento de la paz es condición sine qua non para la amplia utilización de la energía nucleoelectrónica que se prevé. Una situación en la que las centrales nucleares instaladas al aire libre pudiesen convertirse en objetivos aéreos en caso de guerra tendría consecuencias incalculables, igual que una operación bélica entre algunos de los centenares de buques de guerra de propulsión nuclear.

## MEDIO AMBIENTE

¿Qué duda cabe de que el uso de la energía nucleoelectrónica ejerce ciertos efectos sobre el medio ambiente! Toda producción de energía en gran escala los ejerce. Ni siquiera la energía hidráulica se ve libre de las críticas de los defensores del medio ambiente, a quienes desagrada la construcción de grandes embalses y la desaparición de las cataratas. Las centrales térmicas de tipo convencional descargan gases de combustión en la atmósfera junto con cenizas en cantidades apreciables: una central térmica de carbón de 350 MW(e) descarga unas 75 toneladas de anhídrido sulfuroso, 16 toneladas de óxido de nitrógeno y 5 toneladas de cenizas diariamente, y esto sin contar los efectos térmicos.

La energía nucleoelectrónica representa una solución inocua para el medio ambiente, lo que no quiere decir que no plantee algunos problemas su uso intensivo. Es absolutamente falso afirmar que todos estos están ya resueltos, pero cierto es que actualmente están bajo control y que a fines de este siglo, se descubrirán técnicas aplicables a dichos problemas, que para entonces serán de otra magnitud.

Comencemos por la extracción del uranio. El uranio se encuentra asociado con sus productos de desintegración, entre ellos el radio y el radón. Las operaciones de extracción dan lugar a la liberación de polvo en suspensión en el aire con algo de radón y

residuos sólidos que contienen óxidos de uranio y su producto de desintegración, el radio, aunque en cantidades muy pequeñas. El problema más grave de higiene radiofísica ha sido la sobreexposición de los mineros de uranio, pero los actuales niveles de trabajo son mucho más bajos que los anteriores y los riesgos futuros para los mineros se reducirán notablemente.

El resto del proceso de transformación del uranio en elementos de combustible no pasa por ninguna etapa que pueda afectar al medio ambiente.

Una consecuencia de la utilización de muchos recursos energéticos, con excepción de la energía solar, es el calentamiento de la tierra. Desgraciadamente, sabemos muy poco acerca de sus efectos universales a largo plazo. Por ejemplo, no sabemos con seguridad si el uso intensivo de combustibles fósiles puede provocar una subida de la temperatura de la tierra o no. La producción de dióxido de carbono aumentará sin duda el llamado efecto de invernadero y, por lo tanto, hará subir la temperatura, mientras que la producción de partículas de polvo en suspensión en el aire mitigará los efectos de la insolación y puede tener consecuencias opuestas.

La relación entre la energía artificial y el flujo de energía solar era en 1860 de 1:1 millón. Cien años más tarde había aumentado a 1:10 000, y al final de este siglo la relación puede ser de 1:3 000. Esto puede hacer subir la temperatura unas décimas de grado centígrado, lo que puede tener considerables efectos climatológicos. Por lo tanto, estos problemas tienen que ser objeto de un cuidadoso análisis a su debido tiempo.

La producción de energía en gran escala tendrá efectos térmicos locales de larga duración que se dejarán sentir especialmente alrededor de los complejos nucleares del tipo antes descrito. Las centrales nucleares individuales de 1 000 MW(e) de capacidad actualmente en construcción tendrán repercusiones ambientales si se colocan a lo largo de ríos cuya capacidad de disipación

del calor sea insuficiente. La otra posibilidad: *construir torres de refrigeración*, elimina el problema ecológico para el biota acuático pero lo traslada a la atmósfera, y la campiña no resultará más hermosa con las altas torres de refrigeración y sus penachos de vapor, sin hablar de los efectos microclimáticos. Respecto a la *evacuación del agua de refrigeración* en grandes lagos u océanos en el caso de instalaciones costeras, parece ser perfectamente posible disponer tomas y desagües de tal modo que no se ocasione ningún perjuicio al biota.

La cuestión más intensamente discutida en los últimos años y que causa mayor preocupación al público en general es la producción, almacenamiento y posible evacuación de materiales radiactivos existentes en las centrales nucleoelectricas e instalaciones auxiliares, especialmente en las plantas de reelaboración.

En las centrales nucleares se genera radiactividad en forma de productos de fisión resultantes de la *disociación del núcleo de uranio* o por inducción en los materiales de construcción. Más del 99,9% de la radiactividad total generada en los elementos combustibles de un reactor nuclear de potencia queda retenida en ellos hasta que el combustible se trata para recuperar el combustible "no quemado". El refrigerante usado para eliminar el calor del núcleo del reactor puede ocasionar corrosiones y erosiones y hacerse radiactivo. En el reactor se producen también gases radiactivos tales como el tritio y el criptón. Una fracción de estos gases puede liberarse en el reactor, pero la mayor parte de ellos se evacuarán durante la reelaboración del combustible.

La Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones (CIPR) ha formulado recomendaciones relativas a las concentraciones máximas admisibles de diferentes sustancias radiactivas en el aire y en el agua. Estas recomendaciones tienen por objeto proteger al hombre de los efectos perjudiciales de las sustancias radiactivas por radiación, inhalación o ingestión.

Sabemos más sobre los efectos de las radiaciones atómicas en el hombre que sobre cualquier otro tipo de peligros a los que esté expuesto. Estas recomendaciones se basan en los resultados de un prodigioso esfuerzo desarrollado principalmente en el campo de la investigación biológica. El objeto de un sistema de gestión de desechos radiactivos es proteger al hombre y su medio ambiente y mantener la exposición muy por debajo de los límites admisibles. Los métodos seguidos hasta ahora han sido, o diluir la radiactividad hasta un nivel en el que las dosis resultantes para el hombre estén muy por debajo de las dosis máximas admisibles recomendadas, o concentrarla y confinarla. Hay una clara tendencia a abandonar el proceso de dilución en favor de la concentración seguida de confinamiento y aislamiento respecto de la biosfera. Hay que hacer una distinción entre el tratamiento temporal y el almacenamiento de desechos radiactivos durante largos períodos o su evacuación definitiva. Cada país da diferente importancia a estos métodos, pero se manifiesta una tendencia hacia el almacenamiento durante largos períodos, preparando simultáneamente la evacuación definitiva.

Como ya se ha indicado, la principal descarga de sustancias radiactivas del combustible nuclear tiene lugar en las plantas de reelaboración. Actualmente hay muy pocas plantas de este tipo y se calcula que para 1980 no habrá más de una por cada 30 000 MW(e) de capacidad nuclear de generación instalada, es decir que en 1980 no habrá más de 10 plantas importantes de reelaboración en funcionamiento. Actualmente no funciona en los Estados Unidos ninguna de estas plantas con fines civiles: una se está reformando, otra está en período de prueba sin materiales radiactivos, y la tercera está en construcción. En Europa Occidental, la planta de mayor capacidad es la de Windscale (Reino Unido), que puede recibir diferentes clases de combustible. Se está adaptando la planta a gran escala de Cap de La Hague (Francia) para tratar combustibles en forma de óxidos, y funciona una planta piloto en la República Federal de Alemania. En la

India está en construcción una planta a gran escala, basada en la planta piloto en funcionamiento desde 1965, y lo mismo sucede en el Japón. Todo esto se menciona para subrayar el limitado número de plantas de este tipo que se necesitarán incluso al final de este siglo, cuando la capacidad de generación nuclear en el mundo sea de 3 millones de MW(e).

En las plantas de reelaboración se liberan desechos gaseosos radiactivos en forma de tritio, criptón-85 y yodo-129. De estos gases el criptón-85 puede constituir un problema a la larga, pero se conocen ya métodos para separar y confinar el criptón que pueden aplicarse a las plantas de reelaboración que se construyan hacia fines de este siglo. La técnica usada para la gestión de desechos gaseosos es la retención y desactivación por almacenamiento durante un tiempo suficiente para que su radiactividad disminuya antes de descargarlos al medio ambiente.

Las plantas de reelaboración producen diariamente varios metros cúbicos de desechos acuosos radiactivos de actividad baja y media. Se usan diferentes métodos para el tratamiento de estos desechos; suelen comprender un período de almacenamiento para permitir la desintegración de las sustancias de período corto, seguido de un tratamiento químico, y dilución o concentración de diferentes fracciones.

Los desechos de alta actividad resultantes del proceso de concentración pueden almacenarse en forma líquida en cilindros de acero inoxidable, refrigerados y agitados, o se transforman en desechos sólidos. El primer método se usa en la planta anteriormente mencionada de Windscale.

El segundo método se usa en las plantas de reelaboración de la República Federal de Alemania, Francia y Estados Unidos. El producto sólido final contiene la sustancia radiactiva en forma de borato o fosfato vitreo o como masa fundida de silicato aluminico.

Los desechos radiactivos de alta actividad tendrán que almacenarse durante miles

de años, o durante períodos mucho más largos que los de existencia de cualquier sistema social estable. Basta con recordar que el período medio del isótopo 239 del plutonio es de 24 000 años. Si pudiesen separarse de los productos de fisión los elementos llamados actínidos (incluido el plutonio) de período largo los desechos restantes seguirían siendo peligrosos durante varios cientos de años en lugar de los muchos miles de años necesarios si los actínidos permanecen en los desechos.

La idea actual parece ser que deben almacenarse los desechos de alta actividad de forma que se puedan volver a recuperar. Si se sigue este principio, pueden proyectarse instalaciones de almacenamiento provisional para retenerlos hasta que se encuentren soluciones para su evacuación final.

La planta de reelaboración de Windscale es una instalación multifuncional que puede tratar combustibles de uranio metálico y combustibles de óxido de uranio. Como aproximadamente la mitad de la energía nucleoelectrónica generada en el mundo hasta ahora se ha producido en el Reino Unido, es de especial interés la experiencia de este país en el almacenamiento de los desechos de alta actividad originados por las 18 000 toneladas de combustible que se han tratado allí. En Windscale se han almacenado desechos de alta actividad durante más de 20 años, que actualmente tienen un volumen de 500 metros cúbicos y producen un calor de desintegración de 1,5 MW. Estos desechos, que están ahora en tanques más pequeños, cabrían en cuatro tanques de diseño más reciente de una capacidad de 150 metros cúbicos, que tienen forma de cilindro vertical de 6 metros de diámetro y 6 metros de altura. Cada tanque está confinado en una celda de hormigón con paredes de 1,5 metros de espesor, revestidas parcialmente con acero inoxidable, que forman de este modo un segundo recipiente. Un sistema de refrigeración garantiza la alimentación continua de agua para eliminar el calor de desintegración de los desechos, incluso en caso de avería total de la red eléctrica.

Aunque la experiencia adquirida con la planta de concentración por evaporación y con los sistemas de almacenamiento ha sido totalmente satisfactoria y demuestra que estos métodos pueden usarse con seguridad durante varias decenas de años, se reconoce que constituyen solamente una etapa transitoria y preparatoria. Se considera que la solidificación de los desechos ofrece un método más seguro de confinamiento a largo plazo. No cabe considerar la evacuación definitiva de los desechos mientras estén en estado líquido.

La evacuación definitiva significa que cesa el control sobre los desechos y que no es necesario poder recuperarlos. Por lo tanto, debe existir una garantía absoluta de que los desechos permanecerán alejados del hombre durante un período de tiempo indefinido.

En el Reino Unido los desechos se "inmovilizan" en forma de productos sólidos de baja lixiviabilidad, almacenándolos a continuación de modo que puedan recuperarse para una eventual evacuación definitiva. El objetivo es haber solidificado todos los desechos de alta actividad de Windscale para 1995.

De acuerdo con las nuevas normas de la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos, la solidificación debe realizarse dentro de los cinco años posteriores a la producción de los desechos radiactivos líquidos y estos desechos solidificados deben depositarse en una zona de almacenamiento designada por el Gobierno de los Estados Unidos en el plazo de otros cinco años.

Los desechos solidificados de Windscale se guardan en estanques sometidos a vigilancia radiológica para comprobar continuamente la integridad de los recipientes. En la República Federal de Alemania se ha elegido como método más idóneo la evacuación de los desechos radiactivos en cuevas salinas muy profundas, y para ello se usa la mina de sal abandonada de Asse, en Harz, que se supone tiene

suficiente capacidad para alojar todos los desechos radiactivos producidos en el programa nuclear de la República Federal de Alemania hasta el año 2000. Hasta ahora solamente se almacenan en Asse desechos solidificados de actividades baja y media pero se están tomando medidas para empezar a evacuar también desechos de alta actividad hacia 1976.

En Oak Ridge (Estados Unidos) se ha desarrollado un método para evacuar desechos radiactivos sin posibilidad de recuperación ulterior, utilizando inyecciones a alta presión de desechos de actividad baja o media junto con hormigón en estratos de pizarras rojizas a 300 metros de profundidad. Desde 1966 se han evacuado por este método 5 000 metros cúbicos con 5 millones de curios.

Otros métodos sugeridos de evacuación definitiva tendrán que esperar hasta que se realicen los necesarios estudios técnicos; por ejemplo, el empleo de cohetes para lanzar los residuos al espacio interplanetario o la utilización de aceleradores o reactores de fisión o de fusión para transformar sustancias de período largo en isótopos de período más corto. Los estudios sobre desechos radiactivos de alta actividad publicados hace tres meses por la Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos no excluyen la posibilidad de que estos métodos se utilicen en lo futuro, pero señalan la absoluta necesidad de efectuar análisis más detallados de los problemas concomitantes.

El tritio, isótopo del hidrógeno de 12 años de período, merece que se le dediquen unas breves palabras. El tritio se produce en la parte superior de la atmósfera por bombardeo del nitrógeno con rayos cósmicos, y el inventario global en régimen permanente de tritio natural es de unos 70 a 140 MCi. Se estima que como resultado de los ensayos con armas nucleares realizados antes del Tratado de Moscú de 1963, se descargaron en la atmósfera unos 7 700 MCi. Suponiendo que continúe el actual índice de crecimiento del programa

nuclear, se calcula que la acumulación de tritio como resultado de los procesos de fisión será de unos 600 MCi para el año 2000.

Se espera, pues, que durante los 20 próximos años la mayor parte del tritio del medio ambiente sea el procedente de los ensayos con armas nucleares, y que su cantidad total disminuya durante este período.

En los Estados Unidos la dosis media anual procedente de fuentes naturales es de

130 mrems. A estos deben añadirse 114 mrems anuales per capita debidos a la exposición provocada por fuentes artificiales, el 90% de los cuales son de origen médico: diagnóstico, radioterapia, etc. El funcionamiento de las centrales nucleares durante el año 1971 expuso a la población a la pequeñísima dosis total de 0,003 mrems. Aunque la utilización de la energía nucleoelectrica se multiplicase por un factor de cien, los reactores de potencia no aumentarían apenas la exposición total a la radiación.

### Resumiendo lo antedicho:

- Se necesitarán grandes cantidades adicionales de energía para mantener el nivel de vida a causa del aumento de la población y de la necesidad de utilizar más energía para extraer las materias primas indispensables.
- Entre las diferentes alternativas, solamente la energía nucleoelectrica obtenida por fisión está actualmente en condiciones tecnológicas y económicas de contribuir inmediatamente al abastecimiento mundial de energía. Con relación a las demás posibles fuentes, la energía nucleoelectrica desempeñará un papel cada vez más importante.
- Los reactores nucleares de potencia de que se dispone actualmente en el mercado han demostrado su seguridad de funcionamiento y una notable fiabilidad. Es de esperar que al aumentar la experiencia de funcionamiento, los futuros reactores de potencia de estos tipos sean todavía más seguros y más fiables.
- Los métodos conocidos y comprobados de gestión mantendrán durante los diez próximos años los desechos radiactivos aislados del medio ambiente, a un costo inferior al 1% del precio del kilovatio hora. Las cantidades mayores de desechos radiactivos que se producirán aproximadamente a partir de 1985 podrán almacenarse en condiciones que permitan su recuperación en un número reducido de lugares seleccionados en el mundo (unos 30) usando técnicas actualmente en estudio. Bajo los auspicios del OIEA se han celebrado ya conversaciones acerca del establecimiento de zonas internacionales de almacenamiento. Los resultados de la actual labor de desarrollo pueden limitar el tiempo necesario de almacenamiento a varios siglos en lugar de miles de años.
- La energía nucleoelectrica brinda la posibilidad de colmar el deficit energético hasta que se descubran nuevas fuentes de energía y, planificándola y controlándola cuidadosamente, no enfrentará a la Humanidad con consecuencias inaceptables para el medio ambiente.